

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*

УДК 523
ББК 22.65



ISBN 978-5-6055159-1-3

© Сергей Иванович Ипатов, 2025

© Издатель С. И. Ипатов, 2025

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 (Deer 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/ERcqCl-mk30ggMYFBAAAAAABye6tCmVUGVWRphNZ_k-WIg?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_WKVFeZfJeWQ2qbqD1A?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 выкладывания 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. Планетезималами 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 «троянские» 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 «троянцы» - 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 И-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** ($e_0 = e_2 = e_1 = 0$, e_1^0 и e_2^0 - эксцентриситеты орбит МТ) при исходном угле с вершиной в Солнце между направлениями на объекты $\phi_0 = 60^\circ$, $10^{-9} \leq \mu_1 \leq 10^{-4}$ и рассматриваемом интервале времени $T_0 \sim 10^4 t_0$ (t_0 - время одного оборота первой МТ вокруг Солнца) максимальные значения $\epsilon_0 = (a_2^0 - a_1^0)/a_1^0$ (где a_1^0 и a_2^0 - начальные значения больших полуосей орбит МТ) для N-, M-, A- и C-типов N_t 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 $\phi_0 = 60^\circ$ 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 планетезилями.

При $10^{-9} \leq \mu_1 \leq 10^{-4}$ и $\phi_0 = 60^\circ$ 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 $\epsilon_0 = 0$ 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 $\epsilon_0 \approx \alpha$ 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_t 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_t 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 большего 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. Узлом 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 Амура, а также метеоритов, выпадавших на Землю, могли быть, в частности, тела из люков 3:1, 2:1, 5:2 и из внутренней части астероидного пояса.

Рассмотренные тестовые астероиды достигали орбит Марса и Земли, как правило, при определенных типах взаимосвязей между долгопериодическими изменениями эксцентриситета астероида и разности долгот перигелиев орбит астероида и Юпитера. Подробно были исследованы различные типы таких взаимосвязей. Для каждого из этих типов определены пределы изменений и периоды долгопериодических изменений элементов орбит. При небольших эксцентриситетах и наклонениях орбит для ряда тестовых астероидов рассмотрены взаимосвязи между периодами изменений эксцентриситета, наклонения, аргумента перигелия и долготы восходящего узла орбиты астероида. Были выведены формулы перехода от прямоугольных координат к орбитальным, свободные от особенностей при нулевых наклонах (см. [230] и параграф 2 главы 3 в [78]).



Рисунок 1. График распределения астероидов по эксцентриситетам и большим полуосям их орбит в окрестности люка Кирквуда 5:2. Пунктирной и штрих-пунктирной линиями помечены границы максимальной области значений $\Delta a_0 = a_0 - a_{5/2}$ и e_0 , при которых для некоторых исходных ориентаций орбит и начальных положениях тестовых астероидов на этих орбитах в ходе эволюции максимальный эксцентриситет орбиты астероида при расчетах превышал 0.41, в плоском случае и при начальном наклонении i_0 орбит, равном 10° , соответственно. a_0 и e_0 — это начальные значения большой полуоси a и эксцентриситета орбиты тестового астероида, а $a_{5/2}$ — значение a , соответствующее резонансу 5:2. На верхней оси x приведены значения $1000(a_0 - a_{5/2})/a_0$ (отклонения от резонанса) в отличие от нижней оси a_0 . Разные значки соответствуют разным наклонениям орбит астероидов. Этот рисунок показывает, что размер люка Кирквуда совпадает с размером области начальных эксцентриситетов и больших полуосей орбит астероидов, при которых в ходе эволюции достигается орбита Марса.

В статье [29] приведены результаты расчетов (с несколькими значениями точности интегрирования на шаге) миграции тестовых астероидов при резонансах 3:1 и 5:2 с Юпитером при начальных эксцентриситетах e_0 орбит равных 0.05 или 0.15 и начальных наклонениях i_0 равных 5° или 10° . В табл. 4 статьи [29] значения вероятностей столкновений таких астероидов (за время их динамической жизни) с Венерой, Землей и Марсом были соответственно порядка 10^{-3} , $2 \cdot 10^{-3}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ при $e_0=0.15$, $i_0=10^\circ$ и резонансе 3:1 и порядка 10^{-4} , $3 \cdot 10^{-4}$ и 10^{-4} при $e_0=0.15$, $i_0=10^\circ$ и резонансе 5:2. При $e_0=0.05$ эти вероятности могли быть в несколько раз меньше. На рис. 5 статьи [29] приведено распределение мигрировавших астероидов по большим полуосям и наклонениям их орбит при $e_0=0.15$, $i_0=10^\circ$ и резонансе 3:1. Из этого рисунка, в частности, следует, что большие полуоси орбит в основном находились в интервале от 2 до 3 а.е., но было и немало значений между 0.5 и 10 а.е. Наклонения орбит могли достигать 180° .

4. Моделирование эволюции орбит небесных тел методом сфер

До 21-го века моделирование на ЭВМ эволюции дисков, состоящих из сотен гравитирующих тел, движущихся вокруг Солнца, еще не могло быть проведено на интервалах времени в десятки-сотни миллионов лет путем численного интегрирования уравнений движения задачи N -тел. В этом случае можно было применять приближенные методы учета гравитационных

взаимодействий тел и, в частности, метод сфер. В методе сфер считается, что вне рассматриваемой сферы (обычно сферы действия) тела движутся вокруг Солнца по невозмущенным кеплеровским орбитам, а внутри сферы относительное движение рассматривается в рамках задачи двух тел. В публикациях Ипатова [1-5, 7, 9-11, 13, 15, 17-20, 216-217, 221, 225-228] в 1978-1995 годах неоднократно использовались результаты расчетов, в которых взаимное гравитационное влияние тел учитывалось методом сфер действия. Радиус сферы действия планеты (области пространства, в которой относительные возмущения планеты больше относительных возмущений Солнца) равен $r_s = R \cdot \mu^{2/5}$, где R - расстояние планеты от Солнца, а μ - отношение массы планеты к массе Солнца.

Ниже кратко описывается используемый алгоритм метода сфер, проводится сравнение результатов расчетов, полученных этим методом, с результатами численного интегрирования уравнений движения и исследуются характерные изменения элементов орбит тел при одном сближении до радиуса сферы действия. Подробнее об этом можно почитать в [16, 216, 221, 224] и в главе 4 монографии [78]. Программы моделирования методом сфер действия эволюции дисков тел, объединяющихся при столкновениях, приведены в отчете ИПМ РАН № О-1211 за 1985 г. Алгоритмы, приведенные в этом отчете, были рассчитаны на многопроцессорную ЭВМ ПС-2000, но многие подпрограммы использовались и для расчетов на однопроцессорной ЭВМ БЭСМ-6.

В отличие от схемы Эпика, используемой другими авторами, в предложенном Ипатовым [216] алгоритме (см. также параграф 2 в главе 4 в [78]) **характерное время до сближения** (до радиуса r_s рассматриваемой сферы) двух тел зависело не только от их средней относительной скорости и угла Δi между плоскостями орбит, но также от синодического периода T_s обращения этих тел и от суммы углов $\Delta \phi$ с вершиной в Солнце, внутри которых расстояние между орбитой "первого" тела и проекцией орбиты "второго" тела на плоскость орбиты "первого" тела меньше радиуса r_s рассматриваемой сферы. Наряду со случаем фиксированного угла Δi между плоскостями орбит тел впервые был рассмотрен случай переменного Δi . Получено, что характерное время до столкновения тел в случае переменного Δi может быть в несколько раз меньше, чем для фиксированного Δi , равного среднему значению переменного Δi . В отличие от схемы Эпика предложенные формулы более удобны при аналитических исследованиях зависимости эволюции диска от числа составляющих его тел. Они позволяют также учесть некоторые более тонкие эффекты взаимодействий тел. В [29] в этот алгоритм вычисления вероятности был добавлен коэффициент, учитывающий отличие скорости в момент сближения в рассматриваемой точке от средней скорости движения по орбите.

Такие формулы характерного времени до сближения до радиуса сферы (вместе с вычислением вероятности столкновения внутри сферы) использовались также для оценки вероятности столкновений тел (пылевых частиц) за большой интервал времени на основе массивов элементов орбит мигрировавших тел-планет, полученных путем численного интегрирования уравнений движения. Например, такие оценки проводились в [28-31, 33, 53, 61, 86-94] при изучении вероятностей столкновений тел с планетами, когда эти вероятности малы и при численном интегрировании эволюции орбит даже сотен тел не происходит их столкновений с планетами.

Результаты расчетов методом сфер действия сравнивались с результатами численного интегрирования уравнений движения и показали успешность применения метода сфер для рассматриваемых нами задач. В частности, было проведено **сравнение результатов** исследования эволюции гелиоцентрических орбит двух гравитационно взаимодействующих объектов, **полученных путем численного интегрирования, с аналогичными результатами, полученными с помощью метода сфер** [221]. На основе этого сравнения исследованы границы применимости метода сфер при использовании сфер действия и сфер большего радиуса. При небольших относительных скоростях v_r сближающихся тел метод сфер действия плохо аппроксимирует реальное движение тел внутри сферы действия. Кроме того, даже при довольно хорошем приближении движения внутри сферы действия скорости тел, выходящих из сферы действия, могут значительно отличаться от реальных. Однако, в ряде случаев при приближенном исследовании эволюции орбит тел за большое число сближений можно пользоваться методом сфер даже при малых значениях v_r .

Для ряда исходных данных Ипатов [221] сравнил несколько десятков графиков изменений со временем элементов гелиоцентрических орбит двух гравитирующих тел, полученных при моделировании эволюции методом сфер, с аналогичными графиками, полученными при численном интегрировании уравнений движения. Анализ этих графиков показал, что с помощью метода сфер можно получить пределы и основные тенденции изменений элементов

гелиоцентрических орбит. Получено, что при соответствующем выборе радиуса используемой сферы основные тенденции эволюции и пределы изменений элементов орбит двух гравитирующих объектов, движущихся вокруг Солнца по пересекающимся орбитам, примерно одинаковы для таких графиков. В случае, когда наибольший эксцентриситет гелиоцентрических орбит сближающихся объектов $e_m > 2\mu^{1/3}$, следует использовать сферы действия, а при меньших эксцентриситетах - сферы радиуса $r_s \approx 2.4 \cdot R \cdot \mu^{1/3}$, где R - расстояние этих объектов от Солнца, μ - отношение суммы масс объектов к массе Солнца.

В препринте [216] в 1978 г. были представлены результаты расчетов эволюции **плоских дисков** из ста одинаковых материальных точек (МТ), движущихся вокруг центрального тела (Солнца) по первоначально круговым орбитам. Суммарная масса всех МТ варьировалась от 10^{-5} до 0.1 от массы Солнца. В ходе эволюции эти диски расширялись, средний эксцентриситет орбит тел возрастал, а число МТ с малыми e было невелико. Исследовалась также эволюция диска, масса которого в 10^5 раз превышала массу астероидного пояса, а распределение масс больших МТ было близко к распределению масс крупных астероидов главного пояса. Средний эксцентриситет e_{av} орбит тел первоначально равнялся 0.15 и возрастал в ходе эволюции. При этом эксцентриситеты орбит крупнейших МТ уменьшались. Наряду с общим расширением диска была получена концентрация массивных МТ по a . Как и в случае дисков равных масс, эксцентриситеты орбит внешнего края диска ($\sim 0.4-0.6$) значительно превышали e_{av} (0.15-0.2). Проведенные оценки показывают, что для того, чтобы средний эксцентриситет орбит астероидов увеличился от нуля до 0.15 (современного среднего эксцентриситета) за время существования Солнечной системы, масса диска должна значительно превышать массу астероидного пояса (при учете гравитационного влияния только тел диска) [216]. Это, как и большое (34.8°) наклонение орбиты Паллады, одного из крупнейших астероидов, свидетельствуют в пользу формирования пояса астероидов под влиянием тел из зон планет-гигантов.

Эволюция пространственных дисков тел [3, 11, 15, 67, 78, 85, 224-225, 227-228, и др.] исследовалась путем соответствующей редукции пространственной эволюционной задачи к плоской на основе результатов моделирования на ЭВМ эволюции плоских дисков условных тел большой плотности [3, 225]. Плотность условных тел подбиралась таким образом, чтобы изменения эксцентриситетов орбит между столкновениями условных тел (а значит и сами эксцентриситеты) были примерно такими же, как и при эволюции рассматриваемых пространственных дисков твердых тел (при плотности тел, близкой к современной плотности планет). Тонкие эффекты эволюции пространственных дисков с помощью рассматриваемой редукции получить нельзя, но при малом числе начальных тел (менее 1000) их не дает и прямое моделирование на ЭВМ эволюции пространственных дисков.

При моделировании методом сфер эволюции дисков гравитирующих тел, движущихся вокруг Солнца, встает **задача выбора пар тел (объектов), сближающихся до радиуса рассматриваемой сферы**. В рассмотренных в [2-5, 10-11, 13, 15, 20, 216-217, 224, 226-227] моделях эволюции протопланетного околосолнечного диска в ходе расчетов периодически требовалось определять пару объектов, которые первыми будут контактировать (сближаться до расстояния, равного радиусу r_s рассматриваемой сферы). В [67] и в приложении 1 в [78] описаны различные модификации разработанного Ипатовым метода выбора пар контактирующих объектов при исследовании эволюции дискретных систем с бинарными взаимодействиями. Рассматривалось два подхода при выборе пар контактирующих объектов: вероятностный и детерминированный.

При вероятностном подходе пары сближающихся объектов выбирались пропорционально вероятностям их сближений на основе матрицы p_{ij} вероятностей контактов пар объектов ([216] и приложение 1 в монографии [78]). После моделирования каждого сближения вычислялась сумма p_{ij} для всех пар текущих орбит и масс объектов, моделировалось случайное число в интервале от нуля до этой суммы, и по этому числу определялась соответствующая пара контактирующих объектов.

При детерминированном подходе выбиралась та пара объектов, для которых время t_{ij} (p_{ij} обратно пропорционально t_{ij}) до изолированного (от других объектов) контакта-сближения минимально. Рассматривалась треугольная матрица t_{ij} . После контакта i и j объектов в этой матрице менялись i и j строки и столбцы. Задача алгоритма состояла в том, чтобы выбрать в новой матрице t_{ij} минимальный элемент, сделав минимальное число операций. Предложенный метод, названный методом условной треугольной матрицы, описан в статье [67], в приложении 1 в [78], в тезисах [216] и в отчете ИПМ № 1211 за 1985 год (в отчете ИПМ № 3385 за 1985 год обсуждалась

реализация этого метода на многопроцессорной ЭВМ ПС-2000). Показано, что этот метод эквивалентен методу полного перебора элементов матрицы t_{ij} . Обсуждалась также проблема периодической перенумерации объектов из-за уменьшения числа рассматриваемых объектов со временем, разбиение объектов на группы и другие модификации алгоритма, увеличивающие скорость вычислений. Результаты расчетов показали, что метод условной треугольной матрицы (без дополнительных модификаций) в 1.5-2 раза быстрее, чем метод виртуальных контактов, использовавшийся Т.М. Эннеевым и Н.Н. Козловым (препринт ИПМ, № 78. 1979).

Первоначально в расчетах Ипатова использовался вероятностный метод выбора пар сближающихся тел. В публикациях начиная с 1990 г в [11, 15, 67, 78, 85, 237, 238, и др.] (а также в отчете ИПМ РАН № О-1211 за 1985 г.) рассматривались расчеты, сделанные с помощью детерминированного метода. Результаты расчетов показали, что если число рассматриваемых объектов велико, то при детерминированном выборе пар сближающихся тел характерное время между последовательными сближениями тел на порядок меньше, чем при вероятностном выборе, хотя в обоих случаях использовались те же самые формулы вероятности сближения двух тел до радиуса сферы.

В статье [7] и в параграфах 5-7 главы 4 в [78] обсуждались основные принципы построения алгоритма моделирования эволюции диска, состоящего из большого числа тел. Этот алгоритм позволяет исследовать не только начальную, но и конечную стадии аккумуляции планет из диска планетезималей. На основе результатов расчетов получены формулы, характеризующие некоторые зависимости характерных изменений элементов орбит тел и вероятности их столкновений при сближении тел до радиуса сферы действия от масс и элементов орбит тел. Для модели эволюции диска примерно одинаковых тел и модели выпадения тел на зародыш планеты были получены новые формулы, характеризующие число столкновений и сближений (до радиуса рассматриваемой сферы) тел за некоторый отрезок времени.

На основе результатов моделирования эволюции дисков из сотен тел Ипатовым [3, 7, 228] проводились аналитические оценки эволюции дисков, состоящих из большого $\sim 10^{12}$ числа тел. Из этих оценок (см. также параграф 2 главы 5 в [78]), в частности, следует, что максимальные значения среднего эксцентриситета e_{av} орбит при эволюции этих дисков не меньше, чем при эволюции дисков из сотен тел, имеющих ту же самую суммарную массу тел. Большинство планетезималей, выпадавших на Землю, прошло ударную эволюцию. Учет дроблений тел при столкновениях может в несколько раз увеличить время формирования основной массы планет [7], а значительное увеличение начального числа тел и учет сопротивления газа могут уменьшить перемешивание тел в ходе аккумуляции планет. Рассмотрены зависимости времени эволюции и изменений среднего эксцентриситета от числа тел в диске, их масс и характерных элементов орбит.

Был сделан вывод о том, что при эволюции диска различных тел для модели, учитывающей дробления тел и сопротивление газа, времена роста крупнейших тел диска не превышают (во всяком случае более чем в 5 раз) времена роста тел для модели примерно одинаковых начальных тел, если массы дисков в обоих случаях одинаковы. Тела больших масс растут быстрее. Поэтому учет дифференциации тел по массам только усилит приведенное выше утверждение. Хотя при столкновениях с крупными телами зародыши планет могут разрушаться, расплавляться и частично испаряться, значительная часть осколков под действием гравитации может вновь собраться в одно тело. Однако даже теряя часть массы при столкновениях с крупными телами, зародыши планет могли в целом расти за счет аккумуляции небольших тел.

5. Аккумуляция планет земной группы

Считается, что в околосолнечном газопылевом диске образовались пылевые сгущения, сжавшиеся в планетезимали – твердые тела в основном диаметром от километров до сотен километров. Эти планетезимали участвовали в аккумуляции планет земной группы и зародышей планет-гигантов, которые аккрецировали газ. Когда в протопланетном диске еще оставался газ, рост зародышей планет происходил также путем аккреции объектов типа гальки (pebble accretion). Такая аккреция заканчивалась, когда зародыш планеты достигал определенной массы (pebble isolation mass). Аккреция «гальки», вероятно, играла большую роль в зоне питания планет-гигантов, чем в зоне питания планет земной группы. Зародыши планет-гигантов аккрецировали газ. С обзором работ по формированию планетезималей и аккреции объектов типа гальки можно ознакомиться, например, в параграфе 14 главы 1 монографии [78], в разделе 2.2 статьи [59] и во введении статьи [64]. Обсуждение модели Т.М. Эннеева – Н.Н. Козлова, в которой планеты

образовывались путем объединений разреженных сгущений, проводилось мною в [76]. Реальный процесс формирования планет был очень сложным и зависел от многих факторов. Однако исследования на основе сравнительно простых моделей позволяют сделать ряд важных оценок процесса аккумуляции планет.

При изучении аккумуляции планет земной группы наряду с аналитическими оценками проводились расчеты эволюции дисков гравитирующих тел, объединяющихся при столкновениях. После середины 1990-х годов в таких расчетах гравитационное влияние крупных тел учитывалось путем интегрирования уравнений движения тел. Обзор работ по аккумуляции планет земной группы можно посмотреть в разделе 3 статьи [59]. В более ранних работах при учете гравитационного влияния тел использовался метод сфер. В этом методе (см. подробнее предыдущий раздел) считалось, что тела двигались по невозмущенным гелиоцентрическим орбитам вне рассматриваемых сфер, а внутри сферы движение тел рассматривалось в рамках задачи двух тел. При моделировании эволюции дисков тел, соответствующих зонам питания планет, Ипатовым [2, 3, 13, 15, 78, 224] рассматривались сферы действия. При выборе пар тел, сближающихся до сферы действия, сначала использовался «вероятностный» алгоритм, в котором пары тел, сближающихся до расстояния, равного радиусу сферы действия, выбирались пропорционально вероятности их сближения. Позднее был разработан эффективный «детерминированный» алгоритм, при котором для выбранной пары i и j сближающихся тел момент t_{ij} ближайшего изолированного сближения до радиуса сферы действия минимален [67, 78].

Методом сфер действия Ипатов [2, 3, 13, 15, 78, 224] рассматривал эволюцию дисков, каждый из которых содержал до 1000 гравитирующих тел в зоне питания планет земной группы, объединявшихся при столкновениях. Начальные расстояния тел от Солнца варьировались в пределах от 0.36 или 0.4 а.е. до 1.2 а.е., а их суммарная масса составляла около $1.9m_E$, где m_E – масса Земли. Расчеты эволюции **плоских дисков** показали [2, 219], что в случае почти круговых начальных орбит тел число образовавшихся планет оказывается больше четырех, а реальное число планет земной группы получается лишь при начальных эксцентриситетах орбит тел $e_0=0.35$. При малых начальных эксцентриситетах реальное число планет можно получить в модели эволюции пространственных дисков, при этом в одном из вариантов расчетов образовывалось четыре планеты с массами, большими $0.046m_E$. Реальное число планетезималей было гораздо больше 1000, и только часть вещества двух сталкивающихся тел формировала новое тело. Однако вычислительные мощности компьютеров прошлого столетия не позволяли рассматривать более сложные модели. Учет дроблений сталкивавшихся тел мог несколько увеличить время аккумуляции планет.

В расчетах **эволюции пространственных дисков тел, соответствующих зоне питания планет земной группы**, [3, 13, 15, 78, 224] начальные эксцентриситеты орбит тел принимались равными $e_0=0.02$ и было показано, что такие эксцентриситеты довольно быстро достигаются при учете взаимного гравитационного влияния тел на расстояниях, меньших их радиусов сфер действия. Пример эволюции таких дисков приведен на рис. 1-2. Средний эксцентриситет e_{av} орбит тел в ходе эволюции превышал 0.2, а в ряде вариантов в некоторые моменты времени был больше 0.4. Например, в одном из вариантов при $e_0=0.02$ и 960 начальных телах e_{av} равнялось 0.09, 0.20 и 0.35 при числе тел в диске, равном 500, 250 и 100 соответственно. При этом большие средние эксцентриситеты орбит были у тел, расположенных по краям диска, с большими полуосями $a<0.4$ а.е. и $a>1.2$ а.е., а орбиты некоторых планет с массами порядка масс Меркурия и Марса приобретали в конце эволюции эксцентриситеты, близкие к современным эксцентриситетам орбит этих планет. Заметим, что рост эксцентриситетов орбит Меркурия и Марса (и наклонение орбиты Меркурия) мог быть обусловлен гравитационным влиянием тел, заходивших в зону питания планет земной группы из зон питания планет-гигантов, а не только влиянием крупных тел из зоны питания планет земной группы. Причем некоторые из этих тел-пришельцев могли не сталкиваться с телами в этой зоне питания, а только гравитационно возмущали их орбиты. Высокое содержание железа в ядре Меркурия обычно объясняют потерей большей части массы силикатной оболочки при высокоскоростных ударах. Вместе с тем, часть планетезималей в окрестности орбиты Меркурия, проходивших сравнительно недалеко от Солнца до их столкновений с зародышем Меркурия, могла потерять некоторую силикатную часть своего состава при таких прохождении около Солнца и оказать тем самым влияние на высокое содержание железа в ядре Меркурия.

Массы зародышей несформировавшихся планет земной группы могли превышать $0.05m_E$, что позволяет объяснить, как наклон оси вращения, так и период осевого вращения Земли, при выпадении таких зародышей на растущую Землю. По моим оценкам, время формирования 80%

массы крупнейшей каменной планеты (аналога Земли) не превышало 10 млн лет, в то время как общее время эволюции дисков гравитирующих тел было порядка 100 млн лет. При расчетах методом сфер действия времена формирования основной массы планет порядка 1-10 млн лет были получены при рассмотрении «детерминированного» метода выбора пар сближающихся тел, когда при моделировании сближения выбиралась пара тел с минимальным временем до сближения [78, 67]. Между тем, при использовании «вероятностного» метода выбора пар сближающихся тел времена формирования основной массы планет были почти на порядок больше. То есть вероятностный подход меньше соответствует реальной эволюции. Однако и при нем максимальные значения среднего эксцентриситета и массы и орбиты образовавшихся планет были примерно такие же, как и при детерминированном методе выбора пар тел.

Время, за которое число тел в диске уменьшалось от N_0 до N , обычно было примерно в два раза меньше времени, за которое число тел в диске уменьшалось от N_0 до $N/2$, причем основное время эволюции рассмотренных дисков приходилось на последние стадии аккумуляции планет. Поэтому был сделан вывод о том, что при $N_0=10^{12}$ общее время эволюции диска примерно такое же, как и при $N_0=10^3$, однако учет дроблений тел при столкновениях может в несколько раз увеличить время формирования основной массы планеты [7, 78].

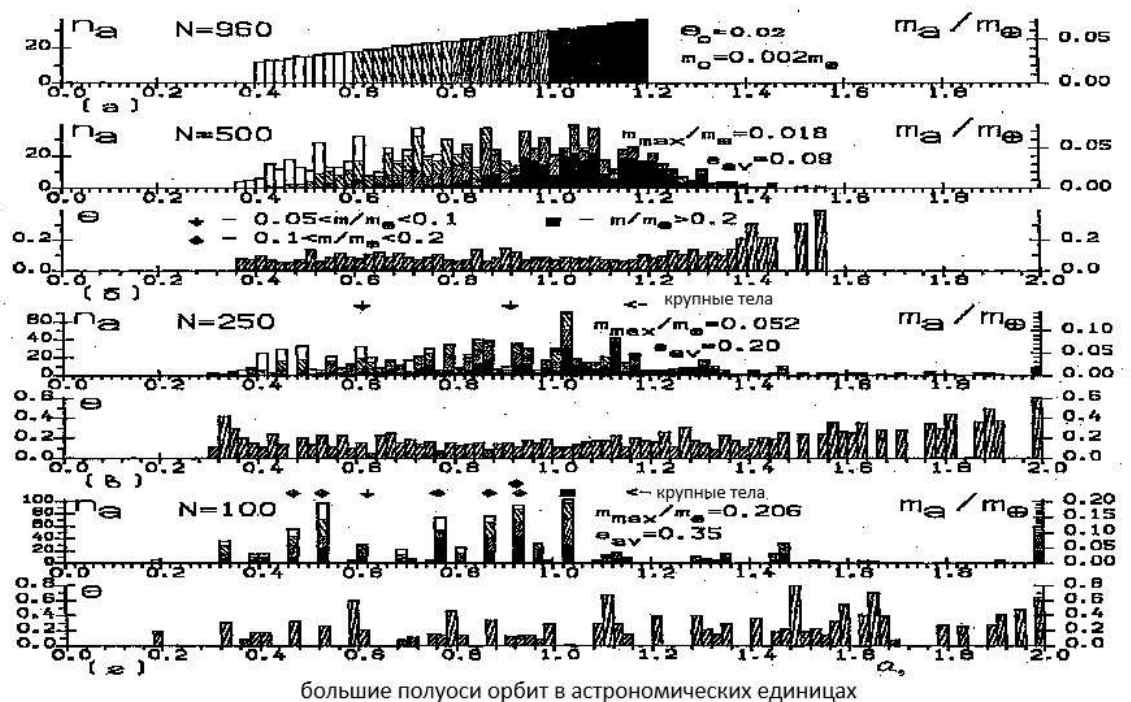


Рисунок 1. Гистограммы распределения числа тел n_a в начальном диске (верхний подрисунок), а также распределения масс тел и средних эксцентриситетов орбит тел в эволюционирующем диске (при различном числе N оставшихся тел) по большим полуосям их орбит. Начальный диск соответствовал зоне питания планет земной группы и находился на расстоянии от Солнца от 0.4 до 1.2 а.е. Масса каждого из 960 начальных тел равнялась $0.02m_E$, а эксцентриситеты их орбит равнялись 0.02. В зависимости от начального расстояния от Солнца тела были разбиты на четыре группы. Каждая группа на гистограммах помечена своей штриховкой. Суммарная масса тел начального диска равнялась $1.92m_E$. Стрелочками указаны большие полуоси орбит тел, массы которых превышали $0.05m_E$.

Как показали более поздние результаты численного интегрирования уравнений движения, полученные рядом авторов, в которых взаимное гравитационное влияние тел учитывалось путем интегрирования уравнений движения, детерминированный подход вполне удовлетворительно (и лучше, чем вероятностный подход) отражает реальную эволюцию дисков тел и времена формирования планет. В последние годы начальное число моделируемых тел в дисках исчисляется тысячами, что, естественно, улучшает статистику. Основные выводы об аккумуляции планет земной группы, сделанные на основе расчетов методом сфер действия и путем численного интегрирования уравнений движения, примерно одинаковые.

Аккумуляция планет земной группы обсуждалась также в параграфе 1 главы 6 монографии [78], в разделе 3 статьи [59] и в статье [64]. В таблицах В и С в статье [85] для двух вариантов расчетов приведен состав планет, образовавшихся из четырех групп тел, первоначально находившихся от Солнца на расстояниях 0.4-0.6, 0.6-0.8, 0.8-1.0 и 1.0-1.2 а.е., а также большие полуоси и эксцентриситеты орбит этих планет. Для планет с массами большими $0.1m_E$ доли тел, пришедших в планеты с этих четырех диапазонов расстояний, находились в интервалах 0.11-0.22, 0.19-0.25, 0.19-0.34 и 0.32-0.40, то есть эти доли не сильно отличались для планет, образовавшихся на различных расстояниях от Солнца. В каждую из планет вошли тела-планетезимали, первоначально находившиеся на одном и том же расстоянии от Солнца. Состав крупных планет был довольно близок к составу исходной зоны 0.4-1.2 а.е., то есть планетезимали довольно сильно перемешивались в ходе эволюции, если учитывать взаимное гравитационное влияние всех тел-планетезималей. На основе аналитических формул и результатов численных расчетов в [7] отмечалось, что основное время аккумуляции планеты приходится на конечные этапы ее аккумуляции. В параграфе 2 в главе 6 монографии [78] отмечалось, что при моделировании эволюции дисков тел в зоне планет-гигантов на некоторых этапах эволюции этих дисков около 1% тел могли пересекать орбиту Земли.

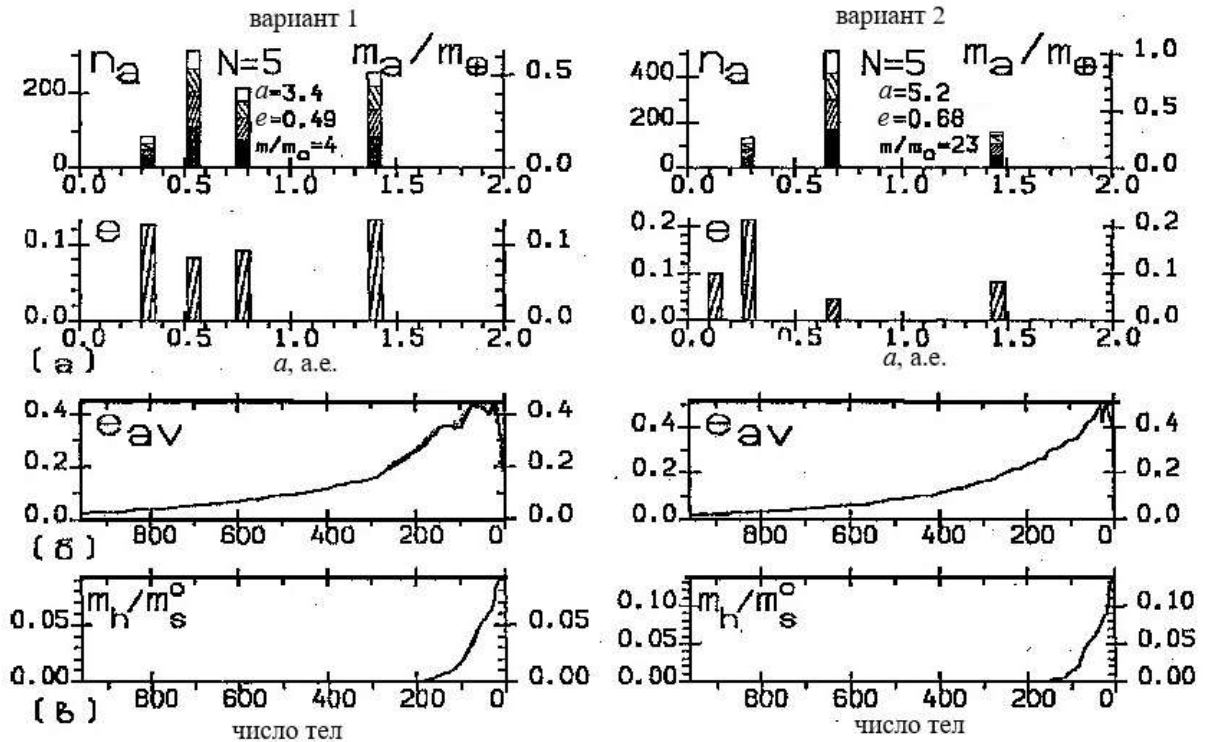


Рисунок 2. Гистограмма характеристик образовавшихся планет и динамика эволюции дисков для двух вариантов расчетов. Начальные данные для этих дисков приведены на предыдущем рисунке. На верхних рисунках приведены массы образовавшихся планет (слева - в массах начальных тел, справа - в массах Земли) и эксцентриситеты их орбит. Большая полуось орбиты пятого образовавшегося тела в обоих вариантах превышала 2 а.е. На нижних рисунках приведены зависимости среднего эксцентриситета e_{av} орбит тел и отношения m_h/m_s^0 суммарной массы тел, выброшенных на гиперболические орбиты, к суммарной массе начальных тел от числа тел в диске. Видно, что в состав образовавшихся планет вошли тела из разных групп тел (тела разных групп находились на разных расстояниях от Солнца).

Оценки времени формирования основной массы Земли порядка 100 млн лет практически не изменились со времени публикации монографии В.С. Сафронова в 1969 г. (Сафронов В.С., Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет, 1969. Наука, 244 с.). На основании результатов моделирования эволюции дисков первоначально одинаковых тел, объединяющихся при столкновениях, соответствующих зоне питания планет земной группы [3, 13, 15, 78, 224], а

также на основании численных расчетов миграции тел под влиянием планет или их зародышей [55] (см. также конец данного раздела) были сделаны следующие **выводы об аккумуляции планет земной группы**: Внутренние слои каждой планеты земной группы аккумулялировали в основном планетезимали из окрестности орбиты этой планеты. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулялировать аналогичные планетезимали из разных областей зоны питания планет земной группы. Земля и Венера могли приобрести более половины своей массы за 5 млн лет.

Считается, в том числе на основе изучения марсианских метеоритов, (см. обзор в разделе 3.3 в [59]), что аккумуляция и отвердевание Марса завершились в течение ~ 5 -10 млн лет, за которые Марс вырос примерно до современных размеров. Согласно [55], Марс рос медленнее, чем Земля и Венера, а отдельные планетезимали в его зоне питания могли оставаться и после 50 млн лет. Можно поэтому предположить, что при сжатии сгущения вначале образовался достаточно крупный зародыш Марса с массой не меньше $0.02m_E$, а планетезимали из зоны питания Юпитера и Сатурна способствовали более быстрому удалению планетезималей из его зоны питания. Формирование зародыша Марса с массой, в несколько раз меньшей, чем масса Марса, в результате сжатия разреженного сгущения может объяснить относительно быстрый рост основной массы Марса. Аналогичный сценарий был предложен в [55] для формирования зародыша Меркурия с той же начальной массой. Доля планетезималей, выброшенных из зоны питания планет земной группы на гиперболические орбиты, не превышала 10%. На аккумуляцию планет земной группы оказывали влияние также тела, мигрировавшие из зоны питания планет-гигантов и из зоны астероидного пояса.

В разделе 3.2 статьи [59] обсуждались результаты моделирования **аккумуляции планет земной группы с учетом влияния планет-гигантов, полученные другими авторами**. Формирование и миграция планет-гигантов тесно связаны с аккумуляцией планет земной группы. Планетезимали из зоны питания планет-гигантов, приобретающие в ходе эволюции Солнечной системы орбиты с небольшими перигелийными расстояниями, возмущали орбиты планетезималей и зародышей планет в зоне питания планет земной группы, а также тел астероидного пояса и часто сталкивались с ними. Изменения орбит Юпитера и Сатурна вызывали изменения положений резонансов и способствовали очистке зоны астероидного пояса, из которого некоторые тела могли проникать в зону питания планет земной группы. Поэтому при изучении аккумуляции планет земной группы нужно учитывать влияние формирующихся планет-гигантов и тел из их зоны питания. Рассматривались различные сценарии такого влияния. Отмечалось, что спустя 3 млн лет газовый диск уменьшался по массе в 20 раз и не оказывал динамического влияния на миграцию планетезималей.

Рядом авторов при изучении формирования планет земной группы рассматривалась **«модель большого поворота»** (the Grand Tack model). В данной модели ранней динамической перестройки Солнечной системы Юпитер за счет взаимодействия с газом в диске сначала мигрировал к Солнцу до 1.5 а.е., а потом после формирования массивного Сатурна и рассеяния газа стал двигаться вместе с Сатурном обратно от Солнца, находясь в резонансе 2:3 с Сатурном. В результате этой миграции Юпитер «очистил» астероидный пояс, уменьшил количество материала в зоне питания Марса и способствовал доставке воды к формирующимся планетам земной группы. Например, предполагалось, что Юпитер и Сатурн приобрели достаточно большие массы газа за 600 тыс. лет, и в течение первых 100 тыс. лет они мигрировали внутрь Солнечной системы, соответственно, с 3.5 и 4.4 а.е. до 1.5 и 2 а.е., а после того как масса Сатурна увеличилась с $10m_E$ до его современной массы, Юпитер и Сатурн в течение 500 тыс. лет мигрировали от Солнца на расстояния, соответственно, до 5.25 и 7 а.е. В разделе 4 статьи [59] обсуждаются модели, рассматривающие последующие стадии аккумуляции планет-гигантов и миграцию зародышей Урана и Нептуна, включая **модель Ниццы**, (the Nice model), названную так по месту ее создания во французской обсерватории Ниццы. В модели Ниццы толчком к резким изменениям орбит этих зародышей считается попадание Юпитера и Сатурна в орбитальный резонанс 1:2.

Механизм миграции планет-гигантов позволяет объяснить ряд событий в ранней истории Солнечной системы, включая наличие многочисленных транснептуновых объектов, находящихся в резонансах с Нептуном, формирование пояса Койпера и облака Оорта и такой феномен, как предполагаемая поздняя тяжелая бомбардировка внутренней Солнечной системы (LHB), хотя сам этот гипотетический механизм не является общепринятым. Вместе с тем, он используется при оценках вклада экзогенного источника летучих в эволюцию планет земной группы. Предполагается, что доставка воды к Земле малыми телами произошла в основном после того, как эти планеты аккрецировали 60-80% своей конечной массы.

В рамках модели Ниццы изучалась эволюция орбит астероидов во время резкого изменения орбиты Юпитера, приведшего к резкому изменению положений резонансов. Вероятность столкновений астероидов с Луной была получена равной $4 \cdot 10^{-5}$, а с Землей была в 20 раз больше. Был сделан вывод, что модель Ниццы хорошо объясняет формирование Марса и астероидного пояса, если такая нестабильность произошла в течение 1-10 млн лет после диссипации газового диска. В последние годы формирование планет земной группы рассматривалось в основном исходя из упомянутых выше моделей Ниццы и «большого поворота». Первая модель исходит из гипотезы о резком изменении орбит планет-гигантов при попадании Юпитера и Сатурна в резонанс, а вторая предполагает наличие миграции Юпитера к орбите Марса и обратно. В [55] отмечалось, что особенности формирования планет земной группы и очистки астероидного пояса можно объяснить без привлечения указанных моделей, а исходя из относительно плавного уменьшения большой полуоси орбиты Юпитера и смещения положений резонансов за счет выброса Юпитером планетезималей на гиперболические орбиты. Такая модель рассматривает формирование зародышей Урана и Нептуна около орбиты Сатурна и миграцию этих зародышей под влиянием взаимодействия с планетезималями на современные орбиты Урана и Нептуна [11, 15, 78] (см. также следующий раздел).

В начале данного раздела приведены результаты, основанные на изучении эволюции дисков, первоначально состоявших из тел, объединяющихся при столкновениях. **Миграция планетезималей на последних стадиях формирования планет земной группы** рассматривалась Ипатовым в [55]. Были проведены расчеты миграции планетезималей внутри зоны питания планет земной группы, разделенной в зависимости от расстояния от Солнца на семь областей (0.3-0.5, 0.5-0.7, 0.7-0.9, 0.9-1.1, 1.1-1.3, 1.3-1.5, 1.5-2 а.е.). Гравитационное влияние всех планет учитывалось методом Булirша-Штера, при этом в [55] планетезимали и сами планеты рассматривались, как материальные точки, а их столкновения непосредственно не учитывались. В ряде вариантов модели вместо планет земной группы рассматривались их зародыши с массами от 0.1 до 0.3 масс современных планет. Полученные в расчетах массивы элементов орбит мигрировавших планетезималей с шагом в 500 лет использовались при вычислении вероятностей их столкновений с планетами, их зародышами и с Луной. Позднее расчеты, аналогичные [55], были проведены Ипатовым для модели, в которой планетезимали, столкнувшиеся с планетами, исключались из дальнейших расчетов (результаты этих расчетов пока еще не опубликованы в статье).

При изучении долей планетезималей из различных зон, вошедших в планеты (или в их зародыши), в [55] рассматривались более узкие, чем ранее, зоны, из которых приходили планетезимали, и изучалось изменение состава зародышей со временем, а не только конечный состав планет. Расчеты привели к выводу, что зародыши планет земной группы, массы которых были порядка одной десятой от масс современных планет или меньше, аккумулировали в основном планетезимали из окрестностей своих орбит. Внутренние слои планеты земной группы формировались в основном из вещества из окрестности орбиты данной планеты. При выпадении планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна на зародыши планет земной группы когда эти зародыши еще не приобрели массы современных планет, вещество (в том числе вода и летучие) из этой зоны могло попадать во внутренние слои планет земной группы и влиять на их состав.

При массах зародышей Земли и Венеры не менее трети их современных масс, вероятности выпадений планетезималей, сформировавшихся на расстоянии от 0.7 до 0.9 а.е. от Солнца, на эти зародыши отличались не более, чем вдвое на рассматриваемом интервале времени $T > 2$ млн лет. Исходя из рассмотренной модели было также найдено, что суммарная масса планетезималей, мигрировавших из каждой зоны, расположенной на расстоянии от 0.7 до 1.5 а.е. от Солнца, и столкнувшихся с почти сформировавшимися Землей и Венерой, отличалась для этих планет не более чем вдвое. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулировать одинаковый для этих планет материал из различных частей зоны питания планет земной группы. На конечных стадиях формирования планет планетезимали, первоначально находившиеся на расстоянии от 1.1 до 2.0 а.е. от Солнца, могли входить в состав Земли и Марса в отношении, не сильно отличавшемся от отношения масс этих планет.

В вариантах, в которых из расчетов исключались планетезимали, столкнувшиеся с планетами, время эволюции дисков планетезималей равнялось обычно нескольким сотням миллионов лет. Однако в некоторых вариантах расчетов с небольшими начальными эксцентриситетами отдельные планетезимали двигались в резонансах 1:1 с Землей или Венерой и через время, большее миллиарда лет. В этих вариантах расчетов при $e_0 = 0.05$ и $e_0 = 0.3$

рассмотренный интервал времени был больше, чем в [55], и доля тел, столкнувшихся с Солнцем, при современных массах и орбитах планет была в основном в диапазоне (0.24-0.4) для исходных значений a_0 больших полуосей орбит планетезималей между 0.5 и 1.1 а.е., и достигала 0.75 при $1.5 \leq a_0 \leq 2$ а.е. Доли планетезималей, столкнувшихся с Землей и Венерой при $a_0 \geq 0.7$ а.е., в вариантах расчетов с исключением планетезималей, столкнувшихся с планетами, также отличались не более, чем в два раза. При массах планет, составлявших не более половины масс современных планет, и интервале времени не большем 10 млн лет, столкновений планетезималей с Солнцем и их выброса на гиперболические орбиты в большинстве вариантов расчетов не было.

Как и в более ранних расчетах [3, 13, 15, 224] эволюции дисков тел методом сфер действия, доля планетезималей, выброшенных из зоны питания планет земной группы на гиперболические орбиты, не превышала 10%. В то же время вероятность столкновения с Юпитером планетезимали, первоначально находившейся в зоне питания планет земной группы, составляла не более нескольких процентов от вероятности ее столкновения с Землей, а вероятность столкновения с Сатурном была еще на порядок меньше.

Приведенные в [55] модельные оценки формирования зародышей планет земной группы основывались на модели, учитывающей совместное гравитационное влияние планет-гигантов и зародышей планет земной группы. Дополнительный учет взаимного гравитационного влияния планетезималей в зоне питания планет земной группы, а также планетезималей, приходивших из зон питания планет-гигантов, приводит к увеличению перемешивания вещества в зоне питания планет земной группы, повышению вероятности столкновений планетезималей с Солнцем и их выброса на гиперболические орбиты. При отношении масс зародышей Земли и Луны, равном 81 и аналогичном современному отношению, отношение вероятностей выпадений планетезималей на зародыши Земли и Луны в рассмотренных вариантах не превышало 54, причем было максимальным при массах зародышей примерно в три раза меньших современных масс этих небесных тел.

В рассмотренной в [55] модели, в которой тела объединялись с планетами при любых столкновениях, Земля и Венера могли приобрести значительную часть (более половины) своей массы за 5 млн лет. В частности, за это время большинство планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 1.1 а.е. от Солнца, выпадали на растущие Землю и Венеру. Учет выброса вещества при столкновениях тел с планетами может увеличить время аккумуляции планет. Суммарная масса планетезималей, мигрировавших из каждой части области, расположенной на расстоянии от 0.7 до 1.5 а.е. от Солнца, и столкнувшихся с почти сформировавшимися Землей и Венерой, отличалась для этих планет, вероятно, не более чем в два раза. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулировать одинаковый для этих планет материал из различных частей зоны питания планет земной группы. На конечных стадиях формирования планет земной группы планетезимали, первоначально находившиеся на расстоянии от 1.1 до 2.0 а.е. от Солнца, могли входить в состав Земли и Марса в отношении, не сильно отличавшемся от отношения масс этих планет.

6. Миграция тел при формировании планет-гигантов

В состав Юпитера и Сатурна входит большое количество газа. Считается, что когда масса зародыша Юпитера достигла нескольких масс Земли, то началась стадия быстрой аккреции газа, в ходе которой масса зародыша Юпитера увеличилась в несколько раз за время ~ 0.1 млн лет. В модели В.С. Сафронова общая масса планетезималей в зоне питания планет-гигантов превышала 100 масс Земли. В некоторых моделях время роста массы Юпитера от нуля до примерно современного значения составило около 2 млн лет. Расчеты эволюции безгазовых дисков из сотен гравитирующих твердых тел, объединяющихся при столкновениях, соответствующей аккумуляции в зоне планет-гигантов, проводились Ипатовым до начала 1990-ых гг. прошлого столетия [4, 9, 10, 11, 15, 78, 226, 227]. Рассмотренные начальные диски, включали в себя планетезимали и зародыши планет-гигантов (или сами планеты). Моделировалась также эволюция дисков без зародышей планет. Начальные эксцентриситеты орбит планетезималей обычно равнялись 0.02. Рассматривались плоская и пространственная модели.

Результаты эволюции **плоских дисков тел**, соответствующих зонам питания планет-гигантов, представлены в препринте [226] и более кратко в [4, 9]. Начальные диски соответствовали зоне питания одной или двух планет-гигантов. Чаще моделировалась эволюция диска, соответствующего зоне питания Урана и Нептуна (12-37 а.е.). Рассматривались также диски, состоявшие из нескольких дисков, соответствующих всем планетам. Для плоских дисков

первоначально одинаковых тел масса выброшенных тел не превышала одной трети от начальной массы диска тел, а средние эксцентриситеты орбит в ходе эволюции могли достигать 0.2-0.4. Среди образовавшихся зародышей планет были и тела с отрицательным осевым вращением.

Основные расчеты проводились для **пространственной модели**. Эволюция пространственного диска моделировалась путем редукции пространственной задачи к эволюции плоской модели условных тел (чтобы вероятности столкновений условных тел были примерно такими же, как и для пространственной задачи) [225]. При моделировании эволюции пространственных дисков без зародышей планет [4] и с зародышами планет [11, 15] было получено, что суммарная масса планетезималей, выброшенных на гиперболические орбиты, составляла около 80% от их суммарной начальной массы при рассмотрении только Юпитера и Сатурна и около 90% при рассмотрении всех четырех планет-гигантов. Остановимся подробнее на эволюции нескольких рассмотренных дисков.

В [4] при исследовании **эволюции пространственных дисков одинаковых тел**, объединяющихся при столкновениях, с общей массой от $32m_E$ до $200m_E$ отношение k_h суммарной массы тел, выброшенных на гиперболические орбиты, к суммарной массе тел, оставшихся на эллиптических орбитах, (в том числе и в составе планет) равнялось 2.5-8 для начальных дисков на расстоянии 3.4-12 а.е. от Солнца и 5-30 для начальных дисков на расстоянии 12-37 а.е. В [10] рассматривалось распределение выброшенных тел по эксцентриситетам их орбит. На рис. 5а работы [10] у значительной части выброшенных тел эксцентриситеты орбит $e < 1.1$, но у отдельных тел $e > 2$.

В варианте В3 монографии [78] и статьи [4] рассматривался случай, когда в начальный момент времени кроме диска одинаковых тел, разбитых на две группы, ($8 < a \leq 16$ а.е. и $16 < a \leq 32$ а.е.) с общей массой $M_0 = 150m_E$ (m_E – масса Земли) имелись также малые тела - "астероиды" ($2 < a \leq 4$ а.е.) и почти сформировавшиеся планеты земной группы, а также "Юпитер" и "Сатурн", причем большая полуось орбиты "Юпитера" была на 0.3 а.е. больше, а "Сатурна" - на 2.5 а.е. меньше современного значения. Динамика эволюции этого диска представлена на рис. 6.3 в [78] и на рис. 3-4 в [4]. В ходе эволюции средний эксцентриситет e_{av} орбит тел достигал 0.4. Небольшие тела были выметены из астероидного пояса, а отдельные массивные тела целиком пронизывали зону питания планет земной группы. При моделировании считалось, что в варианте В3 средние наклонения i_{av} (в радианах) в несколько раз меньше $e_{av}/2$. Однако даже при этом условии суммарная масса объектов, образовавшихся за орбитой Сатурна, равнялась всего $0.03M_0$, причем масса наибольшего объекта не превышала $3m_E$. Полученные результаты указывают на то, что формирование Урана и Нептуна в зонах питания этих планет только из одинаковых твердых тел - планетезималей требует большой (до 10^3m_E) массы твердых тел в этих зонах питания. В этом случае масса газопылевого облака в зонах питания Урана и Нептуна была бы не меньше 0.15 массы Солнца.

В ряде вариантов расчетов внутри орбиты Юпитера образовывались планеты, массы которых достигали нескольких масс Земли. Формирование таких планет вызвано тем, что в рассматриваемой модели не учитывались дробления сталкивавшихся тел при больших скоростях встреч. Некоторые тела, образовавшиеся при таких дроблениях, могли остаться в зоне планет земной группы и в зоне астероидного пояса, и таким образом их вещество могло попасть в состав планет земной группы и некоторых астероидов. Эксцентриситеты орбит тел, сталкивавшихся внутри орбиты Юпитера, как правило, превышали 0.5. Поэтому на самом деле никакого объединения таких тел при их столкновениях между собой обычно не должно было происходить. Те осколки сталкивавшихся тел, которые не пересекали орбиту Юпитера, постепенно выметались телами из зон питания планет-гигантов, мигрировавшими внутрь орбиты Юпитера. Сильные изменения орбит планет земной группы в рассмотренных вариантах расчетов связаны с тем, что при расчетах массы тел значительно превышали массы реальных планетезималей.

Идея о **формировании зародышей Урана и Нептуна около орбиты Сатурна** была впервые высказана В.Н. Жарковым и А.В. Козенко в 1990 г. (Письма в Астрон. ж., 1990, т. 16, с. 169-173). Изучая состав Урана и Нептуна, эти авторы пришли к выводу, что зародыши этих планет приобрели водородные оболочки массой около $(1-1.5)m_E$ в зонах роста Юпитера и Сатурна еще до диссипации газа из протопланетного диска.

Ипатов исследовал в [11, 15, 239] эволюцию ряда дисков, первоначально состоявших из почти сформировавшихся планет (кроме Урана и Нептуна), из зародышей Урана и Нептуна, а также из нескольких сотен одинаковых тел, для которых $8 < a \leq 32$ а.е. (рис. 1-2). Начальные значения больших полуосей орбит Юпитера и Сатурна брались равными 5.5 и 6.5 а.е.

соответственно. В основной серии расчетов начальные значения больших полуосей орбит зародышей Урана и Нептуна равнялись 8 и 10 а.е. соответственно. Суммарная масса M_0 начальных тел бралась в диапазоне от $135m_E$ до $180m_E$; начальные эксцентриситеты орбит планет $e_{pl}=0$, а начальные эксцентриситеты орбит тел и зародышей $e_0=0.02$. В рассматриваемой модели учитывались гравитационные взаимодействия и объединения тел не только с планетами или их зародышами, но и между собой. Гравитационные взаимодействия тел и планет учитывались методом сфер действия. При расчетах получено, что если орбита начального зародыша пересекала орбиту Сатурна, то вероятность того, что этот зародыш в конце эволюции оставался на эллиптической орбите, на порядок меньше вероятности его выброса на гиперболическую орбиту. Поэтому ниже речь будет идти о случае, когда перигелии начальных орбит зародышей Урана и Нептуна находились за орбитой Сатурна. Расчеты показали [11, 15, 239], что под влиянием планетезималей, мигрировавших из зон питания Урана и Нептуна к Юпитеру, почти сформировавшиеся Уран и Нептун могли мигрировать от орбиты Сатурна до их современных орбит за 10 млн лет, двигаясь все это время по слабо эксцентричным орбитам.

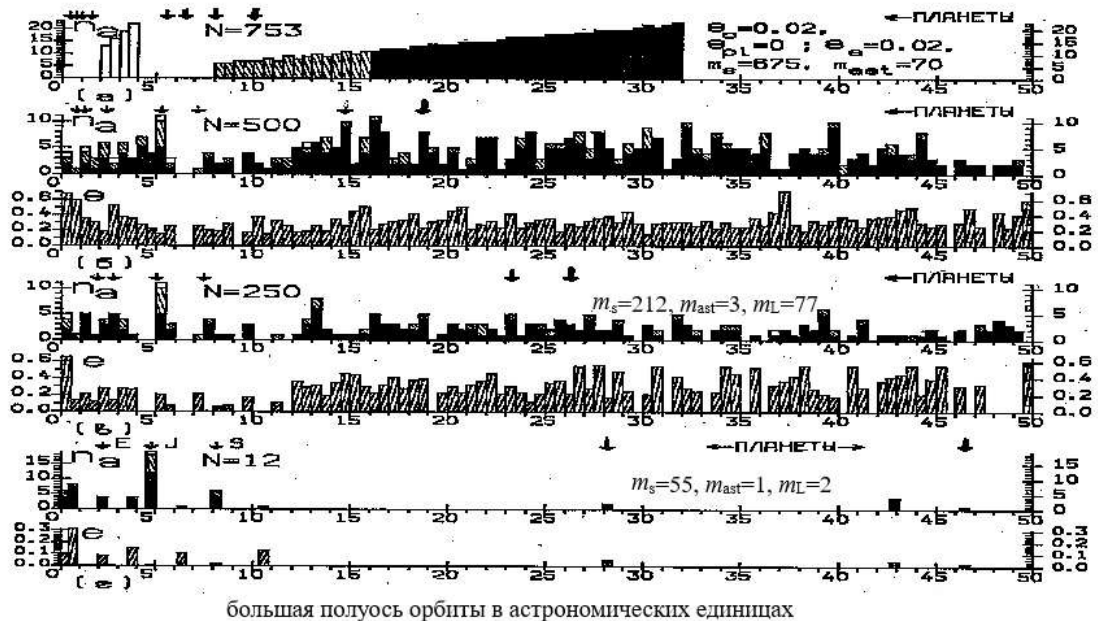


Рисунок 1. Гистограммы распределения числа тел n_a по большим полуосям a их орбит для начального диска, соответствующего зоне питания зародышей Урана и Нептуна, а также распределений масс и средних эксцентриситетов орбит тел по большим полуосям их орбит для нескольких этапов эволюции (при числе тел равном N). Диск первоначально состоял из зародышей всех восьми планет, 675 одинаковых тел общей массой равной $m_{so}=135m_E$ и из $m_{ast}=70$ “астероидов” (всего из 753 небесных объектов). Начальные эксцентриситеты орбит тел и зародышей Урана и Нептуна (с массами, равными $10m_E$) равны 0.02, а начальные орбиты остальных планет (с почти современными массами) круговые. Большие полуоси начальных орбит этих зародышей равны 8 и 10 а.е. Стрелочками указаны положения планет. Эволюция таких дисков описана в [15] и кратко представлена также на правых графиках рисунка 2.

Расчеты такой миграции Урана и Нептуна были опубликованы С.И. Ипатовым [11, 15, 239] в 1991-1993 гг. задолго до первых работ по упомянутой выше модели Ниццы, причем, в отличие от модели Ниццы, миграция зародышей Урана и Нептуна происходила без попадания планет-гигантов в резонансы, и общая начальная масса планетезималей в зонах питания Урана и Нептуна была больше. В рассмотренных вариантах она варьировалась от $135m_E$ до $180m_E$. В [15, 78] был сделан вывод о том, что для миграции зародышей Урана и Нептуна на современные орбиты было достаточно диска планетезималей с общей массой, равной $100m_E$. Эта масса меньше, если рассматривать большие (чем при расчетах) значения больших полуосей начальных орбит зародышей Урана и Нептуна (в расчетах они равнялись 8 и 10 а.е.). Основные изменения элементов орбит зародышей планет-гигантов происходили за время не более 10 млн лет, хотя отдельные тела могли выпадать на эти зародыши спустя миллиарды лет. Если большая часть

массы диска приходилась на небольшие тела, то времена миграции зародышей планет могли быть больше, чем при принятых в расчетах начальных значениях масс тел, равных $0.2m_E$.

Кроме расчетов миграции планет-гигантов, находившихся первоначально на круговых или почти круговых орбитах, был рассмотрен также случай больших (0.75-0.82) начальных эксцентриситетов орбит массивных ($10m_E$) зародышей Урана и Нептуна (вариант В4 в [78]; [11, 15]). В этой модели при взаимодействиях этих зародышей с планетезималями эксцентриситеты орбит зародышей уменьшались, и зародыши могли приобрести современные орбиты Урана и Нептуна, если начальные перигелии их орбит лежали за орбитой Сатурна, в то время как при меньших перигелийных расстояниях эти зародыши в большинстве случаев выбрасывались на гиперболические орбиты. Однако, приобретение зародышами Урана и Нептуна таких эксцентричных орбит с перигелиями, лежащими за орбитой Сатурна, маловероятно. В [11] на основе дополнительного исследования модели, при которой не учитывались гравитационные взаимодействия тел и планет, отмечалось, что вклад объединений в уменьшение первоначально больших эксцентриситетов орбит зародышей Урана и Нептуна значительно меньше вклада гравитационных взаимодействий этих зародышей с телами.

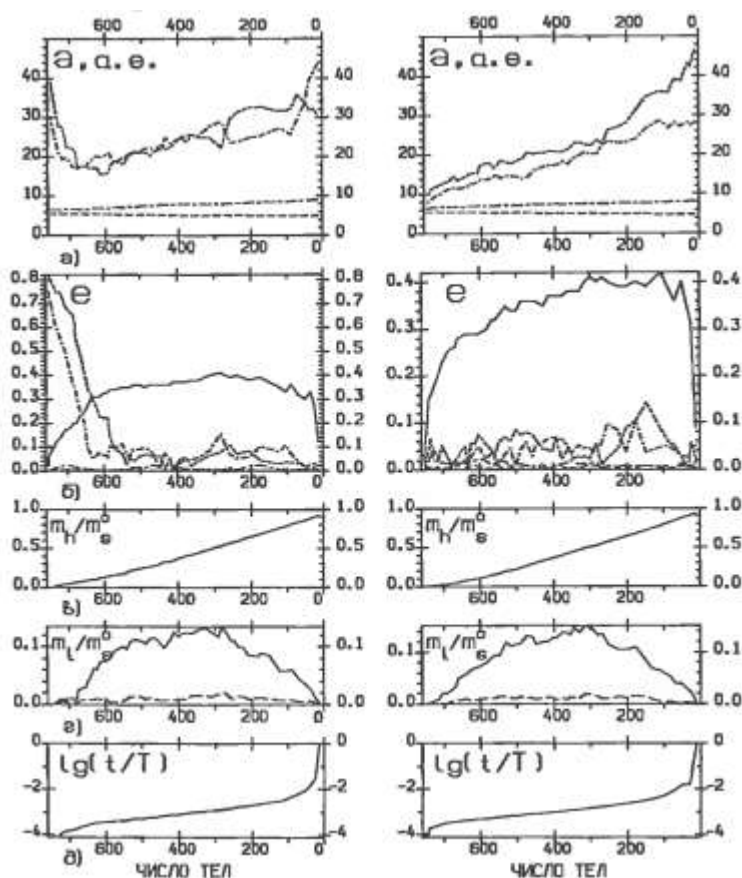


Рисунок 2. Зависимости больших полуосей (рис. а) и эксцентриситетов орбит зародышей планет-гигантов (пунктирные линии на рис. б), среднего эксцентриситета орбит тел (сплошная линия на рис. б), отношения суммарной массы тел, выброшенных на гиперболические орбиты, к их начальной суммарной массе (рис. в), отношения суммарной массы тел с большими полуосями орбит, большими 49.5 а.е., к их начальной суммарной массе (рис. г) и отношения текущего времени к общему времени эволюции диска (рис. д) в зависимости от числа тел в диске. (Согласно [15].)

Суммарная масса тел, проникавших за орбиту Нептуна, могла достигать десятков масс Земли. Тот факт, что Нептун имеет наименьший эксцентриситет среди планет-гигантов, может быть связан с тем, что массы наибольших планетезималей в его зоне питания были меньше, чем в зонах питания других планет-гигантов. Динамические времена жизни большинства планетезималей, находившихся внутри орбиты Нептуна, меньше 100 млн лет. Поэтому конец интенсивной бомбардировки Земли, происходивший 4.5-3.8 млрд лет назад, мог приходиться преимущественно на объекты, пришедшие с эксцентричных орбит, располагавшихся в основном

за орбитой Нептуна, или из зоны внешнего астероидного пояса. В [7] на основе анализа аналитических формул и результатов численных расчетов отмечалось, что для зоны Нептуна отдельные планетезимали, движущиеся по сильно наклоненным и сильно эксцентричным орбитам, могли сохраниться до настоящего времени.

Кратко коснемся вопроса относительно интенсивности роста планет-гигантов. При исследовании миграции планетезималей, первоначально находившихся на различных расстояниях от Солнца, Ипатовым были получены также оценки доли планетезималей, столкнувшихся с планетами-гигантами. В этих расчетах эволюция орбит планетезималей под влиянием планет моделировалась путем численного интегрирования уравнений движения. Вероятность столкновения планетезимали, первоначально находившейся за орбитой Юпитера, с Ураном или Нептуном не превышала 0.015, а в большинстве вариантов расчетов составляла не более нескольких тысячных. Поэтому при суммарной массе планетезималей за орбитой Сатурна, меньшей $200m_E$, массивные зародыши Урана и Нептуна, мигрировавшие из зоны в окрестности орбиты Сатурна на современные орбиты, увеличивали свои массы не более, чем на $2m_E$. При этом вероятность столкновения планетезимали с Юпитером в большинстве вариантов расчетов не превышала 0.05, а с Сатурном была в несколько раз меньше. Считается, что масса силикатной компоненты в Юпитере составляет $(15-20)m_E$, а масса твердотельной компоненты в составе Сатурна была больше, чем на Юпитере. Планетезимали в зонах питания Урана и Нептуна, наряду с силикатами, содержали также льды. Поэтому при суммарной массе планетезималей за орбитой Сатурна, меньшей $200m_E$, увеличение массы силикатной компоненты Юпитера за счет таких планетезималей, не превышало, вероятно, 10 масс Земли. Отсюда можно сделать вывод, что суммарная начальная масса планетезималей за орбитой Сатурна в пределах $200m_E$ не противоречит составу планет-гигантов. При отношении массы пыли, состоящей из каменистого вещества и льдов, к массе газа, равном 0.015, масса планетезималей, равная $200m_E$, соответствует массе вещества в диске, равной $0.04M_S$, при массе всего диска $0.06M_S$, где M_S – масса Солнца. Примерно те же значения массы протопланетного диска в пределах $(0.04-0.1)M_S$ были получены и в других исследованиях.

В вариантах В8-В9 монографии [78] (это также варианты на рис. 4-5 в [4]) рассматривалась эволюция пространственных дисков, первоначально состоявших из **восьми планет и 500 одинаковых тел в зонах Урана и Нептуна**. Массы Урана и Нептуна брались равными $14m_E$ и $16m_E$, а большие полуоси их орбит – 19 и 30 а.е. соответственно. Большие полуоси орбит и массы остальных планет равнялись их современным значениям. Начальные орбиты планет были круговыми. Плотность тел считалась равной 2 г/см^3 . Эта модель соответствует времени, когда все **планеты почти сформировались, но еще оставались планетезимали в зоне Урана и Нептуна**. В варианте В8 монографии [78] начальные эксцентриситеты орбит планетезималей равнялись $e_0=0.02$, а взаимное гравитационное влияние планет и тел учитывалось методом сфер действия. Как отмечалось в [4], в зонах Урана и Нептуна для безгазовой модели средний эксцентриситет орбит тел большую часть времени был порядка 0.3-0.4. Поэтому в варианте В9 монографии [78] начальные эксцентриситеты $e_0=0.35$, а остальные начальные данные были такими же как в варианте В8 этой же работы. В этом варианте взаимное гравитационное влияние тел не учитывалось. Суммарная начальная масса M_0 тел в вариантах В8-В9 монографии [78] равнялась $10m_E$.

При расчетах с начальными телами в зонах питания Урана и Нептуна большая полуось орбиты Юпитера a_J уменьшалась на $0.005M_0/m_E$ а.е., большая полуось орбиты Сатурна a_S увеличивалась на $(0.01-0.03)M_0/m_E$ а.е., а большие полуоси орбит Урана и Нептуна увеличились примерно на $(0.2-0.3)M_0/m_E$ а.е. В вариантах В8-В9 монографии [78] при $M_0=10m_E$ и массах начальных тел равных $0.02m_E$ или $0.1m_E$ эксцентриситеты орбит Меркурия и Марса достигали значений около 0.3. Реальные эксцентриситеты орбит этих планет равны 0.2 и 0.09. В действительности большинство тел из зон планет-гигантов имели меньшие массы, чем в этих вариантах расчетов, но общая масса тел в зонах питания планет-гигантов могла быть порядка $100m_E$. В принципе влияния тел из зон питания планет-гигантов, проникавших в зону планет земной группы, могло быть достаточным для того, чтобы Меркурий и Марс приобрели свои достаточно большие эксцентриситеты орбит.

Суммируя результаты исследований миграции тел в зонах питания планет-гигантов, отметим, что суммарная масса тел, выброшенных на гиперболические орбиты из зоны всех планет-гигантов, на порядок превышала массу твердого вещества, вошедшего в планеты. Эти результаты согласуются со значениями начальной массы протопланетного облака около 0.04-0.1

массы Солнца, принимаемыми многими авторами. Результаты численного моделирования аккумуляции планет указывают на то, что в ядро и оболочку Юпитера могло войти больше льдов и каменистого вещества, чем в любую другую планету. Суммарная масса тел из зон планет-гигантов, проникавших в зону астероидного пояса, могла достигать десятков масс Земли. Система планет-гигантов расширялась в ходе аккумуляции этих планет. Во всех проведенных расчетах эволюции дисков тел в зоне планет-гигантов с планетами [4, 10, 11, 15, 78], большая полуось орбиты Юпитера со временем уменьшалась, а большие полуоси орбит остальных планет-гигантов в основном увеличивались. Впервые в [11, 15] было получено, что зародыши Урана и Нептуна с начальными массами, равными нескольким массам Земли, могли мигрировать на современные орбиты этих планет из зоны, находившейся сразу за орбитой Сатурна, двигаясь все время по слабо эксцентричным орбитам. Большое количество воды могло быть доставлено на Землю во время аккумуляции Урана и Нептуна. Суммарная масса тел, проникавших за орбиту Нептуна, могла достигать десятков масс Земли.

Тела из зоны питания планет-гигантов влияли на аккумуляцию тел в зоне планет земной группы. Как показали численные исследования миграции планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна, основная масса этих планетезималей покинула эту зону за несколько миллионов лет. Это указывает на время влияния планетезималей, приходивших из зоны Юпитера и Сатурна, на формирование планет земной группы. Важно при этом подчеркнуть, что согласно проведенным расчетам в рамках модели, учитывающей взаимодействие всех планет Солнечной системы, (раздел 4.6 в [53]) максимальные времена эволюции орбит некоторых планетезималей, стартовавших из зоны Юпитера и Сатурна, могут быть гораздо больше, чем при аналогичных расчетах при отсутствии Урана и Нептуна (50 и 4 млн лет, соответственно). Однако и в данном случае основной вклад в столкновения с зародышами планет земной группы вносили планетезимали из зон питания Юпитера и Сатурна в первый миллион лет после формирования значительной массы Юпитера. Длительность этого формирования оценивается 1-2 млн лет от зарождения Солнечной системы. Между тем, отдельные планетезимали из зон питания Урана и Нептуна выпадали на Землю и через сотни миллионов лет и даже могли остаться в Солнечной системе до настоящего времени. При выпадении планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна на зародыши планет земной группы, а также из зоны внешнего астероидного пояса в модели «большого поворота», эти зародыши еще не приобрели современных масс планет, и материал (в том числе вода и летучие) из этих зон мог аккумулироваться во внутренних слоях формирующихся планет земной группы и Луны.

7. Формирование астероидного и транснептунового поясов

Тела из зоны планет-гигантов оказали большое влияние на формирование астероидного и транснептунового поясов. Эксцентриситеты и большие полуоси орбит астероидов представлены на рис. 1. На очистку астероидного пояса оказывало гравитационное влияние тел, проникавших в этот пояс из зоны планет-гигантов, и столкновения астероидов с этими телами. При изменении больших полуосей орбит Юпитера и Сатурна менялись положения орбитальных и вековых (ν_5 , ν_6 , ν_{15} и ν_{16}) резонансов с Юпитером и Сатурном, при которых могли сильно возрасти эксцентриситеты орбит планетезималей. В [8, 14] было, например, показано, что границы люка Кирквуда 5:2 совпадают с границами области начальных значений больших полуосей и эксцентриситетов орбит астероидов, при которых в ходе эволюции достигается орбита Марса и тела могут покидать люк. В модели «большого поворота» Юпитер вообще пересекал весь астероидный пояс. Считалось, что за миллиард лет астероидный пояс очистился более, чем на 99%.

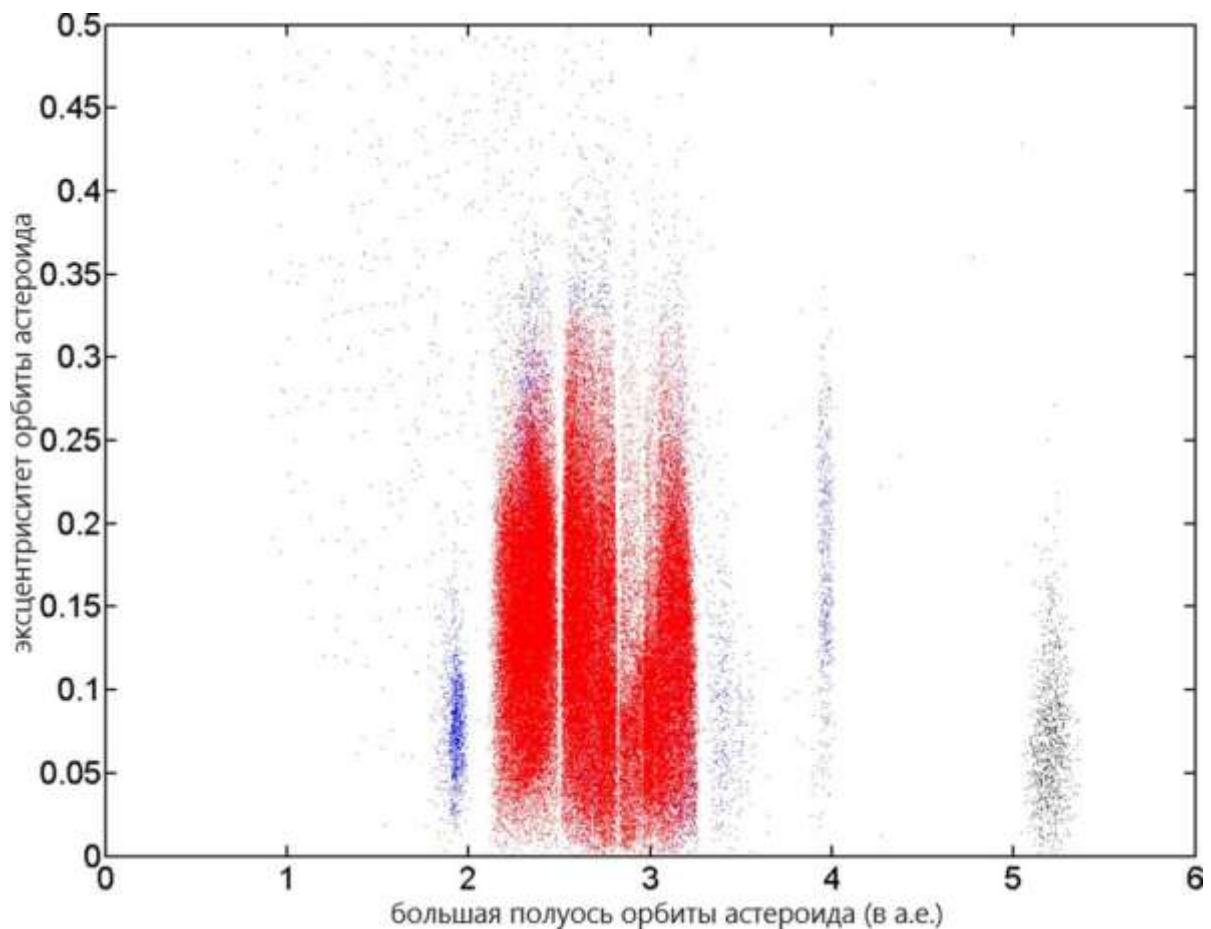


Рисунок 1. Эксцентриситеты и большие полуоси орбит астероидов.

В [15] (рис. 8) и [78] (вариант В7 на рис. 6.8) приведены результаты моделирования эволюции диска, первоначально состоявшего из планет земной группы, Юпитера, Сатурна, 250 планетезималей с общей массой $M_0 \sim 10m_E$ и большими полуосями начальных орбит от 5 до 10 а.е., а также из 250 «астероидов» с большими полуосями начальных орбит от 2 до 4 а.е. Начальные эксцентриситеты орбит планетезималей и астероидов равнялись 0.02, а начальные орбиты планет были круговыми. Учитывалось гравитационное влияние планет и планетезималей. Такая модель характеризует **влияние тел из зон питания Юпитера и Сатурна на формирование астероидного пояса**. В этих расчетах большие полуоси орбит Юпитера a_j и Сатурна a_s уменьшались, соответственно, на $0.005M_0/m_E$ и $0.01M_0/m_E$ а.е. Отметим, что при рассмотрении тел в зонах питания Урана и Нептуна большая полуось орбиты Сатурна, наоборот, увеличивалась, так как Сатурн переводил много таких тел ближе к Солнцу. В ходе эволюции «астероиды» были выметены из астероидного пояса. На Юпитер, Венеру и Землю выпали соответственно 8%, 5% и 2.5% астероидов.

В варианте, представленном на рис. 6.3 монографии [78], первоначально рассматривались Юпитер, Сатурн и планеты земной группы, а также 750 гравитирующих тел (общей массой в $150m_E$) с большими полуосями орбит от 8 до 32 а.е. и 100 астероидов. В ходе эволюции число астероидов уменьшилось примерно в 4 раза при уменьшении числа тел на 20%. Такая большая разница связана с тем, что за это время орбиты многих рассматриваемых тел еще не успели приобрести эксцентриситеты, близкие к 1, а часть из этих тел уже успела попасть в зону астероидного пояса, где эволюция шла быстрее из-за близости к Солнцу и меньших орбитальных периодов.

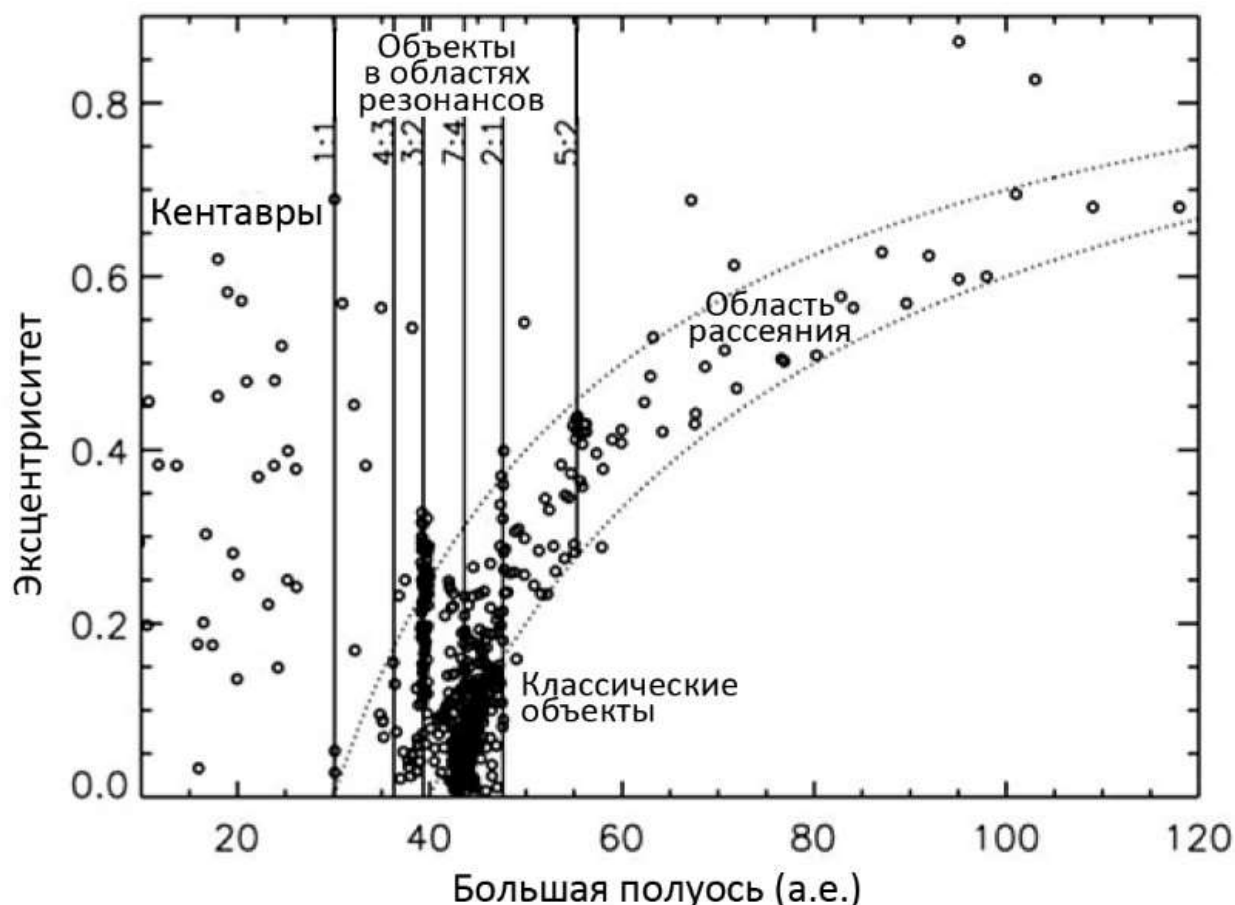


Рисунок 2. Большие полуоси и эксцентриситеты орбит транснептуновых объектов (Источник: Scott Sheppard, Carnegie Institution for Science.)

Считается, что некоторые **тела транснептунового пояса** сформировались непосредственно в этой зоне, а часть тел пришла из зоны планет-гигантов при формировании этих планет. В 1987 г. в статье [4] за 5 лет до открытия в 1992 г. первого (после Плутона) транснептунового объекта, основываясь на результатах расчетов формирования планет-гигантов, С.И. Ипатов предположил, что кроме транснептуновых объектов, сформировавшихся дальше 30 а.е. от Солнца и движущихся по слабо эксцентричным орбитам, в этой зоне по сильно эксцентричным орбитам движутся объекты, сформировавшиеся в зоне планет-гигантов. Эти объекты сейчас называют «объектами рассеянного диска» (рис. 2). В настоящее время обнаружены транснептуновые объекты (ТНО), движущиеся по сильно эксцентричным орбитам с перигелийными расстояниями q , превышающими 40 а.е., ("extended scattered disk" objects), в то время как типичные объекты рассеянного диска (scattered disk objects. SDOs) имеют перигелийные расстояния $q \sim 35-38$ а.е. Многие такие ТНО с большими q могли быть бывшими планетезималей из зоны питания планет-гигантов.

В ходе аккумуляции планет-гигантов суммарная масса планетезималей, стартовавших из зоны питания этих планет и какое-то время двигавшихся за орбитой Нептуна, равнялась десяткам масс Земли. Эти планетезимали увеличивали эксцентриситеты орбит локальных транснептуновых объектов (ТНО), суммарная начальная масса которых могла превышать $10m_E$, и выметать большинство таких тел из этой зоны. Небольшая часть этих планетезималей могла остаться за орбитой Нептуна на сильно эксцентричных орбитах. Такой механизм формирования ТНО на сильно эксцентричных орбитах и формирование "местных" ТНО на слабо эксцентричных орбитах из вещества, находившегося за орбитой Нептуна [4], а также первые оценки гравитационных взаимодействий ТНО [5, 221] рассматривались Ипатовым в 1980-1988 гг. Было показано, что за последние 4 млрд лет несколько процентов ТНО могли изменить свои большие полуоси a более, чем на 1 а.е., вследствие гравитационных взаимодействий с другими ТНО. Заметим, что даже малые изменения элементов орбит ТНО, происходящие вследствие их взаимного гравитационного влияния и столкновений, могут приводить к большим изменениям элементов орбит ТНО под гравитационным влиянием планет [25].

На некоторых этапах эволюции рассмотренных дисков тел, соответствующих зоне планет-гигантов, (при числе оставшихся тел $N \approx 300-400$, составлявших около трети-половины от числа начальных тел) суммарная масса тел с большими полуосями $a > 50$ а.е. превышала $0.1 M_{\odot}$, а в конце эволюции была значительно меньше. Перигелии орбит многих из этих тел лежали около орбиты Нептуна, а средние эксцентриситеты их орбит были близки к 0.6. Эти тела наряду с телами, сформировавшимися за орбитой Нептуна, участвовали в формировании транснептунового пояса.

Так как часть тел транснептунового пояса может мигрировать внутрь Солнечной системы, то в [78] отмечалось, что благодаря механизму обмена момента количества движения с такими телами некоторые крупные тела транснептунового пояса могли увеличить большие полуоси своих орбит и переместиться из внутренней части пояса в его среднюю часть.

Транснептуновые объекты с диаметром $d \geq 100$ км, движущиеся по не сильно эксцентричным орбитам, могли сформироваться при сжатии больших разреженных пылевых сгущений (с $a > 30$ а.е.), а не путем аккреции меньших планетезималей. Для твердотельной аккумуляции транснептуновых объектов из небольших планетезималей необходимо, чтобы аккумуляция шла при малых (~ 0.001) эксцентриситетах орбит и массивном поясе (десятки масс Земли). По моим расчетам [22, 26], из-за гравитационного влияния формирующихся планет-гигантов, транснептуновых объектов (ТНО) и мигрирующих планетезималей такие небольшие эксцентриситеты не могли существовать в течение времени, необходимого для твердотельной аккумуляции транснептуновых объектов с диаметром $d > 100$ км. Вероятно, некоторые планетезимали с диаметром $d \sim 100-1000$ в зоне питания планет-гигантов и даже некоторые крупные астероиды главного пояса также могли образоваться непосредственно за счет сжатия разреженных пылевых сгущений. Некоторые более мелкие объекты (ТНО, планетезимали, астероиды) могли быть обломками более крупных объектов, а другие подобные объекты могли образоваться в результате сжатия сгущений.

Популяция транснептуновых тел диаметром $d > 100$ км, вероятно, существенно не изменилась из-за взаимодействий этих тел за время существования Солнечной системы, так как катастрофические столкновения крупных тел с $d \sim 100-150$ км маловероятны. Тело массой в ~ 100 раз меньшей, чем 100-км объект, не способно его разрушить, но может изменить его орбитальную скорость на несколько м/с и большую полуось на $\sim 0.2\%$ (~ 0.1 а.е.). Такие события могут быть, вообще говоря, достаточно частыми, чтобы обеспечить некоторый поток тел размером с Хирон. При этом большие полуоси орбит осколков, образующихся при столкновении, могут отличаться на 0.1-1 а.е. от больших полуосей орбит родительских тел.

В [22, 25, 266, 267, 269, 274, 275, 278-285, 289-291, 293-295, 299, 300, 301, 302] и в параграфах 4-5 главы 7 в [78] исследовались **изменения элементов орбит тел транснептунового пояса** под влиянием планет-гигантов при различных начальных эксцентриситетах и наклонениях орбит. Эволюция орбит этих тел изучалась также после того, как они стали пересекать орбиту Нептуна. Начальные значения больших полуосей орбит ТНО варьировались от 35 до 50 а.е.

При моделировании эволюции орбит ТНО при резонансе 2:3 с движением Нептуна (в России ранее писали "резонанс 3:2") в [25] и в параграфе 5 главы 7 в [78] рассматривались различные типы изменений элементов орбит ТНО. Была изучена эволюция орбит около ста ТНО. Обычно рассматриваемый интервал времени равнялся 20 млн. лет, но иногда достигал 100-150 млн. лет. Для многих таких вариантов расчетов исходное значение большой полуоси орбиты ТНО $a_0 = 39.3$ а.е. При таком a_0 в ходе эволюции всегда достигалось резонансное значение a (39.5 а.е.). Были рассмотрены различные типы взаимосвязей изменений разности значений долготы восходящего узла для ТНО и Нептуна и аргумента перигелия ТНО. При интегрировании в прошлое эволюции орбит, близких к орбите объекта P/1996 R2, пересекавшей орбиту Юпитера, в ряде вариантов расчетов [21] было получено, что ранее большие полуоси орбит таких объектов превышали 30 а.е. (рис. 7.6а-б в [78]), то есть этот объект пришел из зоны транснептунового пояса.

На основе простых формул и результатов численных расчетов проводились оценки ([22, 27, 89, 143, 144], параграф 5 главы 7 в монографии [78]) числа тел, мигрировавших из транснептунового пояса к орбитам Юпитера и Земли. Отмечалось, что около 6% тел, пересекавших орбиту Нептуна, могли достигнуть орбиты Земли. Если считать число ТНО с диаметром $d > 1$ км и большими полуосями отбит от 30 до 50 а.е. равным 10^{10} , то по нашим оценкам [22, 78] около 30000 бывших ТНО с диаметром $d > 1$ км движутся по орбитам, пересекающим орбиту Юпитера, причем около 170 из них пересекают также орбиту Земли. Таким образом, считалось, что около 20% объектов, пересекающих орбиту Земли, (ОПОЗ) могут приходиться на бывшие ТНО, пересекающие одновременно орбиты Земли и Юпитера. Возможно, что еще

большее число объектов, пришедших из-за орбиты Нептуна, двигаются по орбитам, пересекающим орбиту Земли и целиком лежащих внутри орбиты Юпитера. Перигелии или афелии орбит тел, сталкивающихся с Землей, в основном лежат около орбиты Земли.

В 1980 г. в препринте [221] отмечалось, что пределы изменений больших полуосей и эксцентриситетов орбит гравитационно взаимодействующих тел с массами Плутона для трех или четырех тел могут быть в несколько раз больше, чем для двух таких тел, движущихся вокруг Солнца. Изменения больших полуосей орбит ТНО в этом случае могли составлять несколько астрономических единиц [5, 221]. Эти результаты свидетельствуют в пользу гипотезы Т.М. Эннеева о том, что ранее большая полуось орбиты Плутона была больше современного значения и она уменьшилась при гравитационных взаимодействиях Плутона с крупными телами транснептунового пояса. Отмечалось также, что, два тела одинаковых масс могут обмениваться значениями больших полуосей орбит при тесных сближениях. Некоторые транснептуновые объекты могли мигрировать из середины пояса в его внутреннюю часть. Причем некоторые из этих тел могли переходить на орбиты, эксцентриситеты которых со временем значительно возрастали под влиянием планет-гигантов, и такие тела могли мигрировать внутрь Солнечной системы.

8. Формирование двойных транснептуновых объектов

Известно, что доля малых тел со спутниками составляет 0.1 среди астероидов главного пояса, 0.15 для астероидов, сближающихся с Землей, около 0.3 для классических транснептуновых объектов и 0.1 для остальных транснептуновых объектов. В статье [51] показано, что угловые скорости сгущений, использовавшиеся в расчетах (Nesvorný и др., *Astron. J.*, 2010, v. 140, pp. 785–793) в качестве исходных данных при моделировании сжатия разреженных сгущений (состоявших из пыли и/или объектов с диаметром, меньшим 1 м), приводящего к формированию транснептуновых спутниковых систем, могли быть получены при столкновениях сгущений, радиусы которых сопоставимы с их радиусами Хилла. Гелиоцентрические орбиты столкнувшихся сгущений могли быть близки к круговым. Модель формирования спутниковой системы, рассматривающая столкновение двух сгущений, соответствует наблюдениям, согласно которым около 40% двойных объектов, обнаруженных в транснептуновом поясе, имеют отрицательный угловой момент относительно их центров масс [52]. Отношение тангенциальной составляющей скорости столкновения сгущений к параболической скорости на поверхности сгущения обратно пропорционально расстоянию от Солнца и обратно пропорционально кубическому корню из массы сгущения. Поэтому объединение сгущений-препланетезималей более вероятно для более массивных сгущений и для сгущений, находившихся на большем расстоянии от Солнца (в частности, больше для сгущений в зоне транснептунового пояса, чем в зоне астероидного пояса) [39, 51].

9. Формирование системы Земля-Луна

Разными учеными были предложены различные модели происхождения Луны, но вплоть до настоящего времени этот вопрос окончательно не решен. Мы коснемся здесь нескольких наиболее значимых вариантов (более подробный обзор приведен в [54, 59, 82]). Теория коаккреции рассматривала образование Луны из околоземного роя малых тел. Основным источником роя, согласно модели Шмидта-Рускол-Сафронова, считался захват частиц допланетного диска при столкновениях («свободной со свободной» и «свободной со связанной»). Большую популярность получила предложенная рядом авторов **модель мегаимпакта**. Предполагается, что Луна образовалась в результате катастрофического столкновения на стадии формирования с телом размером с Марс (получившим название Тейя), что привело к выбросу при ударе расплавленной силикатной мантии Земли на близкую околоземную орбиту. Из объединившихся фрагментов выброса образовалась протолуна, постепенно удалившаяся на современную орбиту вследствие приливного взаимодействия с Землей в процессе эволюции. Привлекательность данной гипотезы заключалась прежде всего в объяснении средней плотности Луны, равной плотности земной мантии. Было предложено несколько модификаций модели мегаимпакта.

Каноническая модель мегаимпакта сталкивается с определенными трудностями, прежде всего, геохимического характера, и в настоящее время подвергается серьезной критике. Она не позволяет объяснить близкий изотопный состав целого ряда элементов Земли и Луны, в первую очередь, изотопов кислорода, железа, водорода, кремния, магния, титана, калия, вольфрама, хрома. Трудно допустить, что образовавшее Луну тело даже из сравнительно близкой окрестности

формирующихся планет земной группы имело состав, аналогичный Земле, поскольку в данной модели большая часть вещества Луны образуется из вещества ударника, а не протоземли. Эти результаты лишают модель мегаимпакта геохимического обоснования. Помимо этого, гипотеза мегаимпакта не позволяет объяснить отсутствие изотопных сдвигов в лунном и земном веществе, так как выброшенный при гигантском ударе материал должен состоять на 80-90% из пара, а при испарении расплава изотопные составы K, Mg, Si должны заметно изменяться. Гипотеза гигантского удара предполагает, что после столкновения на поверхности планеты образуется океан магмы. Однако связь с этим событием древнего магматического океана на Земле подвергается сомнению.

Альтернативой модели мегаимпакта служат **мультиимпактная модель** и модель формирования зародышей Земли и Луны из единого первоначального газопылевого разреженного сгущения в протопланетном диске, с последующим образованием и сжатием двух фрагментов. В основе мультиимпактной модели лежит гипотеза о многократных столкновениях планетезималей с зародышем Земли. В отличие от модели мегаимпакта ударников несколько и масса каждого из них меньше. **Модель формирования зародышей Земли и Луны из единого первоначального газопылевого разреженного сгущения** в протопланетном диске, с последующим образованием и сжатием двух фрагментов помимо удовлетворения геохимическим ограничениям, позволяет также объяснить известные различия в химическом составе Луны и Земли, в том числе дефицит железа, обеднение летучими и обогащение тугоплавкими окислами Al, Ca, Ti вещества Луны по сравнению с Землей. В модели Э.М. Галимова формирование ядер Земли и Луны из сгущения началось не раньше 50 млн лет от возникновения Солнечной системы, датируемого по CAI (кальций-алюминиевые включения, изучение которых позволяет определить возраст Солнечной системы). Модель Галимова и др. также не свободна от недостатков, ее критика приведена Ипатовым в [54]. В частности, в этой модели не указано куда делось 95% обедненного железом вещества из внутренней части сгущения до того момента, когда зародыши стали расти за счет вещества его внешней части. При нулевых (относительно центра сгущения) скоростях частицы сгущения очень быстро (время свободного падения равно 25 годам), выпали бы в центр сгущения, прежде чем сформировались зародыши в его внутренней горячей части, где только испарение частиц занимало десятки тысяч лет. Поэтому существование сгущения, породившего Землю и Луну, в течение 50 млн лет представляется нам маловероятным, что подкрепляет обзор публикаций по временам жизни сгущений, приведенный в разделе 2.3 статьи [59]. Как отмечалось выше при изучении формирования Земли, основное время формирования Земли, вероятно не превышало 5 млн лет.

В отличие от модели Галимова и др., в которой масса исходного сгущения равнялась суммарной массе Земли и Луны, в модели Ипатова [54, 82] зародыши Земли и Луны сформировались из общего разреженного сгущения с массой порядка $(0.01-0.1)m_E$ и угловым моментом, достаточным для формирования зародыша Луны. Угловой момент родительского сгущения, необходимый для формирования зародышей Земли и Луны, мог быть в основном приобретен при столкновении двух разреженных сгущений, при котором образовалось родительское сгущение. Момент количества движения системы Земля-Луна мог быть приобретен при столкновении двух сгущений (двигавшихся до столкновения по круговым гелиоцентрическим орбитам) общей массой не меньше массы Марса [54]. С учетом последующего роста масс зародышей Земли и Луны для достижения современного момента количества движения системы Земля-Луна суммарная масса зародышей, образовавшихся при сжатии родительского сгущения, могла не превышать 0.01 массы Земли. Рост зародышей Земли и Луны рассматривался в рамках мультиимпактной модели. Большая часть вещества, вошедшего в зародыш Луны, была выброшена с Земли при многочисленных столкновениях с ней планетезималей и тел меньшего размера. Спутниками обладают и некоторые малые тела. Аналогичный модели механизм был предложен Ипатовым для модели формирования транснептуновых спутниковых систем [51-52].

Вообще говоря, угловой момент сгущения, необходимый для образования системы Земля-Луна, мог быть получен путем аккумуляции только малых объектов сгущением с конечной массой $m_f > 0.15m_E$. Однако более вероятно, что основной вклад в угловой момент родительского сгущения внесло столкновение двух крупных сгущений. В противном случае Венера и Марс могли бы также сформироваться с большими спутниками (чего на самом деле нет), если бы их родительские сгущения получили достаточные угловые моменты. Вероятно, в отличие от Земли, сгущения, образовавшие при сжатии зародыши других планет земной группы, не сталкивались на этой стадии с массивными сгущениями. Если такой сценарий справедлив, то сгущение, породившее

зародыш Марса, не обладало большим угловым моментом и при его сжатии могли образоваться только небольшие спутники Фобос и Деймос, хотя возможен другой механизм их появления. Угловые моменты сгущений, породивших зародыши Меркурия и Венеры, были недостаточны даже для формирования малых спутников.

При росте первоначально обедненных железом зародышей Земли и Луны только за счет аккумуляции ими планетезималей для объяснения небольшой доли железа в Луне нужно, чтобы масса зародыша Луны увеличилась бы не более чем в 1.3 раза. Масса зародыша Земли при таком росте зародыша Луны выросла бы не более чем в 3 раза за счет аккумуляции планетезималей в безгазовой среде. При этом Земля не получила бы современного содержания железа. При росте зародышей только путем аккумуляции твердых планетезималей (без выброса вещества с зародышей) проблематично получить современное содержание железа в Земле и Луне при любых значениях исходного содержания железа в начальных зародышах. Для того чтобы получить современное содержание железа в Земле и Луне при какой-либо доле железа в исходных зародышах, прирост dm массы зародыша должен быть пропорционален m^p , где $p > 2$. При движении твердых тел в безгазовой среде p не превышает $4/3$. Для объяснения современной доли железа в Луне доля вещества, выброшенного из мантии зародыша Земли и выпавшего на зародыш Луны, должна была на порядок превышать сумму общей массы планетезималей, выпавших непосредственно на зародыш Луны, и начальной массы зародыша Луны, образовавшегося из родительского сгущения, если начальный зародыш содержал такую же долю железа, что и планетезимали. Большая часть вещества, вошедшего в зародыш Луны, могла быть выброшена с Земли при многочисленных столкновениях планетезималей (и меньших тел) с Землей.

В проблеме происхождения системы Земля-Луна принципиально важным является вопрос о причине различия в составе вещества этих тел железа и роли в таком различии процессов миграции. Допуская, что доля железа в исходном зародыше Луны и в планетезималах, составляла 0.33, а доля железа в коре Земли и в Луне по современным данным равна, соответственно, 0.05 и 0.08, и используя соотношение $0.05k_E + 0.33(1 - k_E) = 0.08$, можно оценить долю k_E вещества земной коры в Луне величиной ~ 0.9 . Поэтому для объяснения такого содержания железа в Луне следует полагать, что доля вещества, выброшенного с зародыша Земли и выпавшего на зародыш Луны, должна была почти на порядок превышать сумму общей массы планетезималей, выпавших непосредственно на зародыш Луны и начальной массы зародыша Луны, образовавшегося из родительского сгущения, при условии, что этот лунный зародыш содержал такую же долю железа, что и планетезимали. Как видим, оценка доли вещества земной коры в Луне тем меньше, чем больше был обеднен железом зародыш Луны, образовавшийся при сжатии сгущения, и чем больше была его масса. Как уже отмечалось, большая часть вещества, вошедшего в зародыш Луны, могла быть выброшена с Земли при многочисленных столкновениях планетезималей и других тел с Землей.

Следует подчеркнуть, что объекты, выброшенные с зародыша Земли при его столкновениях с другими объектами, имели больше шансов войти в состав крупного зародыша Луны, чем объединиться с аналогичными объектами малой массы. Это способствовало образованию и росту более крупного спутника Земли, чем в случае его аккумуляции только из вещества, выброшенного с Земли. Наличие спутника Земли, образовавшегося при сжатии сгущения, может объяснить отсутствие спутника у Венеры. На Венеру, как и на Землю, выпадали различные планетезимали с примерно одинаковым для обеих планет распределением по массам и скоростям. При этих столкновениях с поверхности Венеры также выбрасывалось вещество, но никакого спутника из этого вещества не образовалось.

Указанный подход [54], согласно которому исходные зародыши Луны и Земли могли образоваться из общего родительского сгущения, существенно отличается от работ по классической модели мультиимпактов, в которых рассматривалось формирование и рост зародыша Луны в основном за счет вещества земной коры, выброшенного с зародыша Земли при его многочисленных столкновениях с телами протопланетного диска. Основное отличие от них модели Ипатова [54] состоит в том, что исходный зародыш Луны образовывался не из вещества, выброшенного с зародыша Земли, а из того же сгущения, что и зародыш Земли, а дальнейший рост зародышей Земли и Луны, образовавшихся при сжатии родительского сгущения, был аналогичным мультиимпактной модели. Вещество, вошедшее в зародыш Луны, могло выбрасываться с Земли при многочисленных столкновениях планетезималей и других тел меньшего размера с Землей, а не только при небольшом числе крупных столкновений.

Предложенные Ипатовым модели образования спутниковых систем налагают некоторые ограничения на времена существования разреженных сгущений. Для круговых гелиоцентрических орбит, разность больших полуосей a которых равна радиусу r_{Ho} сферы Хилла, отношение периодов движения двух сгущений вокруг Солнца составляет около $1+1.5r_{Ha}$, где $r_{Ha}=r_{Ho}/a$. В этом случае угол с вершиной в Солнце между направлениями на два сгущения изменяется на $2\pi \cdot 1.5 \cdot r_{Ha} \cdot n_r$ радиан за n_r оборотов сгущений вокруг Солнца. Предположим, что рассматриваемое столкновение сгущений происходит, когда большие полуоси их орбит различаются на r_{Ho} , а начальный угол с вершиной в Солнце между направлениями на сгущения равен π радиан. Тогда столкновение произойдет примерно через $(3r_{Ha})^{-1}$ оборотов. При массе, равной $0.01m_E$, соответствующее время между столкновениями примерно равно $10^{8/3}/3 \approx 155$ оборотам. То есть столкновение сгущений, породивших родительское сгущение зародышей системы Земля-Луна, могло произойти за время порядка 100 лет после их образования. Аналогичные оценки [59] показали, что для объяснения доли образовавшихся спутниковых систем транснептуновых объектов время жизни сгущений, породивших эти объекты, должно быть порядка 10^3 оборотов вокруг Солнца. Другими словами, время жизни сгущения в этой зоне Солнечной системы не превышало сотен тысяч лет.

В статье [Da Wang et al., 2025, Nature Geoscience, <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01811-3>] показано, что доля Калия-40 в целом на Земле больше, чем в протоЗемле (в глубинных районах мантии Земли), и меньше, чем в метеоритах. В этой работе такая разница объясняется моделью мега-импакта. Однако, по-моему, эти исследования Калия-40 хорошо согласуются с обычной моделью роста Земли (без мегаимпакта), когда со временем в ее состав входили тела, зародившиеся на все большем расстоянии от орбиты Земли (чем с большего расстояния от Солнца приходили к Земле тела, тем больше в них было Калия-40).

Рост Луны за счет тел, выброшенных с Земли, обсуждался в [63]. Была изучена эволюция орбит тел, выброшенных с Земли на стадии ее аккумуляции и ранней эволюции при ударах крупных планетезималей. В рассмотренных вариантах расчетов движения тел, выброшенных с Земли, большая часть тел покидала сферу Хилла Земли и двигалась по гелиоцентрическим орбитам. Их динамическое время жизни достигало нескольких сотен миллионов лет. При более высоких скоростях выброса v_{ej} вероятности столкновений тел с Землей и Луной в основном были ниже. Вероятность столкновения выброшенного с Земли тела с Луной, движущейся по ее современной орбите, была примерно в 15–35 раз меньше, чем с Землей при скорости выброса $v_{ej} \geq 11.5$ км/с. Вероятность столкновения таких тел с Луной составляла в основном около 0.004–0.008 при скоростях выброса не менее 14 км/с и около 0.006–0.01 при $v_{ej}=12$ км/с. Она была больше при меньших скоростях выброса и была в диапазоне 0.01–0.02 при $v_{ej}=11.3$ км/с. На Луне может находиться вещество, выброшенное с Земли при аккумуляции Земли и при поздней тяжелой бомбардировке. При этом, как получено в расчетах, тел, выброшенных с Земли и упавших на зародыш Луны, было бы недостаточно для того, чтобы Луна выросла до своей современной массы из маленького зародыша, двигавшегося по современной орбите Луны. Этот результат свидетельствует в пользу образования лунного зародыша и дальнейшего его роста до большей части современной массы Луны вблизи Земли. Кажется более вероятным, что первоначальный зародыш Луны с массой не более 0.1 от массы Луны образовался одновременно с зародышем Земли из общего разреженного сгущения. Для более эффективного роста зародыша Луны желательно, чтобы при некоторых соударениях тел-ударников с Землей выброшенные тела не просто вылетали из кратера, а часть вещества выходила на орбиты вокруг Земли, как в модели мультиимпактов. Средние скорости столкновений выброшенных тел с Землей тем больше, чем больше скорость выброса. Значения этих скоростей столкновений составили около 13, 14–15, 14–16, 14–20, 14–25 км/с при скорости выброса, равной 11.3, 11.5, 12, 14 и 16.4 км/с соответственно. Скорости столкновений тел с Луной были также выше при больших скоростях выброса и находились в основном в пределах 7–8, 10–12, 10–16 и 11–20 км/с при v_{ej} , равной 11.3, 12, 14 и 16.4 км/с соответственно.

10. Формирование осевых вращений планет

Осевые вращения большинства планет Солнечной системы (за исключением Венеры и Урана) являются прямыми, т.е. совпадают с направлением их орбитального движения. Многие авторы считают, что большинство планет приобрело современные осевые вращения в процессе формирования планет из протопланетного околосолнечного облака. При моделировании методом сфер (в основном сфер действия) эволюции **плоских дисков из сотен твердых тел**, движущихся

вокруг Солнца и объединяющихся при столкновениях, Ипатов [2-4, 125, 217, 224, 226] впервые исследовал периоды осевых вращений образовавшихся тел-планет. Анализ полученных результатов показал, что в результате эволюции дисков часть образовавшихся тел обычно приобретала положительные, а часть тел - отрицательные осевые вращения. Причем, если эксцентриситеты орбит (точнее значения $e_m \mu^{1/3}$, где e_m - наибольший эксцентриситет гелиоцентрических орбит двух объединяющихся тел, μ - масса большего из этих тел в массах Солнца) в ходе эволюции были относительно невелики, то среди образовавшихся тел преобладали тела с положительными осевыми вращениями. Если же эволюция шла при больших эксцентриситетах орбит, то доли образовавшихся тел с положительными и отрицательными осевыми вращениями были примерно одинаковы. Малое число начальных тел (не более 1000) в рассмотренных вариантах расчетов, а, следовательно, и небольшие отношения масс сталкивающихся тел, возможно, являются причиной того, что периоды осевых вращений образовавшихся тел в рассмотренных вариантах были в основном несколько меньше периодов осевых вращений современных планет. Обзор работ по формированию осевых вращений планет приведен в параграфе 4 главы 5 монографии [78].

Путем моделирования многократных (сотни тысяч в каждом варианте) изолированных сближений (до радиуса r_s рассматриваемой сферы) двух тел, движущихся вокруг Солнца в одной плоскости, были проведены расчеты значений $\Delta K = K^+ - K^-$ (где K^+ и K^- - доли положительных и отрицательных моментов количества движения сталкивающихся тел относительно их общих центров масс среди суммы модулей моментов обоих знаков) при различных исходных данных (массах $m_1 = \mu_1 M_s$ и $m_2 = \mu_2 M_s$ (M_s - масса Солнца), плотностях ρ (k_p - отношение плотности тел к плотности Земли), эксцентриситетах e_1 и e_2 и больших полуосях a_1 и a_2 гелиоцентрических орбит). Взаимное гравитационное влияние тел учитывалось методом сфер (в основном сфер действия). Результаты этих расчетов представлены в препринтах [222-223] и суммированы в параграфе 4 главы 5 монографии [78]. В каждом из вариантов расчетов эксцентриситеты и массы тел, а также направление на перицентр орбиты первого тела были фиксированы. Направление на перицентр орбиты второго тела менялось от 0 до 2π радиан. В вариантах расчетов Σ отношение a_2/a_1 больших полуосей орбит принимало различные значения, при которых возможно сближение тел до r_s . Результаты таких расчетов [222] позволили оценить средние значения ΔK при различных эксцентриситетах орбит и плотностях тел и планет. Было показано, что значения K^+ и ΔK (особенно в вариантах Σ) имеют тенденцию к убыванию с увеличением $a_1 k_p^{1/3}$ и $e_m = \max\{e_1, e_2\}$. В некоторых вариантах, для которых $a_2/a_1 = \text{const}$, зависимость K^+ от $a_1 k_p^{1/3}$ не совсем монотонная. В вариантах расчетов, проведенных методом сфер действия, как и при численном интегрировании уравнений движения задачи трех тел, получено, что значения ΔK максимальны при $e_H = e_m (\mu/3)^{-1/3} \sim 1$.

Из полученных результатов, в частности, видно, что при одних и тех же значениях $a_1 k_p^{1/3}$, $e_m = \max\{e_1, e_2\}$ и $\mu = \max\{\mu_1, \mu_2\}$ значения ΔK могут отличаться в несколько раз для различных величин e_1 , e_2 , μ_1 и μ_2 . Полученные результаты показывают, что значения ΔK могут существенно зависеть от отношения a_2/a_1 . Хотя значения ΔK и вероятности столкновений тел при их сближениях до радиуса сферы действия в случае почти касательных орбит больше, чем для других орбит, при исследовании формирования осевых вращений планет не стоит ограничиваться исследованием только почти касательных орбит (особенно, когда эксцентриситеты орбит планеты и тел немалы). Желательно учитывать все допустимые орбиты тел.

Считается, что Юпитер и Сатурн образовались в основном за счет аккреции газа, а скорости осевых вращений Меркурия, Венеры и Плутона были сильно изменены приливными силами. Сравнивая значения ΔK , соответствующие современным периодам осевых вращений планет, со значениями ΔK , полученными при различных исходных данных, получаем, что для формирования осевых моментов Земли и Нептуна путем аккреции малых тел основная масса тел, выпадавших на эти планеты, должна была иметь слабоэксцентричные ($e < 0.05$) орбиты. Полученные Ипатовым [222-223] численные результаты свидетельствуют в пользу того, что в регулярную составляющую осевых моментов некоторых планет (например, Земли и Нептуна) внесли большой вклад выпадения крупных тел на планеты.

В рамках модели аккумуляции твердых тел современные **наклоны осей вращения** планет обычно объясняют выпадением крупных тел на зародыши. Ипатов получил [223], что наиболее массивные тела (массой до нескольких масс Земли) должны были выпасть на Сатурн и Уран. Если считать первоначальный период осевого вращения Земли, равным 6 часам, то при одном ударе наклонение оси вращения Земли, согласно [223], получается при ее столкновении с телом массой в

$0.03m_E$. При современном периоде осевого вращения Земли (24 часа) масса ударника в 4 раза меньше ($\sim 0.01m_E$). Крупные тела, выпадавшие на планеты, внесли существенный вклад не только в наклоны осей вращения, но и в регулярные составляющие их моментов осевых вращений.

Результаты исследований процесса формирования осевых вращений протопланет путем объединений **разреженных газопылевых сгущений** показали [223], что их осевые моменты значительно превышают осевые моменты современных планет. Полученные результаты показывают, что если протопланета и сгущения представляют собой однородные шары, совпадающие с их сферами Хилла, то осевой момент разреженной протоЗемли почти на два порядка превышает осевой момент современной Земли. Однако при сжатии протопланет из-за их приливных взаимодействий с Солнцем их осевой момент существенно уменьшается.

11. Миграция малых тел из различных областей Солнечной системы к планетам земной группы

Вода и летучие важны для зарождения и эволюции жизни в Солнечной системе и во внесолнечных системах. Вода в океане Земли и ее отношение D/H дейтерия к водороду могут быть результатом смешивания воды из нескольких экзогенных и эндогенных источников с высоким и низким отношениями D/H. Проблема миграции небесных тел в Солнечной системе важна и для понимания формирования и эволюции Солнечной системы. Эндогенные источники воды могли включать прямую адсорбцию водорода из небулярного газа в расплавы магмы с последующей реакцией водорода с оксидом железа FeO и аккумуляцию воды частицами протопланетного диска до начала диссипации газа во внутренней части ранней Солнечной системы, которые могли увеличить отношение D/H дейтерия к водороду в океанах Земли. Также они включают аккумуляцию воды частицами протопланетного диска до начала диссипации газа во внутренней части ранней Солнечной системы. Ниже говорится об экзогенных источниках воды. Экзогенные источники включали миграцию тел из-за линии льда. В ряде работ внешняя часть главного пояса астероидов рассматривалась как основной источник воды на Земле. Много тел столкнулось с планетами земной группы и Луной во время периода поздней тяжелой бомбардировки (Late Heavy Bombardment, LHB). Разные оценки этого периода лежат внутри интервала от 4.5 до 3.5 млрд лет тому назад.

Ипатовым исследовалась миграция тел к планетам земной группы из зон главного и внешнего астероидных поясов, из зоны планет гигантов и из транснептунового пояса. Миграция тел к планетам земной группы из транснептунового пояса обсуждается выше в конце раздела 7 «Формирование астероидного и транснептунового поясов». В частности, в [22] оценивалось, что до 20% околоземных объектов с диаметром $d > 1$ км могли приходить из транснептунового пояса. Изучение вероятностей столкновений тел с Землей важно при рассмотрении проблемы астероидно-кометной опасности (АКО), ~~привлекая к себе растущее внимание как потенциальный источник угрозы~~ земной цивилизации. Среди объектов, близких к Земле (СЗ) наибольшую опасность представляют три главные группы астероидов, близких к Земле: группы Аполлона, Атона и Атоны, из которых тела из группы Аполлона ближе подходят к земной орбите ($1.017 < q = a(1-e) < 1.3$ ае), а тела из групп Атона и Атоны ее пересекают, при этом их близкий подход соответственно больше или меньше 1 ае. Выделяют также небольшую группу астероидов группы Аиры с орбитами, лежащими внутри орбиты Земли ($Q = a(1+e) < 0.983$ ае). ~~Некоторые СЗ достигают километровых размеров, и их столкновение с Землей способно вызвать глобальную катастрофу, как это происходит не раз в геологической истории нашей планеты. Многие исследователи считают, что астероиды являются основным источником СЗ, в то время как кометы представляют большую опасность из-за внезапности их появления.~~

До середины 1990-ых годов при моделировании миграции тел к орбите Земли под влиянием планет кроме численного интегрирования широко использовались также ~~методы~~ **методы** В[19] и в параграфах 7-8 главы 7 монографии [78], в частности была рассмотрена эволюция дисков, состоявших первоначально из 500 тел с одинаковыми большими полуосями a_0 (≥ 1.7 ае) и большими (≥ 0.4) начальными эксцентриситетами e_0 орбит. Результаты расчетов таких пространственных (при среднем наклонении около 15 градусов) дисков, представленных в табл. 1, показали, что для тел, выброшенных на гиперболические орбиты в $k_{11} \sim 5-30$ раз больше, чем для тел, столкнувшихся с планетам, большинство эксцентриситетов гиперболических орбит выброшенных тел лежит между 1.01 и 2, а для гелиоцентрических орбит невелика. Число тел, сталкивавшихся с Венерой, было близко к числу тел, сталкивавшихся с Землей. Для тел, столкнувшихся с Меркурием, формально зависело от a_0 и e_0 . При $a_0 = 2.5$ ае и $e_0 = 0.4$ (для тел, приходящих из резонанса 3:1 с Юпитером) три тела, столкнувшиеся с Меркурием, были соответственно втрое и вдвое меньше, чем для Земли. При $a_0 = 1.7$ ае и $e_0 = 0.5$ (типичные орбиты астероидов группы Аполлона) и при $a_0 = 2.82$ ае и $e_0 = 0.7$ (для тел, приходящих из резонанса 5:2 с Юпитером) время, за которое число тел в диске уменьшилось вдвое, было на два порядка меньше среднего времени до столкновения тел с Землей. При этом более 10% тел из резонанса 5:2, которые сталкивались с Землей, сталкивались с ней ~~меньше~~ **меньше**, чем за 1 млн лет, хотя время на до последнего столкновения могут превышать 100 млн лет.

Таблица 1. Для p_{E500} тел, столкнувшихся с Землей, и для p_h тел, выброшенных на гиперболические орбиты с эксцентриситетами e_h в ряде данных k_h – отношение числа тел, выброшенных на гиперболические орбиты, к числу тел, столкнувшихся с планетой, T_h – время, за которое число тел в данной группе уменьшилось вдвое. Так как в нашей модели 500 тел, то вероятность столкновения для одного тела в 500 раз меньше, чем p_{E500} .

a_0 , а.е.	1.7	2.5	2.82	7	25
e_0	0.5	0.4	0.7	0.5	0.5
p_{E500}	0.04	0.03	0.14	0.04	0.014
k_h	8	5	20	30	20
T_h , млн лет	1	10	0.2	0.1	1
p_h при $e_h > 2$	0.004	0.008	0.014	0.002	0.004
p_h при $1.1 < e_h < 2$	0.452	0.453	0.398	0.406	0.360
p_h при $1.01 < e_h < 1.1$	0.396	0.381	0.396	0.464	0.474
p_h при $1.001 < e_h < 1.01$	0.108	0.132	0.148	0.118	0.144
p_h при $1.0001 < e_h < 1.001$	0.032	0.026	0.044	0.008	0.016
p_h при $1.00001 < e_h < 1.0001$	0.008	0	0	0.002	0.002

Миграция тел из основного астероидного пояса обсуждалась в статье [19] и параграфах 2 и 8 главы 7 монографии [78]. Были сделаны следующие выводы. Астероиды, попавшие в люки Кирквуда из-за гравитационного влияния крупнейших астероидов, могут составлять несколько процентов ОСЗ. Больше число тел может попадать в люки в результате взаимных столкновений астероидов. Поэтому ОСЗ, поставляемые из астероидного пояса, в значительной степени являются продуктами высокоскоростных столкновений. Получено, что среднее время до момента первого столкновения какого-либо астероида диаметром $d=1$ км с каким-либо астероидом диаметром $d \geq 0.1d$ меньше 10 тысяч лет. Среднее время жизни небольших ($d < 100$ км) астероидов главного пояса не превышает время существования Солнечной системы, а время жизни тела диаметром 1 м в астероидном поясе может быть порядка миллиона лет. Характерное время до столкновения ОСЗ с Землей составляет около 100 млн лет. Вероятность выброса ОСЗ на гиперболическую орбиту на порядок больше вероятности его столкновения с Землей. Для половины тел, столкнувшихся с Землей, интервал времени между выходом на орбиту, пересекающую орбиту Земли, и столкновением с Землей, не превышает 10 млн лет. Выпадение на Землю ОСЗ диаметром $d > 1$ км может происходить в среднем раз в 100 тысяч лет.

В статьях [27-29, 93-94] исследовалась эволюция орбит ~30000 объектов, первоначально пересекавших орбиту Юпитера (ОПОЮ), с начальным периодом $P < 20$ лет. В частности, рассматривались кометы 2P, 10P, 44P и 113P. При этом учитывалось гравитационное влияние семи планет (Венера–Нептун). Рассматривались также резонансные астероиды и транснептуновые объекты. Для интегрирования уравнений движения в основном использовался симплектический алгоритм из пакета SWIFT (Levison, Duncan, Icarus, 1994, v. 108, 18-36). Для рассмотренных задач результаты расчетов этим методом были близки к результатам расчетов методом (Bulirsh, Stoer, Numerische Mathematik, 1996, v. 8, 1-13). Среднее время динамической жизни ОПОЮ получено порядка 100 тыс. лет, а среднее время движения объекта, первоначально пересекавшего орбиту Юпитера, по орбите, пересекавшей орбиту Земли, было около 30 тысяч лет. Однако среди рассмотренных 30 тысяч ОПОЮ было несколько объектов, которые переходили на орбиты, лежащие внутри орбиты Юпитера, и двигались по ним в течение десятков миллионов лет. Вероятность столкновения такого объекта с планетой земной группы может быть больше, чем у 10 тысяч других объектов, пересекавших орбиту Юпитера. Хотя только небольшая часть мигрировавших объектов имела большие полуоси орбит $a < 2$ а.е., среднее время, проводимое объектами, первоначально пересекавшими орбиту Юпитера, на орбитах с $a < 2$ а.е. было сравнимо со временем при $a=3$ а.е. Вероятность столкновения объекта, пересекавшего орбиту Юпитера, с Землей была порядка 4×10^{-6} – 4×10^{-5} (интервал для различных групп объектов).

В статье [53] с помощью симплектического интегратора SWIFT исследовалась миграция планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна к формирующимся планетам земной группы. В серии расчетов «JS» рассматривались современные орбиты и массы планет земной группы, Юпитера и Сатурна. В серии JS₀₁ массы планет земной группы были в 10 раз меньше их современных значений, а Юпитер и Сатурн имели современные массы и орбиты (в ряде космогонических моделей считается, что Юпитер и Сатурн почти сформировались, когда массы планет земной группы были еще далеки от современных значений). В сериях JN и JN₀₁

дополнительно к начальным данным для JS и JS₀₁ рассматривались Уран и Нептун на их современных орбитах. В четырех сериях расчетов JS, JS₀₁, JN и JN₀₁ большие полуоси a исходных орбит планетезималей варьировались от $a_{\min}=4.5$ до $a_{\max}=12$ а.е., причем число планетезималей с большой полуосью орбиты, близкой к a , было пропорционально $a^{1/2}$. Эксцентриситеты исходных орбит планетезималей равнялись 0.3 (такие средние эксцентриситеты орбит планетезималей были на конечных стадиях аккумуляции планет земной группы), а наклонения их орбит равнялись 0.15 рад. Вероятности столкновений рассмотренных планетезималей (из зон Юпитера и Сатурна) с Землей были порядка 2×10^{-6} [53]. В [53] отмечалось, что около 30% воды, доставленной из зоны питания Юпитера и Сатурна, могло быть доставлено при росте зародыша Земли до $0.5m_E$.

В ряде расчетов [59, 122, 484, 496] начальные значения a_0 больших полуосей орбит тел-планетезималей варьировались от $a_{\min}$ до $a_{\min}+d_a$, их начальные эксцентриситеты равнялись e_0 , а начальные наклонения равнялись $e_0/2$ рад. В одних расчетах значения $a_{\min}$ варьировались с шагом в 2.5 а.е. от 5 до 40 а.е. и $d_a=2.5$ а.е., а $e_0=0.05$ или $e_0=0.3$. В других расчетах значения $a_{\min}$ варьировались с шагом в 0.1 а.е. от 3 до 4.9 а.е. и $d_a=0.1$ а.е., а $e_0=0.02$ или $e_0=0.15$. Учитывалось гравитационное влияние планет (от Венеры до Нептуна) и Солнца. При интегрировании уравнений движения использовался пакет интегрирования SWIFT. В расчетах, представленных на рис. 1-6, планеты рассматривались как материальные точки. Вероятности столкновений тел с планетами и Луной вычислялись на основе массивов элементов орбит мигрировавших тел. В более поздних вариантах расчетов тела, сталкивающиеся с планетами, исключались из дальнейших расчетов и учитывались при вычислении вероятностей столкновений тел с планетами. В этих новых вариантах расчетов вероятности столкновений тел с планетами и Луной также дополнительно вычислялись на основе массивов элементов орбит мигрировавших тел, так как эти вероятности иногда малы, и для некоторых планет (особенно для планет земной группы при миграции тел из зоны планет-гигантов) при интегрировании иногда не было столкновений тел с планетами. Результаты расчетов с удалением сталкивающихся тел лучше соответствуют реальной эволюции, так как столкнувшиеся тела уже не фигурируют в дальнейших расчетах и больше не вносят вклад в вероятности столкновений. Результаты расчетов по миграции тел, обсуждаемых в данном абзаце, планируется подробнее опубликовать позднее в журнальных статьях. Пока они кратко (и только для расчетов с материальными точками) представлены в тезисах [122, 484, 496] и в обзорной статье [59].

Ниже приведены рисунки 1-2 из [496]. На них приведены вероятности столкновений тел с Землей, умноженные на миллион, для начальных значений больших полуосей орбит тел от 3.2 до 5 а.е. (при $a_{\min}$ от 3.2 до 4.9 а.е.) при $e_0=0.02$ и $e_0=0.15$. для различных интервалов времени (от 1 млн лет до 1000 млн лет, и для конечного интервала времени).

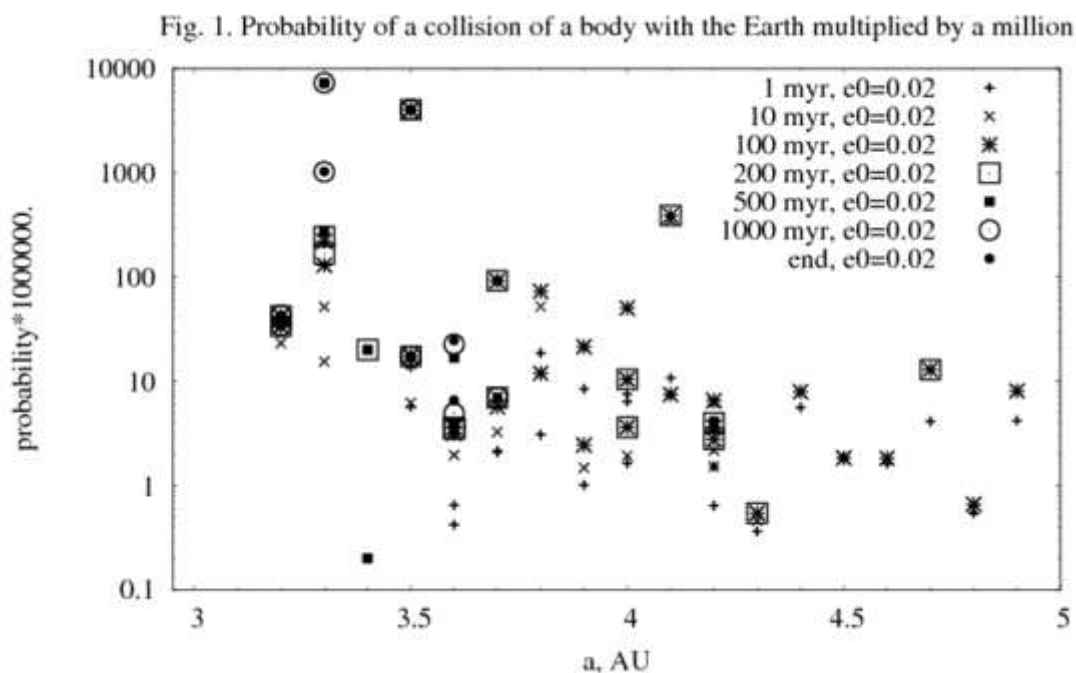


Рисунок 1. Вероятности столкновений тел с Землей, умноженные на миллион, при $a_{\min}$ от 3.2 до 4.9 а.е. и $e_0=0.02$ для различных интервалов времени.

Fig. 2. Probability of a collision of a body with the Earth multiplied by a million

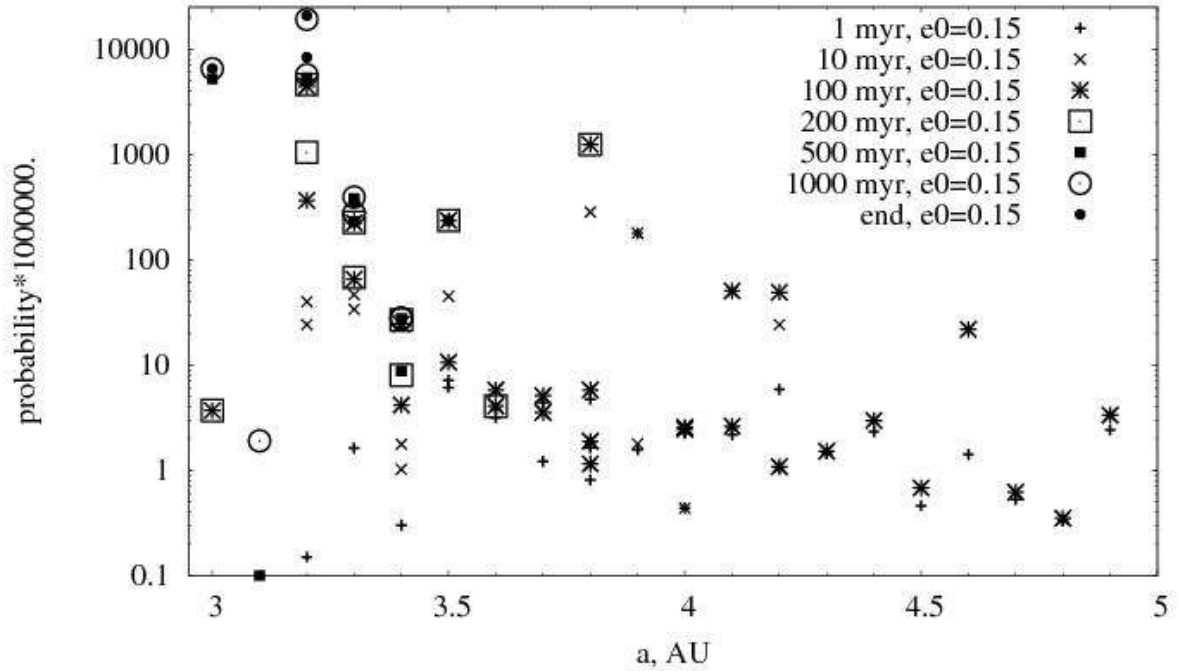


Рисунок 2. Вероятности столкновений тел с Землей, умноженные на миллион, при $a_{\min}$ от 3.2 до 4.9 а.е. и $e_0=0.15$ для различных интервалов времени.

На рис. 3-6, взятых из [484], представлены вероятности столкновений тел с Землей, умноженные на миллион (значок + в правом верхнем углу относится к описанию обозначений, а не к значению вероятности при данном $a_{\min}$). На рис. 3-4 рассмотрены результаты расчетов при $a_{\min}$ от 5 до 40 а.е., $d_a=2.5$ а.е. и $e_0=0.05$ или $e_0=0.3$. На рис. 5 представлен случай, когда из расчетов исключены Уран и Нептун, а тела рассматриваются только в зоне от 5 до 10 а.е. На рис. 6 рассмотрены результаты расчетов при $a_{\min}$ от 2.5 до 40 а.е., $d_a=0$ и $e_0=0.3$.

Fig. 3. Probability of a collision of a body with the Earth multiplied by a million

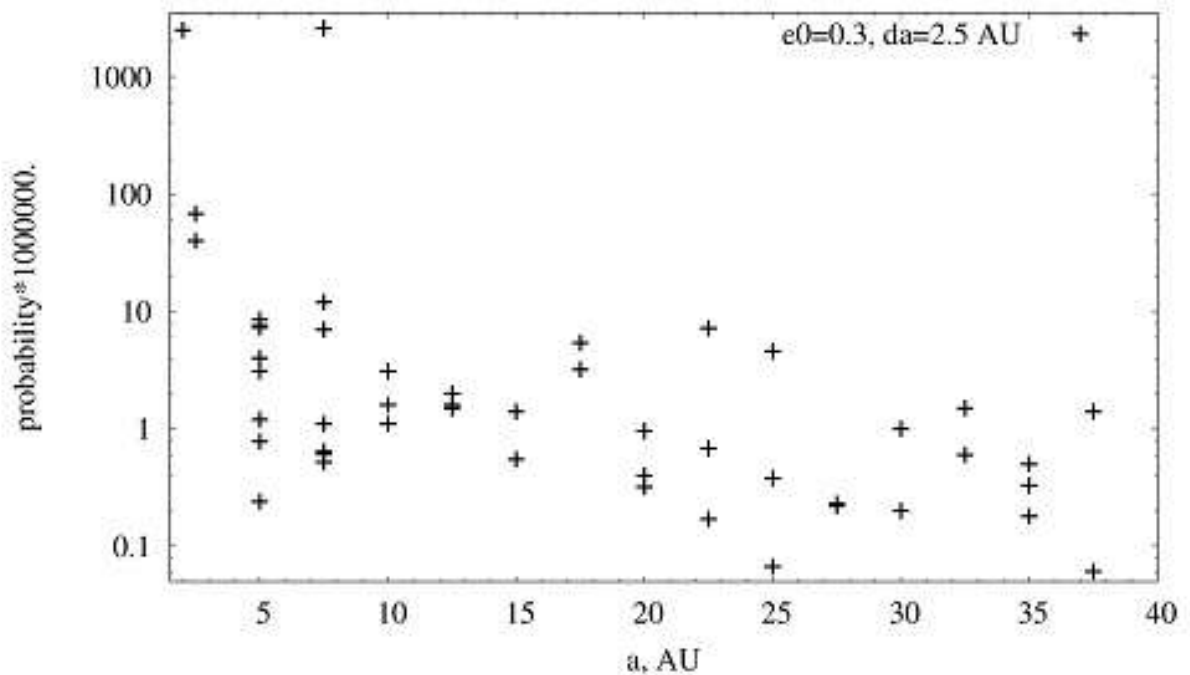


Рисунок 3. Вероятности столкновений тел с Землей, умноженные на миллион, при $a_{\min}$ от 2.5 до 37.5 а.е., $d_a=2.5$ а.е. и $e_0=0.3$ за весь рассмотренный интервал времени.

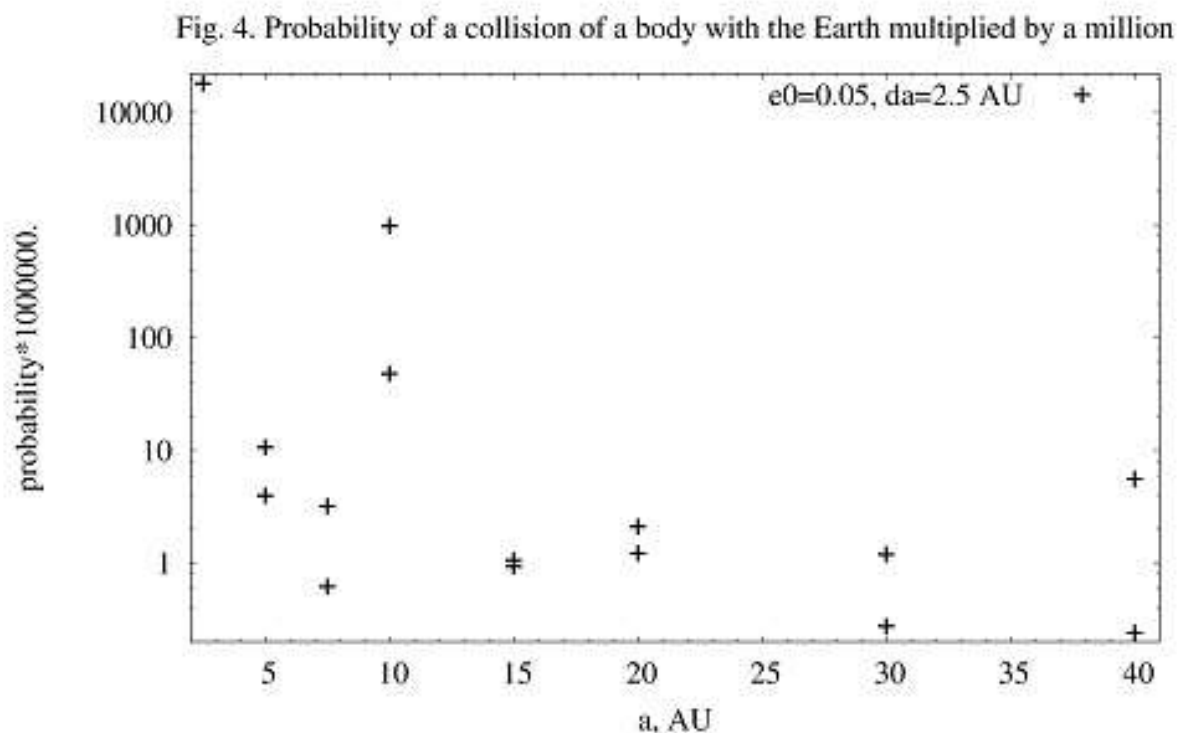


Рисунок 4. Вероятности столкновений тел с Землей, умноженные на миллион, при $a_{\min}$ от 2.5 до 40 а.е., $d_a=2.5$ а.е. и $e_0=0.05$ за весь рассмотренный интервал времени.

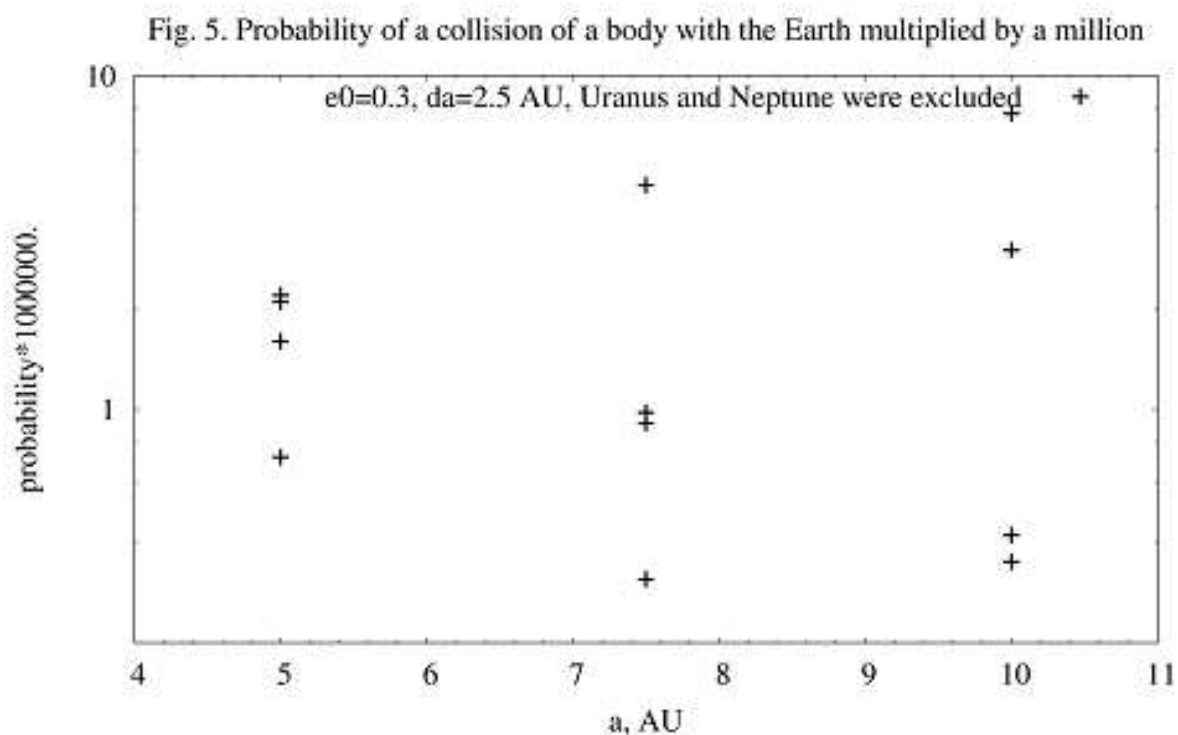


Рисунок 5. Вероятности столкновений тел с Землей, умноженные на миллион, при $a_{\min}$ от 5 до 10 а.е., $d_a=2.5$ а.е. и $e_0=0.3$ за весь рассмотренный интервал времени.

Fig. 6. Probability of a collision of a body with the Earth multiplied by a million

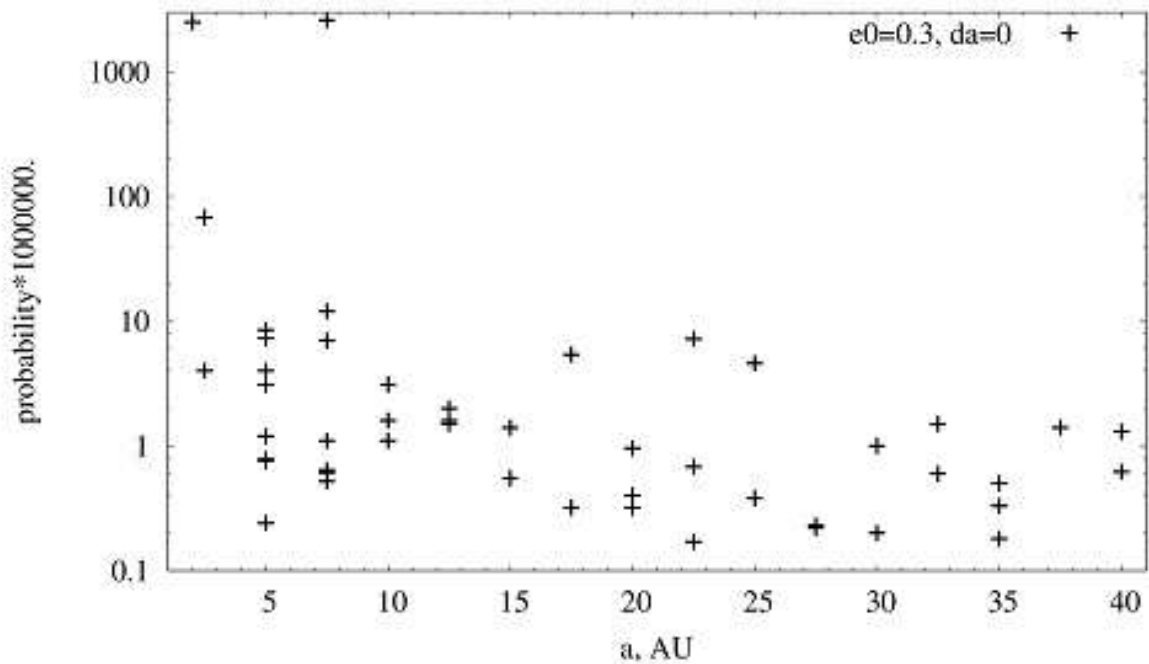


Рисунок 6. Вероятности столкновений тел с Землей, умноженные на миллион, при $a_{\min}$ от 2.5 до 40 а.е., $d_0=0$ а.е. и $e_0=0.3$ за весь рассмотренный интервал времени.

Значения p_E вероятности столкновения тела с Землей в среднем были меньше при больших начальных значениях a_0 больших полуосей орбит при $5 \leq a_0 \leq 40$ а.е. [484]. Значения вероятности p_E столкновения планетезимали с Землей составляют около 10^{-6} при a_0 около 15-40 а.е. и порядка 10^{-5} при a_0 около 4-10 а.е. Для некоторых значений $a_{\min}$ и e_0 значения p_E , вычисленные для 250 планетезималей, могут отличаться в сотни раз для расчетов с почти одинаковыми начальными орбитами. Это отличие вызвано тем, что одна из тысяч планетезималей могла двигаться на орбите, пересекающей орбиту Земли, в течение миллионов лет и иметь гораздо большую вероятность столкновения с Землей, чем для других планетезималей. В вариантах, представленных на рис. 5, когда из расчетов исключены Уран и Нептун, а тела рассматривались в зоне от 5 до 10 а.е., во всех вариантах вероятность p_E столкновения тел с Землей не превышала 10^{-5} . В некоторых вариантах с Ураном и Нептуном при таких же значениях $a_{\min}$ и e_0 значения p_E превышали 10^{-5} .

Тела, первоначально находившиеся на разном расстоянии от Солнца, **достигали Земли через разное время t** . При $3 \leq a_{\min} \leq 3.5$ а.е. и $e_0 \leq 0.15$ отдельные тела могли выпадать на Землю и Луну через несколько сотен миллионов лет. Например, для $a_{\min}=3.3$ а.е. и $e_0=0.02$ значение $p_E=4 \times 10^{-5}$ при $0.5 \leq t \leq 0.8$ млн лет (время поздней тяжелой бомбардировки) и $p_E=6 \times 10^{-6}$ при $2 \leq t \leq 2.5$ млн лет. Для $a_{\min}=3.2$ а.е. и $e_0=0.15$, получено, что $p_E=0.015$ при $0.5 \leq t \leq 1$ млн лет, и $p_E=6 \times 10^{-4}$ при $1 \leq t \leq 2$ млн лет. Зона внешнего астероидного пояса могла быть одним из источников «поздней тяжелой бомбардировки». Большинство выпадений на Землю тел, первоначально находившихся на расстоянии от 4 до 5 а.е. от Солнца, происходило в течение первых 10 млн лет. Тела, первоначально пересекавшие орбиту Юпитера, могли приходить к орбите Земли в основном в течение первого миллиона лет (после формирования массивного Юпитера). Время миграции тел к орбите Земли из зоны питания Урана и Нептуна зависело от того, когда в этой зоне появились крупные зародыши этих планет. Согласно [15], основные изменения элементов орбит зародышей планет-гигантов произошли не более, чем за 10 млн лет. Большинство тел с $5 < a_{\min} < 30$ а.е., выпавших на Землю, выпадало на нее в течение 20 млн лет. При $a_{\min} > 20$ а.е. значения p_E могли немного расти и через сотни миллионов лет, а отдельные тела могли оставаться на эллиптических орбитах и через время, равное возрасту Солнечной системы.

Общая масса земных океанов составляет около $2 \times 10^{-4} m_E$. При $p_E=4 \times 10^{-6}$ и при суммарной массе планетезималей m_{Σ} на начальном расстоянии от 5 до 10 а.е. от Солнца равной $100 m_E$, суммарная масса $m_{\Sigma E}$ планетезималей, выпавших на Землю, составляла бы $4 \times 10^{-4} m_E$. Для зоны 10–40 а.е. при $p_E=1.5 \times 10^{-6}$ и $m_{\Sigma}=100 m_E$ имеем $m_{\Sigma E}=1.5 \times 10^{-4} m_E$. Для зоны 3–4 а.е. при $p_E=10^{-3}$ и $m_{\Sigma}=10 m_E$

имеем $m_{\Sigma E}=0.01m_E$. Предполагаемое количество льда в кометах не превышает 33%. Однако некоторые авторы считают, что первичные планетезимали могли содержать больше льда (~50%), чем современные кометы. Приведенные выше оценки показывают, что **общая масса льда воды, доставленного на Землю** из-за орбиты Юпитера, могла быть сравнима с массой земных океанов. Хотя тела в зоне внешнего астероидного пояса имели меньшую суммарную массу и, вероятно, содержали меньше льдов (~10%), чем тела за орбитой Юпитера, из-за гораздо большей вероятности столкновений с Землей тела, пришедшие из зоны внешнего астероидного пояса, могли принести на Землю не меньше воды, чем тела из зоны планет-гигантов. Из-за уменьшения большой полуоси орбиты Юпитера, выбрасывавшего планетезимали на гиперболические орбиты, зона в астероидном поясе с большей вероятностью доставки планетезималей к Земле сдвигалась и со временем охватывала большее число планетезималей. Некоторая часть воды терялась при столкновениях планетезималей с планетами и особенно с Луной. Следовательно, количество воды, вошедшей в планеты земной группы и Луну, могло быть меньше, чем количество воды, доставленное к этим небесным объектам.

Суммарная масса воды, доставленной **к Венере и Меркурию** из-за орбиты Юпитера, в расчете на массу планеты была примерно такой же, как и для Земли, а аналогичная масса воды, доставленной к Марсу, в расчете на единицу массы планеты была примерно в 2–3 раза больше, чем для Земли [53]. В абсолютных величинах масса воды, доставленной на Марс, была в 3–5 раз меньше массы воды, доставленной на Землю. Результаты свидетельствуют в пользу существования древних океанов на Марсе и Венере, вероятно, частично сохранившихся на глубине (Марс) или утраченных в процессе эволюции (Венера).

Масса воды, доставленной **к Луне** из-за орбиты Юпитера, могла быть меньше, чем для Земли, не более чем в 20 раз. Для планетезималей в зоне питания планет земной группы отношение r_{EM} числа планетезималей, столкнувшихся с Землей, к числу столкновений с Луной в основном варьировалось от 20 до 40. Первоначально более удаленные от земной орбиты планетезимали приходили к Луне с более эксцентричных орбит, и для них отношение r_{EM} было меньше, чем в случае более близких орбит планетезималей с малыми эксцентриситетами. В 80% вариантов расчетов миграции тел при $3 \leq a_0 \leq 5$ а.е. получено $16.4 \leq r_{EM} \leq 17.4$. В других вариантах расчетов при $a_0 \geq 3$ а.е. отношение r_{EM} могло быть в интервале от 14.6 до 17.9. Доля испарившейся при ударах воды при столкновениях с Луной выше при больших скоростях столкновения и соответственно при меньших значениях r_{EM} .

Квадрат эффективного радиуса r_{ef} небесного тела радиуса r равен

$$r_{ef}^2 = r^2 [1 + (v_{par}/v_{rel})^2], \quad (1)$$

где v_{par} – параболическая скорость на поверхности этого небесного тела, а v_{rel} – относительная скорость малого тела при его входе в сферу действия небесного объекта (точная формула справедлива для относительной скорости на бесконечности). На основании отношения r_{EM} количества планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной, можно оценить характерную скорость v_{relE} (относительно Земли) планетезималей при их входе в сферу действия Земли. Учитывая, что r_{EM} равно отношению квадратов эффективных радиусов Земли и Луны, и используя формулу (1), для отношения v_{relE}/v_{parE} относительной скорости входа тела в сферу действия Земли к параболической скорости $v_{parE}=11.186$ км/с на поверхности Земли получаем

$$(v_{relE}/v_{parE})^2 = [r_{EM} (v_{parM}/v_{parE})^2 (r_M/r_E)^2 - 1] / [1 - r_{EM} (r_M/r_E)^2], \quad (2)$$

где r_M и r_E – радиусы Луны и Земли, v_{parM} и v_{parE} – параболические скорости на поверхности Луны и Земли соответственно. Учитывая, что для скоростей v_{colE} и v_{colM} столкновений тел с Землей и Луной справедливы соотношения $v_{colE}^2 = v_{relE}^2 + v_{parE}^2$ и $v_{colM}^2 = v_{relM}^2 + v_{parM}^2$, и полагая $v_{relE} = v_{relM}$, для некоторых значений r_{EM} в [58] были сделаны оценки значений v_{relE} и характерных **скоростей столкновений v_{colM} и v_{colE} тел с Землей и Луной** для некоторых случаев.

Для планетезималей около орбиты Земли ($0.9 \leq a_0 \leq 1.1$ а.е.) характерные скорости их столкновений с Луной составляли от 8 до 10 км/с, с Землей – от 13 до 15 км/с. Для планетезималей, пришедших из других частей зоны питания планет земной группы (при $20 \leq r_{EM} \leq 40$), разброс характерных скоростей столкновений планетезималей с Землей находился в основном в диапазоне от 13 до 19 км/с, а с Луной от 8 до 16 км/с. Для большинства тел с $a_0 \geq 3$ а.е. (при $16.4 \leq r_{EM} \leq 17.4$) аналогичный разброс характерных скоростей столкновений составил 23–26 км/с для Земли и 20–23 км/с для Луны. Однако диапазон скоростей столкновений всех тел из этой зоны (при $14.6 \leq r_{EM} \leq 17.9$) был шире: от 22 до 39 км/с для Земли и от 19 до 38 км/с для Луны. Приведенные выше скорости больше параболических скоростей на поверхностях этих небесных

тел, что позволяет некоторым выброшенным при столкновениях телам выходить на гелиоцентрические орбиты.

Характерные скорости столкновений планетезималей, первоначально находившихся относительно близко к орбите зародыша Земли, с зародышами Земли и Луны, массы которых были в десять раз меньше современных масс этих небесных объектов, в целом находились в пределах 7–8 км/с для зародыша Земли и от 5 до 6 км/с для зародыша Луны. Для планетезималей, пришедших из более удаленных (от орбиты Земли) областей зоны питания планет земной группы, характерные скорости составляли от 9 до 11 км/с для столкновений с зародышем Земли и от 7 до 10 км/с для столкновений с зародышем Луны.

12. Изменения элементов орбит планет

При моделировании эволюции орбит тел нулевой массы под влиянием планет были построены также графики изменений элементов орбит планет, приведенные в приложении 2 в монографии [78] и в статье [24] (в которых также приведен обзор публикаций по данному вопросу). Ниже приводятся две таблицы из этих публикаций. В табл. 1 для всех планет представлены пределы $\Delta a = a_{\max} - a_{\min}$ изменений больших полуосей орбит, минимальные и максимальные расстояния ($R_{\min}$ и $R_{\max}$) от Солнца, минимальные и максимальные значения эксцентриситета и наклона орбиты ($e_{\min}$, $e_{\max}$, $i_{\min}$, $i_{\max}$), $\Delta e = e_{\max} - e_{\min}$ и $\Delta i = i_{\max} - i_{\min}$. За исключением Меркурия ($T=200$ млн лет), данные по остальным планетам приведены для $T=20$ млн лет (при интегрировании в прошлое). Изменения элементов орбит планет обсуждались также в тезисах [277].

Таблица 1. Пределы изменений элементов орбит планет

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Δa , а.е.	0.000030	0.000033	0.000062	0.00029	0.0037	0.080	0.0231	0.407	1.004
$R_{\min}$, а.е.	0.281	0.673	0.939	1.330	4.880	8.69	17.70	29.34	28.39
$R_{\max}$, а.е.	0.493	0.774	1.061	1.717	5.524	10.45	20.78	31.00	51.15
$e_{\min}$	0.080	0.0002	0.0002	0.0018	0.0252	0.0074	0.0009	0.00005	0.2065
$e_{\max}$	0.273	0.0697	0.0608	0.1268	0.0618	0.0894	0.0757	0.0222	0.2806
Δe	0.193	0.0695	0.0606	0.125	0.0366	0.082	0.0748	0.0222	0.0741
$i_{\min}$, град.	1.80	0.013	0.000	0.061	1.096	0.567	0.438	0.783	13.414
$i_{\max}$, град.	11.86	4.731	0.429	8.640	2.063	2.594	2.710	2.365	18.446
Δi , град.	10.06	4.718	0.429	8.579	0.967	2.027	2.272	1.582	5.032

В табл. 2 приведены средние значения периодов T_e , T_i , T_{ω} , $T_{\Delta\Omega}$ и $T_{\Delta\pi}$ изменений эксцентриситета, наклона и аргумента ω перигелия орбиты планеты, разности $\Delta\Omega_j = \Omega - \Omega_j$ долгот восходящих узлов планеты и Юпитера и разности $\Delta\pi_j = \pi_j - \pi$ долгот перигелиев планеты и Юпитера. Эти данные получены на основе анализа графиков изменений элементов орбит планет со временем. Если углы возрастают или убывают в ходе эволюции, то под периодом понимается время их изменения на 360° . Буквы I , D и L в строках k_{ω} , $k_{\Delta\Omega}$ и $k_{\Delta\pi}$ указывают соответственно на возрастание, убывание и либрацию углов. Сочетание II приводится в случае, когда угол в основном возрастает, но в течение некоторого времени может меняться около 0. Через T_i обозначен период изменений наклона i орбиты, больший T_i (значения T_i в табл.2 не приводятся, если такие изменения i не четко выражены). В ходе эволюции значения периодов могут меняться в несколько раз. В табл. 2 приводятся средние значения периодов (в основном для интервалов $T=1$ млн. лет или $T=20$ млн. лет).

Отметим, что периоды $T_{\Delta\pi}$ для Сатурна и Урана одинаковы и равны периодам T_e изменений эксцентриситетов орбит Юпитера и Сатурна (0.054 млн. лет). Для Юпитера значение π_j возрастает на 360° за 0.3 млн лет, а отношение $d\pi_j/dt = v_5 \approx 4.20^\circ/\text{год}$. Для всех планет (кроме Юпитера) получено, что $T_{\Delta\Omega} \approx T_i$. Периоды $T_{\Delta\Omega}$ для Венеры, Земли и Марса примерно одинаковы (равны 0.07 млн. лет). Значения $\Delta\Omega_j$ для Сатурна, Урана и Нептуна либрировали около 0, а значение $\Delta\pi_j$ для Урана либрировало около 180° .

Таблица 2. Периоды изменений элементов орбит планет (в млн лет). Обозначения приведены в тексте.

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
---------	----------	--------	-------	------	--------	--------	------	--------	--------

T_{ω}	0.12	0.1	0.1	0.036	0.30	0.046	0.30	1.91	3.8
k_{ω}	I	I	I	I	I	I	I	I	L
$T_{\Delta\Omega J}$	0.2	0.07	0.07	0.07	-	0.049	0.44	1.87	3.7
$k_{\Delta\Omega J}$	D	L, D	L, D	D	-	L	L	L	D
T_i	0.2	0.07	0.07	0.07	0.049	0.049	0.043	1.87	3.7
T_e	1	0.1	0.1	0.1	0.054	0.054	1.12	0.53	3.8
$T_{\Delta\pi J}$	1.4	0.3	0.2	0.1	-	0.054	0.054	0.36	0.28
$k_{\Delta\pi J}$	I	II	II	I	-	I	L	D	D
T_I		0.25	0.34	0.25	1.9	1.9			130

13. Вероятности столкновений околоземных объектов с Землей и Луной и лунные кратеры

Из-за столкновений с другими небесными телами и выброса на гиперболические орбиты динамическое время жизни объектов, пересекающих орбиту Земли (ОПОЗ) меньше характерного времени до столкновения ОПОЗ с Землей для модели, в которой ОПОЗ остаются все время на своих орбитах, никуда не уходят и ни с чем кроме Земли не сталкиваются. Однако такая модель может использоваться для оценок характерного времени до выпадения ОПОЗ на Землю и Луну при предположении, что число и характерные орбиты ОПОЗ не меняются со временем. Вероятности столкновений околоземных объектов с Землей обсуждались в параграфе 8 главы 7 в [78].

Для 417 объектов, пересекающих орбиту Земли (ОПОЗ) и открытых до середины 1999 г., были вычислены (по формуле (4.4) из параграфа 2 главы 4 в [78]) средние времена T_{3c} до их столкновений с Землей при фиксированных значениях больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов орбит. Среднее наклонение и средний эксцентриситет орбит этих ОПОЗ равнялись 14.3° и 0.52 соответственно. Для 11 ОПОЗ получено $T_{3c} \leq 10$ млн лет. В большинстве таких случаев наклонение $\Delta i < 3^\circ$. Элементы орбит реальных астероидов могут значительно меняться до их столкновений с планетами, и времена до этих столкновений могут сильно отличаться от значений T_{3c} , полученных при фиксированных элементах орбит. В [19, 26, 28-29, 78] при вычислении $T_E = N / \Sigma(T_{3c}^{(k)})$, рассматривались все ОПОЗ, известные на момент вычисления (N – число ОПОЗ). В [78] значение T_E было получено равным 100 млн лет для 417 ОПОЗ, равным 105 млн лет для 363 объектов Аполлона и равным 80 млн лет для 55 известных атонцев. Атонцы – это околоземные астероиды, чьи орбиты пересекают земную орбиту с внутренней стороны (их расстояние от Солнца в афелии больше перигелийного расстояния Земли, $Q > 0.983$ а.е., но большая полуось меньше земной, $a < 1$ а.е.). У астероидов группы Аполлона орбиты пересекают земную орбиту с внешней стороны (их расстояние от Солнца в перигелии меньше афелийного расстояния Земли, $q < 1.017$ а.е., но большая полуось орбиты больше земной, $a > 1$ а.е.).

В [19] для 93 объектов, пересекающих орбиту Земли, и известных в 1991 году, было получено $T_E = 76$ млн лет. В [28-29] значения T_E были получены равными 15, 164 и 67 млн лет для 110 астероидов группы Атона, 643 астероидов группы Аполлона и всех ОПОЗ соответственно. Астероидами группы Амура называют астероиды с перигелийными расстояниями большими 1.017 а.е. Поэтому практически все такие астероиды (пока они не изменят свои перигелийные расстояния) не могут сближаться с Землей до расстояния сферы действия Земли. Изменения больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов орбит астероидов со временем в этих расчетах не рассматривались. Хотя аполлонцы в этих расчетах составляли 85% всех ОПОЗ, значения T_E для них были в 2.4 раза больше, чем для всех ОПОЗ. При $T_E = 67$ млн лет вероятность $p_E = 1/T_E$ столкновения ОПОЗ с Землей за 1 год равна 1.5×10^{-8} . Число известных ОПОЗ увеличивается с каждым месяцем. На январь 2025 г. было известно более 21 тыс аполлонцев (из них 1742 получили номера, то есть их орбиты стали хорошо известны).

Различия в значениях T_E для разных цитируемых выше публикаций были вызваны разным числом рассмотренных астероидов. Меньшие, чем в [78], значения T_E для всех ОПОЗ в [28-29] были обусловлены несколькими атонцами с небольшими наклонениями орбит, обнаруженными в начале 2000-х годов. При увеличении наклона орбиты атонца 2000 SG344 от его нынешнего значения, равного 0.1° , до 1° , значения T_E в [29]) были получены равными 28 млн лет и 97 млн лет для атонцев и всех ОПОЗ соответственно. Эти большие, чем при рассмотрении атонца 2000 SG344 с его нынешним наклонением орбиты, времена T_E иллюстрируют важность учета небольшого числа астероидов с высокой вероятностью их столкновений с Землей (роль малых наклонов)

обсуждается также ниже в следующем абзаце). Ипатов [19, 78] отмечал, что при использовании одних и тех же формул, значение T_E , вычисленное для всех ОПОЗ, в несколько раз меньше, чем для средних значений наклонений и эксцентриситетов для этих же ОПОЗ. Исследования эволюции орбит объектов, первоначально пересекавших орбиту Юпитера, и резонансных астероидов показали [27-29, 94], что вероятность столкновения одного такого объекта с Землей может быть больше, чем для тысяч других объектов, первоначально имевших близкие орбиты.

В [28-29] расчеты T_E проводились для элементов современных орбит ОПОЗ. Однако аналогичные значения $T_E=67$ млн лет могли быть и для интервала в 1 млрд лет, так как некоторые ОПОЗ с довольно большой вероятностью раньше также могли иметь аналогичные небольшие наклонения. Наклонения орбит ОПОЗ меняются со временем. В [28-29] рассматривалось 110 атонцев. Если наклонения орбит случайным образом распределены в диапазоне от 0 до 11° , то одно из них будет меньше 0.1° (в предыдущем абзаце мы обсуждали вклад в T_E атона 2000 SG344 с наклонением орбиты равным 0.1°). Если наклонения случайным образом распределены в диапазоне от 0 до 22° , то одно из них будет иметь значение в диапазоне от 0 до 0.2° , то есть в среднем будет равно 0.1° .

Нами вычислялись также значения T_{3c} для различных значений a , e и Δi . Получено, что значения T_{3c} возрастают с увеличением e и Δi и с уменьшением $|a-1|$ а.е. В случае $a=1.25$ а.е. при $\Delta i=80^\circ$ и $e \geq 0.7$, а также при $e=0.9$ и $\Delta i \geq 50^\circ$ значения T_{3c} превышают возраст Солнечной системы, т.е. вероятность столкновений с Землей тел, постоянно движущихся по сильно наклоненным и эксцентричным орбитам, мала. Однако из-за изменений элементов орбит тел в ходе эволюции и выброса большинства из них на гиперболические орбиты очень маловероятно, что даже при больших исходных значениях e и Δi тела могли сохраниться около орбиты Земли со времени ее аккумуляции. Для модели, в которой Δi принимает значения от 0 до $\Delta i_{\max}$ столкновения происходят чаще, чем при $\Delta i = \Delta i_{\max}/2$, а для модели, в которой e принимает значения от $e_{\min}$ до $e_{\max}$, столкновения происходят чаще, чем при фиксированном $e = (e_{\min} + e_{\max})/2$.

Немногим более половины объектов, сближающихся с Землей, (ОСЗ, для которых минимальное расстояние до Солнца (перигелий) составляет менее 1.3 а.е.) пересекают орбиту Земли (то есть являются ОПОЗ). Вероятность выброса ОСЗ на гиперболическую орбиту на порядок больше вероятности его столкновения с Землей, и большинство ОСЗ покидают Солнечную систему за время $t \leq 10$ млн лет. Эти астероиды могут сталкиваться не только с Землей, но также с Венерой и другими планетами. Поэтому для большинства тел, сталкивающихся с Землей, интервал времени между выходом на орбиту, пересекающую орбиту Земли, и столкновением с Землей в несколько раз меньше T_E и вероятно не превышает 10 млн лет.

Была рассмотрена следующая модель. Пусть в начальный момент времени имелось N_0 ОПОЗ. Исследуем изменение числа N этих ОПОЗ со временем t . Полагая, что число ОПОЗ, столкнувшихся с Землей за время Δt , равно $\Delta t \cdot N/T_E$, а число ОПОЗ, выброшенных на гиперболические орбиты или столкнувшихся с другими планетами или с Солнцем, в k раз больше числа столкновений с Землей, получаем $N = N_0 \cdot \exp(-(k+1)t/T_E)$. Обозначая $\beta_t = N/N_0$, получаем $t = -T_E \ln \beta_t / (k+1) = -T_d \ln \beta_t$, где $T_d = T_E / (k+1)$ - динамическое время жизни ОПОЗ. При $1+k=10$ для $\beta_t=0.5$, $\beta_t=0.1$, $\beta_t=0.01$ и $\beta_t \approx 4.54 \cdot 10^{-5}$ имеем соответственно $t \approx 0.07 T_*$, $t \approx 0.23 T_*$, $t \approx 0.46 T_E$ и $t = T_E$. При $\beta_t=0.5$, $1+k=10$ и $T_E=100$ млн лет значение $t = -T_d \ln \beta_t$ равно $T_E \approx 7$ млн лет. Таким образом, половина всех ОПОЗ, выпадающих на Землю, может выпадать на нее за время $t \leq 7$ млн лет после того, как эти астероиды стали пересекать орбиту Земли. После этого на Землю будут в основном выпадать тела, которые стали ОПОЗ позже. Число ОПОЗ будет постоянным и равным N_0 , если кроме учета указанных выше столкновений и выбросов на гиперболические орбиты полагать, что за время Δt из других областей Солнечной системы прибывает $\delta = N_0 \cdot \Delta t (k+1) / T_E$ новых ОПОЗ. Число 1 км ОСЗ оценивается около 1000. Полагая число 1-км ОПОЗ равным около 500, при $\Delta t=1$ млн лет, $T_E=100$ млн лет и $1+k=10$, получаем $\delta=50$.

В главе 7 монографии [78] отмечалось, что столкновительное время жизни тела диаметром 1 м в астероидном поясе $T_{CN} \sim 10^6$ лет. Тела, пересекающие орбиту Земли, часто проникают довольно далеко в астероидный пояс. Поэтому времена T_{CN} до разрушения таких тел не намного меньше, чем для тел в астероидном поясе, и они в несколько раз меньше T_{E*} . Эти оценки согласуются с тем, что обычно каменные метеориты являются результатом нескольких разрушений. Древний возраст железных метеоритов ($>10^8$ лет) может быть вызван тем, что последнее столкновение крупных астероидов произошло более 10^8 лет назад, а образовавшиеся при этом железные осколки до их выпадения на Землю почти не дробились. В параграфе 8.3 главы 7 в [78] обсуждалась

частота столкновений с Землей тел различных масс, а в параграфе 8.4 - времена до падений тел на различные планеты.

Со сближениями малых тел с Землей связаны проблемы астероидно-кометной опасности и **кратерообразования**. В [56] проведено сравнение количества лунных кратеров с диаметром, большим 15 км, и возрастом менее 1.1 млрд лет с оценками числа кратеров таких размеров, которые могли образоваться за 1.1 млрд лет, если бы количество объектов, сближающихся с Землей, и элементы их орбит за это время были бы близки к их современным значениям. Сравнение проводилось для кратеров на всей поверхности Луны и для области в районе Океана Бурь (Oceanus Procellarum) и морей видимой стороны Луны. При этих оценках использовались значения вероятностей столкновений объектов, сближающихся с Землей, с Луной, а также зависимости диаметров кратеров от диаметров ударников. Число известных коперниканских кратеров с диаметром $D \geq 15$ км на единице площади на морях по оценкам различных авторов не менее, чем в двое, превышает аналогичное число для остальной поверхности Луны. Наши оценки не противоречат увеличению количества объектов, сближающихся с Землей, после возможных катастрофических разрушений больших астероидов главного пояса, которые могли произойти в течение последних 300 млн лет, но и не доказывают это увеличение. В частности, они не противоречат выводу работы (Mazrouei и др., Science. 2019. v. 363. 253–255) о том, что число столкновений околоземных астероидов с Луной за единицу времени возросло в 2.6 раза 290 млн лет назад. Число коперниканских лунных кратеров с диаметром, не меньшим 15 км, возможно больше, чем по данным этой работы. Учет разрушения некоторых старых кратеров и изменение орбитального распределения околоземных объектов во времени может привести к выводу о том, что среднее число околоземных объектов в течение последнего миллиарда лет могло быть близко к нынешнему значению. При вероятности столкновения с Землей за год объекта, пересекающего орбиту Земли, (ОПОЗ), равной 10^{-8} , наши оценки числа кратеров соответствуют модели, в которой число 15-км коперниканских кратеров на единице площади для всей поверхности Луны было бы таким же, как и для области морей, если бы данные (Losiak и др., 2015, <https://www.lpi.usra.edu/scientific-databases/>) для $D < 30$ км были бы такими же полными, как и для $D > 30$ км. При такой вероятности столкновения ОПОЗ с Землей и для такой модели темп кратерообразования за последний 1.1 млрд лет мог быть постоянным.

В статье [57] изучены зависимости **отношения глубины кратера к его диаметру** от диаметра для лунных кратеров на морях и на материках для кратеров с возрастом менее 1.1 млрд лет. В частности, отмечалось, что при одинаковом диаметре кратеры на лунных морях глубже, чем на материках, при диаметре кратера меньшем 40-50 км (рис. 1). Для больших диаметров кратеры на материках глубже.

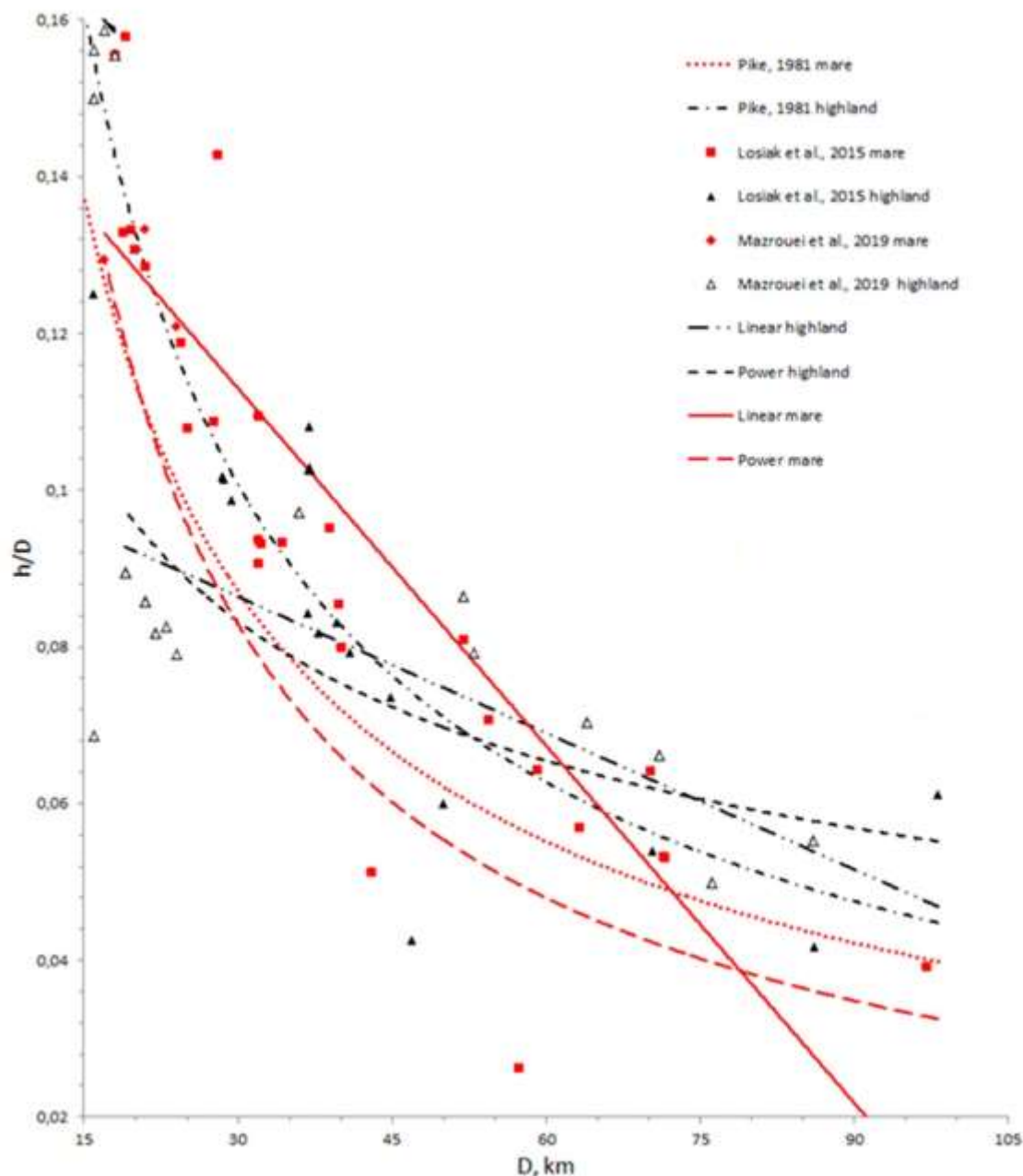


Рисунок 1. Зависимость отношения h/D отношения глубины лунного кратера к его диаметру для коперниканских кратеров диаметром $D \geq 20$ км на морях (mare) и материках (highland). Линиями показаны наши приближения этой зависимости.

14. Миграция пыли в Солнечной системе и формирование зодиакального пояса

Основным источником межпланетной пыли являются частицы, образующиеся при столкновениях астероидов и выбрасываемые кометами при сублимации ледяной матрицы ядра. Размеры пылевых частиц варьируются от нанометров до миллиметров, а нижний порог находится на верхней границе размеров молекулярных кластеров. Граница миллиметр-сантиметр используется, как условная граница между пылевыми частицами и метеороидами. Частицы пыли, сопровождающие процесс сублимации из ядра кометы, образуют пылевые торы вдоль их орбит, периодически пересекаемые Землей и вызывающие метеорные дожди, или ливни (showers). Известные метеорные потоки непосредственно связаны с радиантами родительских комет, проектирующихся на определенные созвездия, по имени которых эти метеорные потоки названы. Количество материала, содержащегося в пылевых частицах и небольших метеороидах и выпадающего ежедневно на земную атмосферу, составляет от 30 до 180 тонн.

Миграция пылевых частиц рассматривалась рядом авторов. В наших численных моделях [30-31, 33, 37, 93, 95, 96, 99, 106, 146, 149, 152, 171, 173, 312, 330, 331, 335, 338, 342, 344, 345, 348,

350, 353-355, 358, 367, 374, 389, 400, 403-404, 411] кроме гравитационного влияния планет, учитывались также другие факторы (радиационное давление, эффект Пойтинга-Робертсона, солнечный ветер). Относительная ошибка на шаге интегрирования методом Булирша-Штера составляла менее 10^{-8} . Начальные орбиты частиц принимались такими же, как у 500 реальных астероидов, а также у различных комет и планетезималей из зон питания Юпитера и Сатурна. Эволюция орбит 20 тыс. пылевых частиц исследовалась до тех пор, пока частицы не покидали Солнечную систему или не сталкивались с Солнцем. Вычисления проводились для значений β (отношения силы радиационного давления к гравитационной силе) равных 0.0001, 0.0002, 0.0004, 0.001, 0.002, 0.004, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.25 и 0.4. Для силикатных частиц плотностью 2.5 г/см^3 , такие значения β ($\beta \sim 1/d$) соответствуют диаметрам d частиц 4700, 2400, 1200, 470, 240, 120, 47, 9.4, 4.7, 2.4, 1.9, и 1.2 мкм соответственно. При одинаковом значении β для водяного льда диаметр d в 2.5 раза больше, чем для силикатных частиц. В цитируемых выше работах по миграции пыли планеты рассматривались как материальные точки, но на основании элементов орбит, полученных с шагом 20 лет, вычислялись (аналогично расчетам для малых тел) средние вероятности P столкновений частиц за время их жизни с планетами и средние времена T , в течение которых перигелии орбит частиц были меньше большой полуоси орбиты планеты. Краткий обзор работ по миграции пыли приведен в разделе 8 статьи [59].

Для кометных и астероидных пылевых частиц вероятность p_E столкновения частиц с Землей имела максимум ($\sim 0.001-0.01$) при $0.002 \leq \beta \leq 0.01$, т.е. при $d \sim 100$ мкм (это значение d находится в соответствии с наблюдательными данными). Эти значения вероятности p_E для частиц обычно (кроме кометы 2P) были больше на порядок величины, чем для родительских комет. Рисунки, характеризующие значения вероятностей столкновений пылевых частиц различного происхождения с планетами при различных значениях β приведены в [99] (см. также рис. 1). В [106, 173] приводятся вероятности столкновений таких частиц с Луной, а также с зародышами Земли и Луны при их массах меньших в 10 раз современных масс. Вероятности столкновений пылевых частиц с Луной были в 16-33 раз меньше, чем с Землей, для частиц, стартовавших с астероидов и комет C10 и C39. Для частиц, стартовавших с комет Галлея типа и с долгопериодических комет, это отношение было в диапазонах 10-18 и 9-14 соответственно [173]. Показано, что астероидные частицы не доминируют на расстоянии от Солнца $R > 3$ а.е., а значительная часть частиц на расстоянии 3-7 а.е. имеет кометное происхождение. Чем мельче частицы (и, соответственно, чем больше β), тем больше доля частиц, уносимых солнечным ветром.

Пики в распределении астероидных пылевых частиц по большим полуосям их орбит, соответствующие резонансам $n:(n+1)$ с Землей и Венерой, и люки, связанные с резонансами 1:1 с этими планетами, более выражены для более крупных частиц [30]. Вероятность столкновения транснептуновой частицы диаметром $d < 10$ микрон с Землей всего лишь в несколько раз меньше, чем для астероидной частицы того же размера. Максимальные значения (порядка 0.1) вероятности столкновения частиц с Юпитером получены для частиц, образующихся за орбитой Юпитера, и для тел, первоначально двигавшихся по орбитам, близким к орбите кометы Энке. Вероятности столкновения транснептуновых частиц с Ураном и Нептуном могли достигать 0.1 при $\beta \sim 0.002-0.01$. Во всех остальных случаях вероятности столкновений тел и частиц с планетой-гигантом были меньше.

Большое количество вещества, включая воду и летучие, могло быть доставлено пылевыми частицами в зону питания планет земной группы сразу после того, как очистилась от газа зона вблизи орбит Юпитера и Сатурна, где оставалось большое количество пыли. Пыль могла быть более эффективной, чем тела, в доставке органического вещества к планетам. Это связано с тем, что пылевые частицы не подвергались интенсивному нагреву, когда они проходили через атмосферу (так как они имели большее отношение поверхности к массе). Поэтому пылевые частицы считаются более вероятным, чем крупные тела, источником переноса в межпланетной и межзвездной среде сложных органических молекул, в том числе биогенных элементов и соединений, входящих в состав микроорганизмов. Эти представления отвечают гипотезе панспермии, в которой пылевые частицы могли бы играть важную роль в зарождении жизни на Земле, как испытывающие значительно меньший нагрев при входе в атмосферу под небольшими углами атаки.

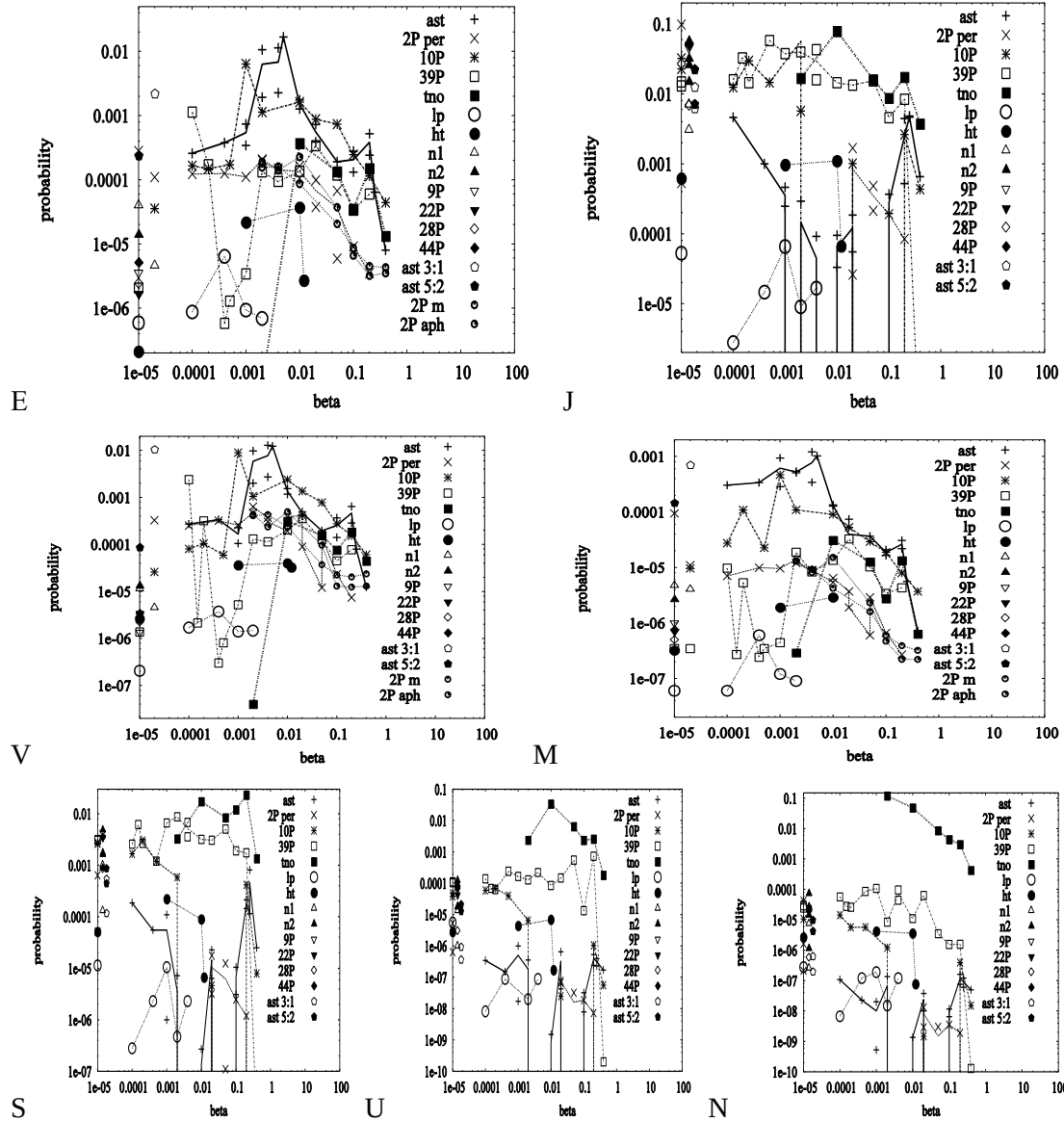


Рисунок 1. Вероятности столкновений различных частиц и тел с Землей (Е), Юпитером (J), Венерой (V), Марсом (M), Сатурном (S), Ураном (U) и Нептуном (N) при различных значениях параметра β для частиц, стартовавших с астероидов (ast), транснептуновых объектов (tno), кометы 2P/Encke в перигелии (2P per), кометы 2P в афелии (2P aph), кометы 2P в середине орбиты между перигелием и афелием (2P m), кометы 10P/Tempel 2 (10P), кометы 39P/Oterma (39P) и с долгопериодических комет (lp) при эксцентриситете $e=0.995$ и перигелийном расстоянии $q=0.9$ AU, и комет типа кометы Галлея (ht) при $e=0.975$ и $q=0.5$ AU (для серий lp и ht начальные наклонения были в интервале от 0 до 180°). Если при одном значении β на графике приведено два значения вероятности столкновений (полученных для разных расчетов), то график проводится через среднее значение. Значения вероятностей для тел ($\beta=0$) представлены при $\beta \sim 10^{-5}$. Вероятности, представленные только для тел, были получены для начальных орбит, близких к орбитам комет 9P/Tempel 1 (9P), 22P/Kopff (22P), 28P/Neujmin (28P), 44P/Reinmuth 2 (44P), и для тестовых астероидов при резонансах 3:1 и 5:2 с Юпитером при $e=0.15$ и $i=10^\circ$ ('ast 3:1' и 'ast 5:2'). Для серий 'n1' и 'n2', исходные орбиты частиц были близки к орбитам 10-20 различных комет семейства Юпитера.

Ипатовым проводились также расчеты миграции пылевых частиц, стартовавших с различных расстояний от Солнца. В каждом варианте расчетов a_0 варьировалось от $a_{\min}$ до $a_{\min}+2.5$ а.е. В [171, 173] приведены результаты расчетов миграции пылинок при $a_{\min}$ от 5 до 15 а.е., начальных эксцентриситетах и наклонениях орбит равных 0.3 и 15° соответственно. При $\beta=0.04$ значения p_{Sun} доли частиц, столкнувшихся с Солнцем, находились в диапазоне от 0.20 до 0.33 и,

как правило, были немного меньше при больших a_{omin} . При $\beta=0.0004$ (в [171, 173] ошибочно указано 0.004) значения p_{Sun} не превышали 0.03. При $\beta=0.04$ значения p_E и p_{Moon} вероятностей столкновений частиц с Землей и Луной на два порядка превышали значения для тел на аналогичных начальных орбитах (для таких тел p_E в среднем близко к $(2-4) \cdot 10^{-6}$). Как было получено для тел, при $\beta=0.0004$ значения p_E (и p_{Moon}) могут различаться на два порядка для различных расчетов с одинаковым a_{omin} . В частности, при $\beta=0.0004$ p_E принимало значения от $5.7 \cdot 10^{-7}$ до $4.9 \cdot 10^{-4}$. Для $\beta=0.04$ значения p_E (и p_{Moon}) для различных расчетов отличались меньше, чем для $\beta=0.0004$. Значения p_E/p_{Moon} находились в диапазоне от 16 до 31 для $\beta=0.04$ и в диапазоне от 14 до 22.5 для $\beta=0.0004$.

Проведены также расчеты миграции частиц при a_{omin} от 2.5 до 37.5 а.е. и начальных эксцентриситетах равных 0.05. Значения β равнялись 0.4, 0.04, 0.004 и 0.0004. Пылевые частицы, столкнувшиеся с Солнцем или планетами или выброшенные на гиперболические орбиты, исключались из дальнейшего интегрирования. Результаты этих расчетов пока не опубликованы. Большинство таких частиц выбрасывались из Солнечной системы, остальные частицы в основном выпадали на Солнце. Доля частиц, столкнувшихся с планетами, обычно не превышала 1%. При a_0 больше 17 а.е. вероятности столкновений тел с Землей были получены порядка 10^{-6} . Для пылевых частиц диаметром 10-100 микрон при $a_0 > 17$ а.е. вероятности их столкновений с Землей в большинстве рассмотренных вариантов расчетов были порядка 10^{-5} - 10^{-4} . Вероятности столкновений таких частиц с Венерой обычно отличались от вероятностей их столкновений с Землей не более, чем в двое. Вероятности столкновений таких частиц с Меркурием были в несколько раз (иногда на порядок) больше, чем с Марсом, и в несколько раз меньше, чем с Землей.

С миграцией пылевых частиц непосредственно связана природа зодиакального света. **Зодиакальный свет** виден с Земли как светлое диффузное свечение на западе после сумерек и на востоке перед рассветом, имеющее форму треугольника, яркость которого падает с увеличением элонгации (элонгация – это угловое расстояние между планетой и Солнцем с точки зрения земного наблюдателя). Он вызван облаком межпланетной пыли, которая лежит вдоль плоскости эклиптики и отражает солнечный свет.

Исходя из полученных в расчетах положений и скоростей мигрирующих пылевых частиц, стартовавших с различных малых тел (астероидов, комет, транснептуновых объектов) в [37, 155, 378-379, 414] рассматривалось, как изменяется спектр зодиакального света, спектр которого в целом совпадает с солнечным фраунгоферовым спектром, в случае рассеяния пылевыми частицами при различных значениях угла с вершиной в Земле между направлениями на Солнце и пылевую частицу. Определялись доплеровский сдвиг и ширина характерной линии Mg I. Строились графики зависимости характерной скорости этой линии (определяемой по доплеровскому сдвигу) от солнечной элонгации для ряда функций рассеяния света. Расчетные данные [37] сравнивались с данными WHAM (Wisconsin H-Alpha Mapper) наблюдений доплеровских сдвигов и ширины этой линии в зодиакальном свете. Было показано, что вклад в зодиакальный свет кометных частиц, образовавшихся внутри орбиты Юпитера, и частиц, образовавшихся за пределами орбиты Юпитера с учетом транснептуновых частиц примерно одинаков, и вклад каждой из этих двух составляющих в зодиакальный свет равен примерно 1/3 с возможным отклонением от 0.3 до 0.1–0.2. Доля астероидной пыли (третьей составляющей), оценивается в ~ 0.3 –0.5. Вклад частиц, порожденных долгопериодическими кометами и кометами галеевского типа, не превышает 0.1–0.15. Такой же вывод можно сделать для частиц, выбрасываемых кометами типа кометы Энке 2P (с $e \sim 0.8$ –0.9). Средние эксцентриситеты орбит зодиакальных частиц, находящихся на расстоянии 1–2 а.е. от Солнца, которые лучше соответствуют WHAM наблюдениям, находятся в диапазоне от 0.2 до 0.5, с более вероятным значением около 0.3.

15. Миграция тел и пылевых частиц, выброшенных с планет земной группы и Луны

Во время формирования планет на них выпадали крупные тела, столкновения с которыми могли приводить к выбросу вещества с планет. В настоящее время надежно идентифицировано свыше 140 лунных метеоритов. На 2020 год надёжно идентифицировано 266 марсианских метеоритов из числа всех найденных на Земле. Два метеорита, найденные в пустыне Сахара, могут быть фрагментами Меркурия. Известно, что значения угла выброса тел с планет в основном находятся между 20° и 55° , особенно между 40° и 50° .

В проведенных расчетах движение тел, выброшенных с планет земной группы, изучалось в течение динамического времени жизни T_{end} всех тел. За время T_{end} все тела сталкивались с

планетами или Солнцем или были выброшены из Солнечной системы (достигли 2000 а.е. от Солнца). При таких столкновениях и выбросе они исключались из дальнейшего интегрирования. При скоростях выброса, близких к параболической скорости, почти все выброшенные тела быстро выпадали обратно на планету. При больших скоростях выброса время T_{end} обычно составляло около 200–400 млн. лет (могло превышать миллиард лет). В каждом варианте расчетов изучалось движение 250 тел, выброшенных с небесного объекта при фиксированных значениях угла выброса i_{ej} , скорости выброса v_{ej} и точки выброса. Скорость v_{ej} выброса варьировалась от параболической скорости на поверхности планеты (Луны) до 20 км/с, а значения угла i_{ej} выброса варьировались от 15° до 90° .

Рассмотрено 6 противоположных точек выброса на поверхности планеты (рис. 1). Для точек выброса F и C движение тел начиналось от наиболее и наименее удаленных от Солнца точек поверхности планеты в направлении от Солнца к Земле, соответственно. Для точек выброса U и D тела стартовали с точек поверхности планеты с максимальным и минимальным значениями z (при оси Oz перпендикулярной плоскости орбиты планеты) соответственно. Точки F, C, U и D ниже называются средними. Для точек выброса W и B тела стартовали с точек поверхности планеты по ходу движения планеты и с противоположной стороны планеты соответственно. При изучении выброса тел с Луны рассматривалась только точка F на высоте h от Земли (в основном при h соответствующем радиусу орбиты Луны). Отметим, что при определении скорости тела относительно Солнца вектор скорости выброса тела с планеты суммируется с вектором скорости движения планеты относительно Солнца. Орбитальные скорости планет равны 47.36, 35.02, 29.78 и 24.13 км/с для Меркурия, Венеры, Земли и Марса соответственно. Средняя орбитальная скорость Луны относительно Земли равна 1.02 км/с. Если рассматривать не современную, а более близкую к Земле орбиту Луны, то нужно иметь в виду, что орбитальная скорость пропорциональна $r_{EM}^{-1/2}$, где r_{EM} – расстояние между Землей и Луной. Например, орбитальная скорость будет равна 3 км/с, если радиус орбиты зародыша Луны в 9 раз меньше большой полуоси современной орбиты Луны.

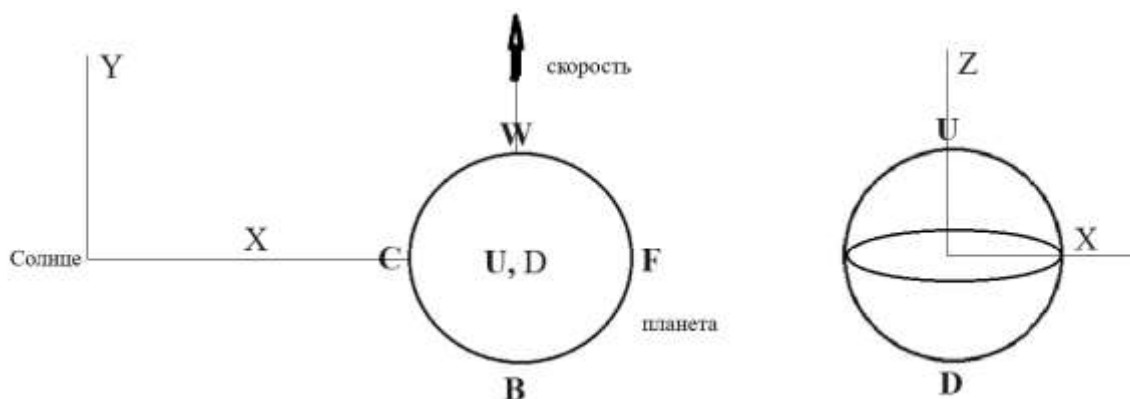


Рисунок 1. Расположение точек выброса на планете.

Учитывалось гравитационное влияние Солнца и всех восьми планет. Для интегрирования уравнений движения использовался симплектический алгоритм из пакета SWIFT (Levison H.F., Duncan M.J. Icarus. 1994. V. 108. P. 18–36). Рассматриваемый шаг по времени t_s равнялся 1, 2, 5 или 10 суткам, и сравнивались результаты расчетов при разных t_s . В большинстве вариантов расчетов шаг t_s равнялся 5 суткам при изучении выброса тел с Земли и Марса и равнялся 1 и 2 суткам при выбросе тел с Меркурия и Венеры соответственно. Вероятности столкновений тел с Луной рассчитывались на основе массивов элементов орбит мигрировавших тел (хранящихся с шагом 500 лет) аналогично [28, 55].

Выброс тел с Земли: Движение тел, выброшенных с Земли, и вероятности их столкновений с планетами изучались в [63, 65, 118, 124, 512, 514, 516, 518] в течение динамического времени жизни T_{end} всех тел в варианте расчетов. В большинстве вариантов расчетов тела стартовали с поверхности Земли. В разных вариантах значения i_{ej} угла выброса равнялись 15° , 30° , 45° , 60° , 89° или 90° . Скорость v_{ej} выброса тел с Земли варьировалась от 11.22 до 20 км/с (равнялась в основном 11.22, 11.5, 12, 14, 16.4 и 20 км/с). В статьях [63, 65] приведены графики и таблицы, характеризующие вероятности столкновений тел, выброшенных с Земли, с планетами и Луной

при различных скоростях и углах выброса, различных точках выброса и различных интервалах времени после выброса. Ниже для примера на рис. 2 приведены вероятности столкновений с планетами тел, выброшенных с Земли при скорости 12 км/с с различными углами выброса. Гораздо большее число аналогичных рисунков приведено в [65] для $T=T_{\text{end}}$ и $T=10$ млн лет.

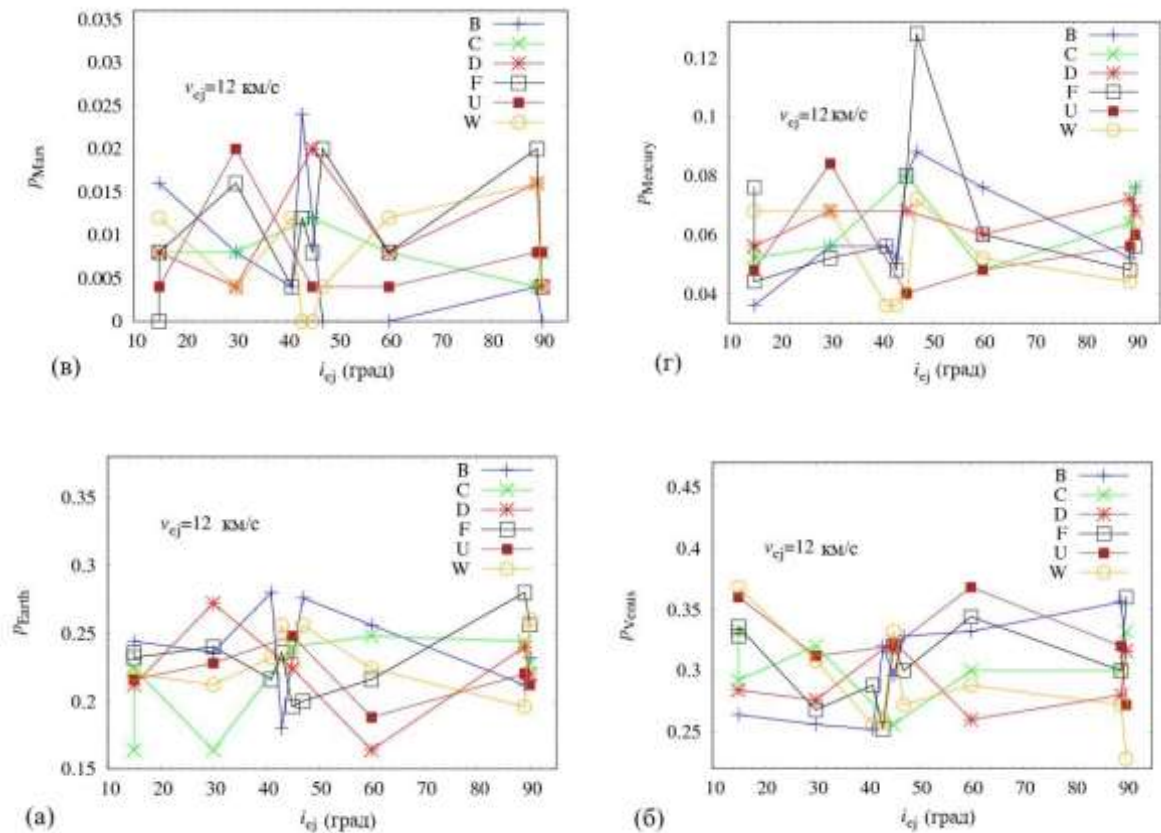


Рисунок 2. Графики вероятностей столкновений тел, выброшенных с Земли и выпавших на Землю (а), Венеру (б), Марс (в) и Меркурий (г) при скорости выброса $v_{ej}=12$ км/с для точек выброса В, С, D, F, U и W в зависимости от угла выброса i_{ej} ($15-90^\circ$). Значения вероятности, приведенные при i_{ej} около 45° , получены при $i_{ej}=45^\circ$, но при разной точности интегрирования на шаге. Отличия в этих значениях показывают случайный разброс значений вероятности вследствие небольшого варьирования начальных данных и модели расчетов.

Среднее значение вероятности p_E столкновения выброшенного тела с Землей зависит от распределения тел по v_{ej} и i_{ej} . При скоростях выброса $v_{ej} \leq 11.3$ км/с, т.е. немного больших параболической скорости, большинство выброшенных тел выпадали на Землю. При скорости выброса v_{ej} , равной 11.5 и 12 км/с, значения p_E не сильно отличались для различных точек старта на поверхности Земли и за весь рассмотренный интервал времени были в диапазонах 0.25-0.35 и 0.16-0.27 соответственно. При выбросе из точки С на поверхности Земли значения p_E могли быть равными или большими или меньшими (менее чем в 1.7 раза), чем при выбросе из точки F, но в среднем по различным вариантам расчетов были примерно одинаковыми. Для всех точек выброса при $T=10$ млн лет и $i_{ej}=45^\circ$, значения p_E были в диапазонах 0.2-0.28 и 0.12-0.16 при скорости выброса v_{ej} , равной 11.5 и 12 км/с соответственно. Единственное существенное отличие было при выбросе с передней точки W движения Земли при $v_{ej}=16.4$ км/с и $i_{ej}=45^\circ$. В этом случае 80% тел было выброшено на гиперболические орбиты, а 17% столкнулись с Солнцем. Среднее значение p_E зависит от распределения тел по v_{ej} и i_{ej} . При $T=10$ млн лет, выбросе из точки F и $30 \leq i_{ej} \leq 60$ град, значение p_E составляло около 0.28, 0.15-0.17 и 0.06 при v_{ej} , равном 11.5, 12 и 16.4 км/с соответственно. При $i_{ej}=90^\circ$ в одних вариантах p_E было меньше, чем при $i_{ej} \leq 60^\circ$, а в других вариантах было больше. При выбросе из точки F и $i_{ej}=90^\circ$, значение p_E вдвое меньше, чем при $i_{ej} \leq 60^\circ$, для $v_{ej}=11.5$ км/с, но немного (примерно в 1.3-1.4 раза) больше при $v_{ej} \geq 12$ км/с.

Ниже в табл. 1 приведены вероятности столкновений тел, выброшенных с Земли, с Землей, Венерой, Меркурием, Марсом и Солнцем (p_E , p_V , p_{me} , p_{ma} , p_{sun}) и вероятности выброса p_{ej} на гиперболические орбиты за весь рассмотренный интервал времени (при $T=T_{end}$) для нескольких значений v_{ej} скорости выброса и четырех точек выброса C, D, F и U. Диапазон значений вероятностей был получен для различных углов выброса. Для двух других точек выброса вероятности могли отличаться от значений, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Вероятности столкновений тел, выброшенных с Земли, с Землей, Венерой, Меркурием, Марсом и Солнцем (p_E , p_V , p_{me} , p_{ma} , p_{sun}) и вероятности их выброса p_{ej} на гиперболические орбиты.

v_{ej}	p_E	p_V	p_{me}	p_{ma}	p_{sun}	p_{ej}
11.3	0.45-0.55	0.18-0.25	0.02-0.06	0-0.016	0.1-0.25	0.01-0.04
11.4	0.3-0.45	0.23-0.33	0.02-0.08	0-0.02	0.2-0.32	0.01-0.05
11.5	0.25-0.35	0.22-0.33	0.02-0.08	0-0.016	0.22-0.33	0.02-0.06
12	0.16-0.27	0.25-0.37	0.04-0.08	0-0.02	0.3-0.45	0.02-0.08
14	0.1-0.2	0.2-0.3	0.04-0.1	0-0.02	0.35-0.5	0.03-0.15
16.4	0.1-0.15	0.18-0.25	0.03-0.1	0-0.025	0.2-0.5	0.05-0.33
20	0.08-0.15	0.15-0.25	0.05-0.1	0-0.012	0.2-0.6	0-0.4

В рассмотренных вариантах при $T=10$ млн лет и $i_{ej}=45^\circ$, значения вероятности p_V столкновения тела, выброшенного с Земли, с **Венерой** были в диапазонах 0.16-0.22 и 0.13-0.18 при v_{ej} , равном 11.5 и 12 км/с соответственно. При $T=T_{end}$ и $11.5 \leq v_{ej} \leq 12$ км/с значения p_V были в диапазоне 0.22-0.37. Общее количество тел, доставленных на Землю и Венеру, вероятно, не сильно отличалось. В основном отношение p_V/p_E вероятности p_V столкновения тела с Венерой к его вероятности p_E столкновения с Землей было меньше при меньших скоростях выброса.

При $T=T_{end}$ (за весь рассмотренный интервал времени) вероятности столкновений тел с **Меркурием и Марсом** были в диапазонах 0.02–0.08 и 0–0.025 соответственно. В большинстве вариантов расчетов вероятность столкновения тела с **Солнцем** составляла около 0.05–0.2 при $T=10$ млн лет, а при $T=T_{end}$ могла достигать 0.5.

Значения вероятности p_{ej} **выброса тел на гиперболические орбиты** при $T=T_{end}$ превышали значения при $T=10$ млн лет обычно не более, чем в 2 раза. Значения p_{ej} в различных сериях расчетов были в диапазоне 0.016–0.064 при $T=T_{end}$, $30^\circ \leq i_{ej} \leq 60^\circ$ и $11.5 \leq v_{esc} \leq 12$ км/с. При $v_{ej}=16.4$ км/с значения p_{ej} могли достигать 0.8, а при $v_{ej}=20$ км/с и выбросе из точки W по ходу движения Земли все тела могли выбрасываться на гиперболические орбиты. При выбросе из точки F вероятность p_{ej} за $T=10$ млн лет в зависимости от скорости выброса принимала значения от менее 0.01 при ($v_{ej}=11.5$ км/с, $30^\circ \leq i_{ej} \leq 60^\circ$) до 0.24-0.38 при ($v_{ej}=16.4$ км/с, $30^\circ \leq i_{ej} \leq 45^\circ$).

Значения вероятности столкновений выброшенных с Земли тел с **Луной** на ее современной орбите были порядка 0.01–0.02 при $v_{ej}=11.3$ км/с и 0.005–0.008 при $v_{ej}=16.4$ км/с. В [63] отмечалось, что для того, чтобы Луна содержала современное количество железа и приобрела большую часть своей массы за счет выброшенной мантии Земли, она должна была приобрести значительную часть своей массы, двигаясь недалеко от Земли.

Средние скорости столкновений выброшенных тел с Землей и Луной тем больше, чем больше скорость выброса. При скорости выброса, равной 11.3, 11.5, 12, 14 и 16.4 км/с значения скоростей столкновений составили около 13, 14–15, 14–16, 14–20 и 14–25 км/с соответственно для Земли и были в пределах 7–8, 10–12, 10–16 и 11–20 км/с для Луны.

Выброс тел с Земли за последние десятки миллионов лет: В [56] мы получили, что 15-километровые лунные кратеры были созданы 1-километровыми ударниками. Количество 15-километровых лунных кратеров, образовавшихся за последний миллиард лет, составляет около 50. Отношение вероятностей столкновений околоземных объектов с Землей и Луной было оценено в [56] как равное 22. Таким образом, количество 1-километровых тел, которые выпали на Землю за последний миллиард лет, можно оценить примерно в 1000, т. е. происходил примерно 1 удар за 1 млн лет. Ударники диаметром $d_i=10$ -15 км образовали на Земле кратер Чиксулуб (с диаметром $D_{cr}=150$ -200 км и возрастом $T_{cr}=65.5$ млн лет), кратер Вредефорт (с $D_{cr}=170$ -300 км и $T_{cr}=2.02$ млрд лет) и кратер Садбери (с $D_{cr}=130$ км и $T_{cr}=1.85$ млрд лет). Считается, что d_i может быть 20-25 км для кратера Вредефорт. Кратер Попигай является четвертым по величине подтвержденным ударным кратером на Земле (с $D_{cr}=90$ -100 км и $T_{cr}=35.7$ млн лет). Он мог быть образован

ударником с диаметром $d_i=8$ км. Предполагается, что ударники, которые создали вышеуказанные кратеры, пришли из пояса астероидов. Некоторые тела, выброшенные из кратеров десятки миллионов лет назад, могут до сих пор находиться в зоне планет земной группы и могут выпадать на эти планеты. При изучении естественного переноса микробов между Марсом и Землей допускаются жизнеспособные прибытия микробов после времени полета менее 1 миллиона лет. В моих расчетах из 6000 тел, выброшенных с Земли, только одно столкнулось с Марсом за 1 млн. лет (через 0.46 млн. лет при выбросе из точки W). Для 6000 тел вероятность их столкновений с Марсом за 1 млн лет равна 0.00017 (была около двух десятитысячных).

Выброс тел с Луны и выпадения тел, выброшенных с планет, на Луну: При выбросе тел с Луны на ее современной орбите вероятности столкновений выброшенных тел с планетами были аналогичны вероятностям столкновений тел, выброшенных с Земли, если рассматривать меньшие скорости выброса с Луны, чем с Земли [124, 215, 514, 518, 519, 529, 532]. Например, вероятность столкновения выброшенных с Луны тел с Землей была в диапазоне 0.27-0.35 при $v_{ej}=2.5$ км/с, 0.2-0.25 при $v_{ej}=5$ км/с, и 0.1-0.14 при $12 \leq v_{ej} \leq 16.4$ км/с. При выбросе тел из точки F на Луне, $T=10$ млн лет и $30^\circ \leq i_{ej} \leq 60^\circ$, отношение p_v/p_E вероятностей столкновений выброшенных тел с Венерой и Землей составляло около 0.6–0.9 при $v_{ej}=2.5$ км/с, 0.9-1.3 при $v_{ej}=5$ км/с, 1.3-1.5 при $11.5 \leq v_{ej} \leq 12$ км/с, 0.6-0.8 при $v_{ej}=16.4$ км/с, соответственно. Вероятности столкновений с планетами земной группы для тел, выброшенных с Луны на её современной орбите при нескольких значениях скорости выброса, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Вероятности столкновений с планетами для тел, выброшенных с Луны на её современной орбите, (интервалы для разных углов выброса) при нескольких значениях скорости выброса

Скорость выброса, в км/с	2.5	5	12	16.4	2.5-16.4
Меркурий	0.044-0.072	0.052-0.108	0.048-0.072	0.048-0.076	0.04-0.1
Венера	0.28-0.324	0.276-0.312	0.204-0.232	0.172-0.18	0.2-0.3
Земля	0.272-0.324	0.2-0.252	0.108-0.164	0.1-0.132	0.1-0.2
Марс	0.008-0.016	0.004-0.016	0.004-0.008	0-0.012	0-0.02

Кроме изучения выброса тел с Луны, находившейся на ее современном расстоянии от Земли на линии Солнце-Земля-Луна, проводились также расчеты для модели, когда Луна находилась ближе к Земле. Считалось, что в начальный момент времени тела находились на линии Солнце-Земля-Луна на высоте h над поверхностью Земли, равной $h=3r_E$, $h=5r_E$, $h=7r_E$ или $h=36r_E$ (расстояние r_{ME} от центра Земли больше, чем h , на r_E : $r_{ME}=h+r_E$), где r_E – радиус Земли. Эти расчеты выброса соответствуют точке F.

Все тела, выброшенные с лунного зародыша, двигавшегося близко к Земле, выпадали на Землю и Луну, если их начальная скорость была меньше соответствующей параболической скорости. При $v_{ej}=2.5$ км/с и радиусе r_{ME} орбиты зародыша, равном $4r_E$, динамическое время жизни выброшенных тел было менее 5 сут. При $r_{ME}=6r_E$ и $v_{ej}=2.5$ км/с большинство выброшенных тел быстро выпадали на Землю, но при $i_{ej} \leq 30^\circ$ часть тел покидала сферу Хилла Земли. При $v_{ej}=5$ км/с (параболическая скорость Земли при $r_{ME}=6r_E$ равна 4.57 км/с) и $T=T_{end}$ значения p_E находились в диапазоне (для разных i_{ej}) 0.26-0.37, 0.25-0.29 и 0.20-0.22 для $r_{ME}=6r_E$, $r_{ME}=8r_E$ и для современной орбиты соответственно, то есть значения p_E были немного больше для меньшей орбиты зародыша Луны. При $v_{ej}=12$ км/с значения p_E практически не зависели от начальной орбиты зародыша Луны и находились в диапазоне 0.13-0.14, 0.11-0.14 и 0.11-0.16 для $4r_E \leq h \leq 6r_E$, $h=8r_E$ и нынешней орбиты Луны соответственно. При скоростях выброса немного больших параболической скорости, значения p_E приблизительно одинаковы для выброса тел с Земли и Луны, но для разных скоростей выброса.

В нескольких случаях (при радиусе орбиты зародыша Луны $r_{ME}=4r_E$, $v_{ej}=5$ км/с, $i_{ej}=30^\circ$; $r_{ME}=6r_E$, $v_{ej}=2.5$ км/с, $15^\circ \leq i_{ej} \leq 30^\circ$; $r_{ME}=8r_E$, $v_{ej}=2.5$ км/с, $15^\circ \leq i_{ej} \leq 45^\circ$) некоторые (47-71%) выброшенные тела продолжали двигаться вокруг Земли и через 100 млн лет. Столкновения тел с Луной в расчетах не учитывались. Таким образом, на самом деле такие тела должны были бы столкнуться с Луной.

При $r_{ME}=6r_E$ и $v_{ej}=2.5$ км/с не было получено столкновений выброшенных тел с Венерой, Меркурием и Марсом. При $r_{ME}=6r_E$ и $v_{ej}=5$ км/с вероятности столкновений тел с Меркурием, Венерой и Марсом находились в диапазонах 0.036-0.072, 0.276-0.34 и 0-0.016 соответственно. Эти

диапазоны мало отличаются от значений для современной орбиты Луны и $v_{ej}=5$ км/с, хотя вероятности столкновений с Землей при $r_{ME}=6r_E$ и $v_{ej}=5$ км/с немного больше (0.256-0.368), чем значения (0.2-0.25) в табл. 2 при $v_{ej}=5$ км/с и современной орбите Луны. При $v_{ej}\geq 12$ км/с вероятности столкновений тел для всех планет земной группы были близки для разных $r_{ME}\geq 6r_E$. Для $h=36r_E$ вероятности p_E столкновений тел, выброшенных с Луны, с Землей находились в диапазоне 0.07-0.2 при $30^\circ\leq i_{ej}\leq 60^\circ$ и $11.2\leq v_{ej}\leq 16.4$ км/с и были больше при меньших скоростях выброса.

При $v_{ej}=5$ км/с, $15^\circ\leq i_{ej}\leq 89^\circ$, $T=T_{end}$ и $h=5r_E$, значение p_E было около 0.3 (0.26-0.37). Такие расчёты при $h>0$ соответствуют движению тел, выброшенных с Луны, хотя гравитационное влияние Луны и её движение вокруг Земли не учитывались при интегрировании уравнений движения. В этом случае реальные скорости выброса тел с Луны немного отличались от скоростей, использованных в расчётах. Расчёты при $3r_E\leq h\leq 36r_E$ соответствуют случаю, когда Луна ещё не достигла своей нынешней орбиты.

Отношение k_{em} **вероятностей столкновений тел с Землей и Луной**, движущейся по ее современной орбите, для тел, выброшенных с планет земной группы, было получено в основном в диапазоне от 15 до 30. Это отношение отличалось для различных тел и в основном было меньше при больших скоростях выброса тел с Земли, Венеры и Марса. При $i_{ej}=45^\circ$ и выбросе из точки F на поверхности планеты это отношение равнялось 30, 29 и 18 при выбросе с Венеры со скоростью, равной 10.5, 12 и 20 км/с соответственно. При выбросе с Марса это отношение равнялось 23, 23 и 14 при v_{ej} , равном 5.3, 6 и 20 км/с, а при выбросе с Меркурия это отношение равнялось 19, 16 и 21 при v_{ej} , равном 5.3, 6 и 20 км/с соответственно.

Вероятности p_E столкновений тел, выброшенных с Марса и выпавших на Землю, для точек C, D, F, U и W в основном составляли около 0.08-0.16 и 0-0.16 при $5.05\leq v_{ej}\leq 10$ и $15\leq v_{ej}\leq 20$ км/с соответственно. Для точки В значение p_E могло превышать 0.24. При $p_E=0.1$ и отношении вероятностей столкновений тел с Землей и Луной равным $k_{em}=20$, вероятность столкновения тела, выброшенного с Марса, с Луной можно оценить равной $p_{moon}=0.005$. Вероятности p_E столкновений тел, выброшенных с Меркурия и выпавших на Землю, были меньше 0.03-0.05 (в зависимости от точки выброса) при $4.23\leq v_{ej}\leq 6$ км/с. Для больших скоростей в некоторых вариантах p_E достигало 0.2. При $p_E=0.04$ и $k_{em}=20$ такую вероятность столкновения тела, выброшенного с Меркурия, с Луной можно оценить равной $p_{moon}=0.002$. Для «средних» точек C, D, F и U при $10.4\leq v_{ej}\leq 16$ км/с, доля p_E тел, выброшенных с Венеры и столкнувшихся с Землей, составляла около 0.04-0.1 при $i_{ej}=45^\circ$, и могла достигать около 0.2 при $i_{ej}=89^\circ$. При $p_E=0.09$ и $k_{em}=30$ вероятность столкновения тела, выброшенного с Венеры, с Луной можно оценить равной $p_{moon}=0.003$.

Результаты расчетов выброса тел с Марса, Меркурия и Венеры представлены пока кратко в тезисах и трудах конференций [121, 215, 519, 523, 525-529, 533, 536]. На конец 2025 г. расчеты по выбросу тел с планет земной группы и Луны были завершены, а расчеты по миграции пыли еще продолжались для крупных пылевых частиц. Подготовка журнальных статей по выбросу тел с Марса, Меркурия, Венеры и Луны, а также по выбросу пылевых частиц с планет земной группы начнется в 2026 г.

Выброс тел с Марса: Скорость выброса v_{ej} тел с Марса в проведенных расчетах равнялась в основном 5.05, 5.1, 5.3, 5.5, 6, 8, 10, 15 и 20 км/с. Вероятность p_{Ma} столкновения тела, выброшенного с Марса, с **Марсом** была значительной только при скорости выброса v_{ej} , близкой к параболической скорости. Для точек C, D, F и U (находившихся на пересечении поверхности планеты и плоскости, проходящей через Солнце и центр планеты и перпендикулярной плоскости орбиты планеты) значения вероятности p_{Ma} столкновения тела, выброшенного с Марса, с Марсом в основном составляли около 0.04-0.25, 0.01-0.04 и 0-0.02 при $5.05\leq v_{ej}\leq 5.3$, $5.5\leq v_{ej}\leq 10$ и $15\leq v_{ej}\leq 20$ км/с соответственно. Для точки В (на поверхности планеты сзади по ходу движения планеты) значение p_{Ma} было обычно меньше, чем для указанных выше точек. Для точки W (на поверхности планеты спереди по ходу движения планеты) значение p_{Ma} могло превышать 0.3 при $v_{ej}=5.05$ км/с и $p_{Ma}=0$ при $15\leq v_{ej}\leq 20$ км/с.

Вероятности p_E столкновений тел, выброшенных с Марса, с **Землей** для точек C, D, F и U в основном составляли около 0.08-0.16 и 0-0.16 при $5.05\leq v_{ej}\leq 10$ и $15\leq v_{ej}\leq 20$ км/с соответственно. Для точки В значение p_E могло превышать 0.24. Для точки W значения p_E находились в диапазоне от 0 до 0.15. Некоторые тела, выброшенные с Марса, могли столкнуться с Землей через 0.1 млн лет, а некоторые из тел могли столкнуться с Землей через сотни миллионов лет. Например, при выбросе из точки F при $v_{ej}=6$ км/с, $i_{ej}=45^\circ$ и $N_0=250$ было 32 столкновения тел с Землей между 0.22 и 270.9 млн лет. Среди этих столкновений было 4, 7, 6, 7, 2, 4 и 2 столкновений в моменты времени $t<1$,

1< t <5, 5< t <20, 20< t <50, 50< t <200 и t >200 млн лет соответственно. При этом около половины тел, выброшенных с Марса, столкнулись с Землей после 20 млн лет, а некоторые марсианские метеориты могли путешествовать в космосе десятки миллионов лет до их столкновений с Землей.

Для точек С, D, F и U вероятности p_V столкновений тел, выброшенных с Марса, с **Венерой** в основном составляли около 0.08-0.2 и 0.02-0.2 при $5.05 \leq v_{ej} \leq 10$ и $15 \leq v_{ej} \leq 20$ км/с соответственно. При $v_{ej} \geq 5.2$ км/с значения p_V часто были немного больше p_E . При выбросе из точки В значение p_V могло превышать 0.3. Для точки W значения p_V находились в диапазоне от 0 до 0.18.

При $v_{ej} \geq 6$ км/с доля тел, выброшенных с Марса и затем столкнувшихся с **Меркурием**, обычно была меньше 0.06 и превышала долю тел, столкнувшихся с Марсом. Для выброса из точек С, D, F и U доля тел, столкнувшихся с Меркурием, была в основном в диапазоне 0.02-0.08 при $5.05 \leq v_{ej} \leq 20$ км/с. Для точки В значение p_{me} находилось в более широком диапазоне (0.016-0.2), чем для четырех выше перечисленных «средних» точек. При выбросе из точки W получено $p_{me}=0$ при $15 \leq v_{ej} \leq 20$ км/с, и p_{me} могло превышать 0.06 при $v_{ej}=5.1$ км/с.

Для точек С, D, F, U и В значения доли тел, столкнувшихся с **Солнцем**, обычно находились в диапазоне от 0.2 до 0.9. Обычно при $5.1 \leq v_{ej} \leq 8$ км/с более половины выброшенных тел сталкивались с Солнцем. Вероятность **выброса тела на гиперболическую орбиту** была меньше 0.1 при $v_{ej} \leq 6$ км/с, но могла превышать 0.9 при $v_{ej}=20$ км/с. Для точки W и $15 \leq v_{ej} \leq 20$ км/с почти все тела были выброшены на гиперболические орбиты. Для точки В на гиперболические орбиты было выброшено менее 10% тел. Для остальных четырех точек вероятность такого выброса варьировалась от 0.02 до 0.9 в зависимости от скорости выброса и угла выброса.

Выброс тел с Меркурия: Скорость выброса v_{ej} тел с Меркурия в расчетах в основном полагалась равной 4.23, 4.25, 4.3, 4.5, 5, 6, 8, 10, 15 и 20 км/с. Более половины тел, выброшенных с Меркурия, обычно выпадали обратно на Меркурий. Вероятности столкновений выброшенных тел с планетами зависят от скоростей выброса v_{ej} , углов выброса i_{ej} и точек выброса. Для $4.23 \leq v_{ej} \leq 6$ км/с и точки F получено, что $p_{ej} \leq 0.004$, $p_{Sun} \leq 0.1$, $0.6 \leq p_{Me} \leq 0.97$, $0.02 \leq p_V \leq 0.3$, $p_E \leq 0.04$ и $p_{Ma} \leq 0.004$. Вероятности выброса из точек С, D и U сильно не отличались от вероятностей для точки F. Для $4.23 \leq v_{ej} \leq 6$ км/с и точки В получено, что $p_{ej} \leq 0.01$, $p_{Sun} \leq 0.1$, $0.65 \leq p_{Me} \leq 0.85$, $0.1 \leq p_V \leq 0.25$, $p_E \leq 0.03$ и $p_{Ma} \leq 0.004$. Для $4.23 \leq v_{ej} \leq 6$ км/с и точки W получено, что $p_{ej} \leq 0.004$, $p_{Sun} \leq 0.2$, $0.3 \leq p_{Me} \leq 1$, $p_V \leq 0.5$, $p_E \leq 0.05$ и $p_{Ma}=0$. Для точки W вероятности p_{Me} и p_V могут достигать больших значений, чем для других точек. Часто при больших значениях v_{ej} были получены большие значения p_{ej} , p_{Sun} , p_V , p_E и p_{Ma} , но это может быть неверно для $v_{ej} > 8$ км/с. Значения p_{Me} обычно были меньше при больших v_{ej} . Значения p_V обычно были в несколько раз больше, чем p_E , при этом разница была больше для меньших скоростей выброса. Вероятности столкновений тел, выброшенных с Меркурия, с Землей обычно не превышали 0.05 и 0.1 при v_{ej} менее 8 км/с и 15 км/с соответственно. Вероятности p_V столкновений тел, выброшенных с Меркурия, с Венерой обычно составляли около 0.1–0.4 при скоростях выброса от 4.3 до 10 км/с. Для «средних» точек С, D, F и U значения вероятности p_V составляли около 0.2-0.4 при $6 \leq v_{ej} \leq 10$ км/с. Доля тел, выброшенных на гиперболические орбиты, не превышала 0.02 для большинства вариантов расчетов. Не более 20% тел обычно сталкивалось с Солнцем. При выбросе из точки W при $v_{ej} \geq 6$ км/с для ряда значений i_{ej} и v_{ej} около половины тел сталкивались с Венерой. Реже большинство выброшенных из точки W тел столкнулись с Солнцем или покинули Солнечную систему.

Для больших скоростей выброса вероятности столкновений тел с планетами могут сильно различаться для точек F, W и В, а также для углов выброса. При выбросе из точки F и $v_{ej}=20$ км/с получено, что $0.004 \leq p_{ej} \leq 0.1$, $0.14 \leq p_{Sun} \leq 0.4$, $0.3 \leq p_{Me} \leq 0.44$, $0.12 \leq p_V \leq 0.4$, $0.02 \leq p_E \leq 0.1$ и $p_{Ma} \leq 0.008$. При $v_{ej}=20$ км/с, $i_{ej} \geq 30^\circ$ и выбросе из точки В было получено, что $0.9 \leq p_{Me} \leq 0.95$, а все остальные тела сталкивались с Солнцем (столкновений тел с другими планетами не было, и выброс тел из Солнечной системы тоже не происходил). При $v_{ej}=20$ км/с и выбросе из точки W вероятности были разными для разных углов выброса: Для $i_{ej}=30^\circ$ получено: $p_{ej}=0.044$, $p_{Sun}=0.268$, $p_{Me}=0.144$, $p_V=0.284$, $p_E=0.24$ и $p_{Ma}=0.02$. Для $i_{ej}=89^\circ$ большинство тел было выброшено из Солнечной системы ($p_{ej}=0.744$), а все остальные тела столкнулись с Солнцем.

Выброс тел с Венеры: Скорость выброса v_{ej} тел с Венеры в расчетах принималась в основном равной 10.36, 10.4, 10.5, 10.6, 11, 12, 14, 16 и 20 км/с. Ниже в этом абзаце обсуждаются значения вероятностей столкновений с планетами для тел, выброшенных с Венеры из точек С, D, F и U при скоростях выброса от 10.4 до 16 км/с. При этом доля p_{ej} тел, выброшенных на гиперболические орбиты, не превышала 0.06, доля p_{Sun} тел, столкнувшихся с Солнцем, составляла около 0.1-0.4, доля p_{Me} тел, столкнувшихся с Меркурием, была около 0.01-0.2, доля p_V тел, столкнувшихся с Венерой, составляла около 0.3-0.8, а доля p_E тел, столкнувшихся с Землей, была

около 0.04-0.2 (была в несколько раз меньше, чем p_V). Значения p_{Sun} при $v_{ej}=16$ км/с были примерно в 2 раза больше, чем при $v_{ej}=10.4$ км/с. Значения p_{Me} при $v_{ej}=16$ км/с были примерно в несколько раз (от 2 до 10 в зависимости от точки выброса и i_{ej}) больше, чем при $v_{ej}=10.4$ км/с. Значения p_V имеют некоторую тенденцию (но не при всех начальных данных) быть меньше при больших v_{ej} . Вероятности столкновений тел с Марсом часто не превышали 0.01 для всех рассмотренных начальных данных.

Для «средних» точек выброса C, D, F и U при $v_{ej}=20$ км/с значения p_{ej} были около 0.25-0.32 при $i_{ej}=45^\circ$ и могли быть около 0.02 при $i_{ej}=89^\circ$; значения p_{Sun} были около 0.15-0.3; p_{Me} - около 0.1-0.15; p_V - около 0.23-0.35; значения p_E были около 0.04-0.1 при $i_{ej}=45^\circ$ и могли быть около 0.2 при $i_{ej}=89^\circ$. Для точки В значения p_{ej} в основном были меньше 0.04, значения p_{Sun} были около 0.07-0.3, p_{Me} - около 0.02-0.35 (с максимумом при $v_{ej}=20$ км/с), p_V - около 0.4-0.8, значения p_E были около 0.04-0.2 (но равнялись 0.01 при $v_{ej}=20$ км/с и $i_{ej}=89^\circ$). Для точки W при $v_{ej}\leq 12$ км/с значения p_{ej} в основном были меньше 0.06, значения p_{Sun} были около 0.1-0.4, значения p_{Me} были около 0.01-0.1, значения p_V были около 0.3-0.8, а p_E было около 0.1-0.2. Больше тел было выброшено из Солнечной системы при большей скорости выброса v_{ej} . В случае $v_{ej}=20$ км/с доля выброшенных тел составила около 0.8 при $i_{ej}=45^\circ$, а все тела были выброшены при $i_{ej}=89^\circ$.

Выброс пылевых частиц с планет земной группы. Численно исследовалась миграция пылевых частиц, выброшенных с различными скоростями из точек F, В и W на поверхности планет земной группы. Рассматривался выброс. Значения скоростей выброса были такими же, как и для тел. Угол выброса равнялся 45° . При интегрировании уравнений движения учитывалось гравитационное влияние Солнца и всех планет, радиационное давление, эффект Пойтинга-Робертсона и солнечный ветер. Относительная ошибка на шаге интегрирования методом Булирша-Штера составляла менее 10^{-8} . Эволюция орбит пылевых частиц исследовалась до тех пор, пока частицы не покидали Солнечную систему или не сталкивались с Солнцем или с планетами. Вычисления проводились для значений β (отношения силы радиационного давления к гравитационной силе), равных 0.00004, 0.0004, 0.004, 0.04 и 0.4 (то есть для диаметров силикатных частиц около 1 см, 1 мм, 100, 10 и 1 микрон). Результаты этих расчетов пылевых частиц пока представлены только кратко в [527].

Получено что около половины микронных частиц выпадали на Солнце, а около половины микронных частиц выбрасывались из Солнечной системы. При выбросе с Земли с небольшими скоростями немного более половины микронных частиц выпадали на Солнце, а при выбросе частиц со скоростями большими 12 км/с обычно больше половины частиц выбрасывались из Солнечной системы. При выбросе микронных частиц с Марса и Меркурия из точки В (сзади по ходу движения планеты) обычно больше половины частиц выпадали на Солнце, а при выбросе микронных частиц из точки W (по ходу движения планеты) обычно больше половины частиц выбрасывались из Солнечной системы, причем при больших скоростях выброса все такие частицы могли покидать Солнечную систему.

Почти все 10-100-микронные и миллиметровые частицы, выброшенные с планет земной группы, обычно выпадали на Солнце, если скорости их выброса не были велики. При скорости выброса $v_{ej}=16$ км/с из точки F на Земле около 10% 10-микронных частиц и около 20% миллиметровых частиц покидали Солнечную систему. При скорости выброса $v_{ej}=20$ км/с из точки W все 100-микронные частицы, выброшенные с Земли, покидали Солнечную систему. В большинстве вариантов расчетов время динамической жизни 1-100 микронных частиц не превышало 1 млн лет, в то время как некоторые выброшенные тела могли двигаться в зоне планет земной группы сотни миллионов лет. Не более 4% миллиметровых частиц, выброшенных с Земли, Венеры и Марса, выпадали на планеты. Доля выброшенных тел, выпадавших на планеты, могла быть больше для планет более близких к Солнцу. При выбросе со скоростью $v_{ej}=4.23$ км/с из точек F и W на Меркурии около 8-10% миллиметровых частиц выпадали обратно на Меркурий.

16. Автоматическое удаление следов космических лучей со снимков, сделанных космическим аппаратом Дип Импакт (Deep Impact)

В 2005-2006 гг. С.И. Ипатов был членом команды Дип Импакт (англ. Deep Impact), руководимой Майклом Ахерном (Michael A'Hearn). Космический аппарат (КА) НАСА Дип Импакт впервые в истории сбросил на комету зонд, который протаранил её поверхность,

предварительно сфотографировав её с близкого расстояния. Ипатов занимался автоматическим распознаванием и удалением следов космических лучей со снимков, сделанных этим космическим аппаратом. Результаты этих исследований приведены в статье [34] и в тезисах [356, 361, 368, 372]. Ипатов был также соавтором общих статей [32, 35] команды Дип Импакт.

Мы проанализировали эффективность нескольких алгоритмов (`imgclean`, `crfind`, `di_crrej` и `rmcr`), написанных несколькими авторами и распознававших следы космических лучей на одном снимке КА Deep Impact. Рассматривались изображения, сделанные разными камерами (HRI, MRI и ITS) во время полета КА Deep Impact к комете Темпеля 1. Камера HRI (High Resolution Instrument) обеспечивала более высокое разрешение снимков ядра кометы, а камера MRI (Medium Resolution Instrument) имела более широкое поле зрения. Камера ITS (Impactor Targeting Sensor) была установлена на ударном модуле и работала только до столкновения с кометой.

Для автоматического удаления следов космических лучей на многих снимках мы предложили использовать алгоритм `imgclean`, поскольку другие рассмотренные алгоритмы не работают автоматически должным образом с большим количеством изображений и не выполняются до конца для некоторых изображений; однако другие алгоритмы могут быть лучше для анализа определенных конкретных изображений. `Imgclean` обнаруживает ложные следы космических лучей вблизи края ядра кометы, и этот алгоритм часто не распознает все пиксели длинных следов космических лучей, но другие рассмотренные алгоритмы иногда не выполняют удаление всех космических лучей. Наш алгоритм `rmcr` является единственным алгоритмом среди упомянутых выше, который работает на необработанных (`raw`) изображениях. Изображения с удаленными следами космических лучей полезны для фотометрических и других исследований.

Для большинства визуальных изображений HRI и MRI, полученных во время низкой солнечной активности при времени экспозиции $t > 4$ с, количество кластеров ярких пикселей на изображении в секунду на см^2 ПЗС (прибор с зарядовой связью) составляло около 2–4, как для темных (т. е. только со следами космических лучей), так и для обычных изображений неба. При высокой солнечной активности это количество пикселей иногда превышало 10. Отношение количества следов космических лучей, состоящих из n пикселей, полученных при высокой солнечной активности, к количеству при низкой солнечной активности было больше для большего числа пикселей. Из-за более высоких вариаций яркости фона ITS изображений все рассмотренные алгоритмы обнаружили слишком много ложных следов космических лучей при настройках параметров по умолчанию. Кластеры, состоящие менее чем из 4 пикселей, обычно не могут быть уверенно идентифицированы как следы космических лучей на ПЗС ITS при любых настройках параметров, поскольку яркость для таких малых следов космических лучей достаточно низка, чтобы потеряться в фоновом шуме. Количество кластеров, обнаруженных как следы космических лучей на одном инфракрасном изображении с помощью `imgcleanf`, по крайней мере в несколько раз больше фактического количества следов космических лучей (другие алгоритмы обнаружили даже больше ложных следов космических лучей), но количество кластеров, обнаруженных путем сравнения двух последовательных темных кадров, согласуется с ожидаемым количеством следов космических лучей. Некоторые ложные следы космических лучей включают яркие пиксели, неоднократно присутствующие на разных инфракрасных изображениях. Мы не рекомендуем использовать автоматическое удаление следов космических лучей на изображениях ITS и IR (инфракрасная камера). Хотя после удаления следов космических лучей на изображениях ITS и IR мы получили много ложных следов космических лучей, такое удаление было полезно для проверки работы конвейера (`pipeline`). Такие исследования позволили увидеть, как улучшения на разных этапах конвейера позволяют уменьшить количество ложных следов космических лучей, и понять, какие следующие изменения необходимо внести в конвейер. Наш интерактивный код `img` позволяет пользователю выбирать области на рассматриваемом изображении, где игнорируются сбои, обнаруженные `imgclean` как следы космических лучей. В других областях, выбранных пользователем, яркость некоторых пикселей заменяется локальной медианной яркостью, если яркость этих пикселей в несколько раз больше медианной яркости. Интерактивный код позволяет удалять длинные следы космических лучей и предотвращает удаление ложных следов космических лучей вблизи края ядра кометы. Интерактивный алгоритм может быть применен для редактирования любых цифровых изображений. Результаты, представленные в статье [34], могут быть использованы для других миссий к кометам (включая кометы с выбросами вещества).

17. Выброс вещества с кометы 9P/Темпеля 1 после столкновения ударного модуля космического аппарата Дип Импакт с этой кометой

4 июля 2005 года 370-килограммовый ударный модуль космического аппарата Дип Импакт (Deer Impact) столкнулся с кометой 9P/Темпеля 1 (9P/Tempel 1) со скоростью 10.3 км/с под углом к поверхности кометы примерно 20–35° [32]. Эволюция облака выброшенного материала наблюдалась камерами миссии Deep Impact (DI), космическими телескопами (например, Rosetta, Космический телескоп Хаббл, Chandra, Spitzer) и более чем 80 обсерваториями на Земле. Выбросы, аналогичные такому выбросу, могут происходить, когда малое небесное тело сталкивается с кометой на высокой скорости. Поэтому исследования выброса материала после такого столкновения важны для понимания столкновительных процессов в Солнечной системе. Исследования скоростей выброса материала с кометы позволяют лучше понять размеры метеорного потока, порождаемого кометой.

Мы изучали скорости и относительные количества материала, выброшенного с кометы Темпеля 1 после столкновения ударного модуля с кометой. Эти исследования были основаны на анализе снимков, сделанных камерами космического аппарата Дип Импакт в течение первых 7 минут после столкновения. Анализируя эти снимки, Ипатов сделал вывод о том, что на глубине нескольких метров под поверхностью комет может быть много полостей с пылью и газом под давлением. Одна из таких полостей была вскрыта при столкновении ударного модуля с кометой, что вызвало дополнительный выброс вещества с кометы. Полученные результаты опубликованы в статьях [40, 41, 100], и в тезисах [362, 369, 371, 380, 383, 387, 388, 390, 391, 394, 396, 398, 402, 406].

Рассматривались скорости частиц, которые вносили основной вклад в яркость облака выброшенного материала, т.е. в основном частиц диаметром меньше 3 микрон. Через время $t_e \sim 0.2$ сек скорости большинства наблюдаемого выброшенного материала были порядка 10 км/с. Скорости некоторых частиц, выброшенных в течение первых трех секунд, превышали 1 км/с, но доля материала с такими скоростями среди всего выброшенного материала была небольшой. Скорости большинства наблюдаемого материала, выброшенного при $t_e > 4$ сек, были на порядок величины меньше, чем при $t_e < 1$ сек (сотни м/с вместо нескольких км/с).

При оценке скоростей выброшенных частиц мы анализировали движение частиц на расстоянии в несколько километров. Разрушение, сублимация и ускорение частиц не сильно влияли на наши оценки скоростей, поскольку мы рассматривали движение частиц в течение не более нескольких минут. При рассмотренном движении частиц с начальными скоростями $v_p \geq 20$ м/с увеличение их скоростей за счет ускорения газом не превышало нескольких метров в секунду.

Изменения со временем скоростей и количества материала, выброшенного после столкновения ударного модуля космического аппарата Дип Импакт с кометой, отличались от тех, которые были обнаружены в экспериментах и теоретических моделях. Для наземных наблюдений, проведенных через несколько часов после удара такие различия могли бы быть вызваны испарением льда в выброшенном веществе и быстро движущимся газом. В наших исследованиях движения частиц в течение нескольких минут большую роль в этой разнице мог играть дополнительный выброс, вызванный ударом (увеличивший выброс мелких ярких частиц), и, возможно, можно рассматривать выброс как суперпозицию нормального выброса и дополнительного выброса. Вклад дополнительного выброса в яркость облака мог быть значительным, но его вклад в общую выброшенную массу мог быть относительно небольшим, поскольку доля мелких наблюдаемых частиц среди частиц всех размеров была, вероятно, больше для дополнительного выброса, чем для обычного выброса. Наша модель выброса рассматривала только те частицы, которые достигли расстояния $R \geq 1$ км от места выброса. Большие области сатурируемых пикселей (saturated pixels, яркие пиксели, которые искажают изображение) на снимках DI, сделанных в момент времени t после удара более 110 с, не позволили нам сделать однозначные выводы о скоростях выброса всех частиц.

Результаты наших исследований показали, что существует локальный максимум скорости выброса при $t_e \sim 10$ с с типичными проекциями v_p скоростей на плоскость, перпендикулярную лучу зрения, около 100–200 м/с (рис. 1). В то же время начался значительный избыточный выброс в нескольких направлениях (лучи выброса), произошло локальное увеличение яркости самого яркого пикселя, а направление от места выброса к самому яркому пикселю быстро изменилось примерно на 50°. На снимках, сделанных в течение первых 12 с и после первых 60 с, это направление было в основном близко к направлению удара. При $1 < t_e < 3$ и $8 < t_e < 60$ с график изменения со временем оцениваемого количества r_{te} выброшенного наблюдавшегося материала был больше экспоненциальной линии, соединяющей значения r_{te} при 1 и 300 с. Вышеуказанные особенности могли быть вызваны тем, что удар являлся триггером дополнительного выброса, и выбросом более ледяного материала. При $t_e \sim 55$ –60 с скорость выброса резко снизилась, и

направление от места выброса до самого яркого пикселя быстро вернулось к направлению, которое было до 10 с. Это могло быть вызвано резким уменьшением дополнительного выброса, начавшегося при $t_e \sim 10$ с.

Дополнительный выброс мог произойти со всей поверхности кратера, в то время как нормальный выброс был в основном с его краев. «Быстрый» выброс мог быть вызван выбросом материала из полостей, содержащих материал под давлением газа. «Медленный» дополнительный выброс мог быть похож на выброс со «свежей» поверхности кометы и мог происходить спустя долгое время после образования кратера.

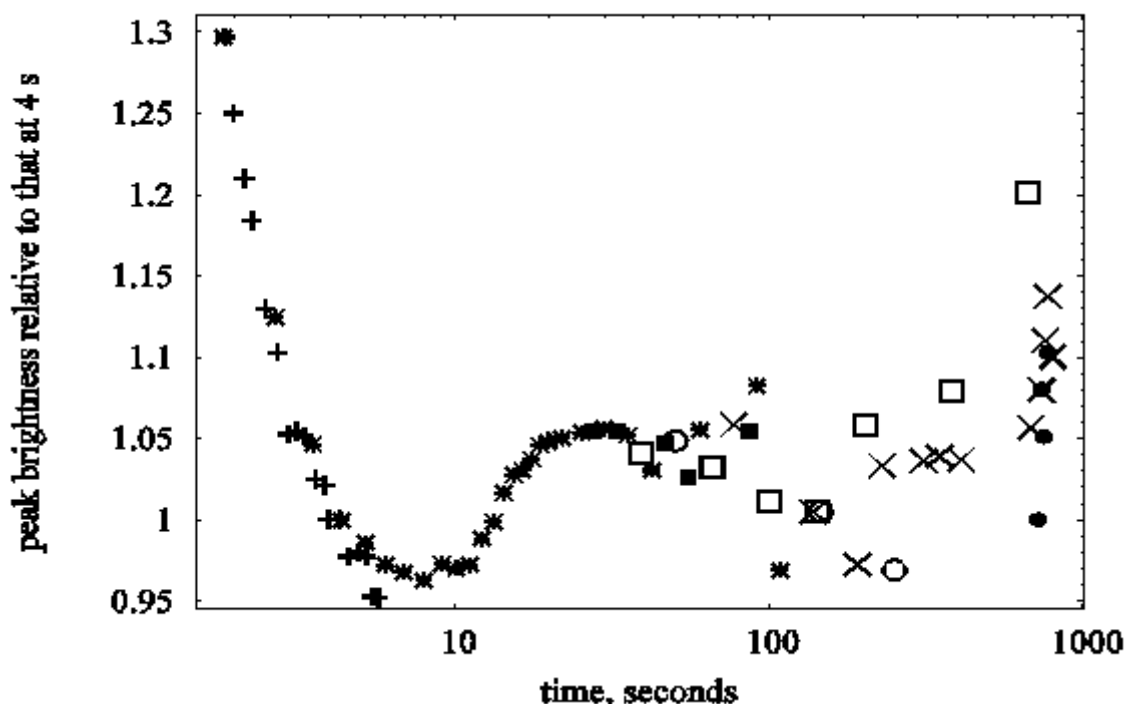


Рисунок 1. Изменение яркости наиболее яркого пикселя в зависимости от времени (в секундах) после столкновения ударного модуля космического аппарата DI с кометой. За единицу яркости принята максимальная яркость пикселя через 4 секунды после начала выброса.

Анализ наблюдений облака, образовавшегося после столкновения ударного модуля космического аппарата Дип Импакт (КА DI) с кометой, и выбросов от разных комет свидетельствует в пользу предположения, что под значительной долей поверхности кометы могут быть большие полости с материалом под давлением газа. Внутреннее давление газа и материала в полостях может вызывать естественные и вызванные выбросы и может вызывать расщепление комет. Верхний край полости, вскрытой за $t_e \sim 10$ с, может находиться в нескольких метрах под поверхностью кометы Темпеля 1.

Наши исследования не позволили нам точно оценить, когда произошло окончание выброса, но они не противоречат непрерывному выбросу материала в течение по крайней мере первых 10 минут после столкновения. Продолжительность выброса (до 30-60 мин) могла быть больше, чем у обычного выброса, который мог длиться всего несколько минут. Анализ наблюдений, сделанных камерами КА Дип Импакт, свидетельствует в пользу модели кратерообразования с доминирующей гравитацией (т.е. в пользу большего количества выброшенного материала и большего размера кратера) и в пользу того, что частицы выбрасывались с разными скоростями и массами в одно и тоже время.

Проекция скоростей большей части наблюдаемого материала, выброшенного при $t_e \sim 0.2$ с, составили около 7 км/с. Анализ наблюдений КА DI, которые использовали различные подходы, показал, что при $1 < t_e < 115$ с временные вариации проекций v_p характеристической скорости наблюдаемых частиц на плоскость, перпендикулярную лучу зрения, можно считать пропорциональными $t_e^{-\alpha}$ с $\alpha \sim 0.7-0.75$. Для модели VExp с v_p , пропорциональной $t_e^{-\alpha}$ при любом $t_e > 1$ с, доли наблюдаемого (не всего) материала, выброшенного (при $t_e \leq 6$ и $t_e \leq 15$ с) с $v_p \geq 200$ и $v_p \geq 100$ м/с, были оценены примерно в 0.1-0.15 и 0.2-0.25 соответственно, если рассматривать только

материал, наблюдавшийся в течение первых 13 минут. «Быстрый» выброс со скоростями ~ 100 м/с, вероятно, мог длиться по крайней мере несколько десятков секунд, и он мог значительно увеличить долю частиц, выброшенных со скоростями ~ 100 м/с, по сравнению с оценками для модели *VEhr* и для обычного выброса. Вышеуказанные оценки согласуются с оценками (100–200 м/с) проекции скорости переднего края пылевого облака, образовавшегося в результате столкновения КА Дип Импакт с кометой (облака DI), сделанными другими учеными и основанными на различных наземных наблюдениях и наблюдениях, сделанных космическими телескопами.

Избыточный выброс материала в нескольких направлениях (лучи выброшенного материала) был значительным в течение первых 100 с, и он все еще наблюдался на снимках, сделанных при $t \sim 500$ –770 с. Эти наблюдения показывают, что выброс мог продолжаться и при $t_e \sim 10$ мин. Самые острые лучи были вызваны материалом, выброшенным при $t_e \sim 20$ с. В частности, наблюдались чрезмерные выбросы, особенно на снимках, сделанных при $t \sim 25$ –50 с после удара, в направлениях, перпендикулярных направлению удара. Направления чрезмерных выбросов могли меняться со временем. Размер пылевого облака DI существенной непрозрачности, вероятно, не превышал 1 км.

14 февраля 2011 г. КА Stardust сфотографировал кратер, образовавшийся после столкновения КА DI с кометой. Ряд авторов оценили размер этого кратера. В [41] обсуждалось расположение верхних границ полостей, содержащих пыль и газ под давлением в кометах. Расстояние между предупредительной поверхностью кометы 9P/Tempel 1 и верхней границей самой большой полости, вскрытой во время выброса материала после столкновения ударного модуля космического аппарата Deep Impact (DI) с кометой, оценивается примерно в 5–6 м, если диаметр транзитного кратера DI составлял около 150–200 м. Оценочная глубина составляла 4 м, если диаметр равнялся 100 м. При этих оценках использовались модели образования кратеров и оценивалось какой глубины формирующийся кратер достигнет через 8 секунд после начала процесса образования кратера. Самая большая полость, образовавшаяся после столкновения DI, могла быть относительно глубокой, поскольку значительный избыточный выброс продолжался около 50 с. Эти оценки глубины согласуются с глубиной (4–20 м) начального фронта сублимации льда CO в моделях взрыва кометы 17P/Holmes. Наши исследования показывают, что полости, содержащие пыль и газ под давлением и расположенные на глубине нескольких метров под поверхностью комет, могут быть обычным явлением.

18. Наблюдения астероидов и комет

В 1999 г. в течение полугода С. И. Ипатов работал по гранту DWTC в Королевской обсерватории Бельгии. Совместно с Эриком Элстом (Eric Elst), открывшим около 4000 астероидов, и Т. Пауэлсом (Thierry Pauwels) он принимал участие в наблюдениях астероидов и комет с использованием 0.85-метрового телескопа Шмидта с CCD-камерой (3072x2048 пикселей) и был сооткрывателем восьми астероидов, получивших номера. В частности, Ипатов участвовал в первых наблюдениях кометы, получившей название C/1999 T3 (LINEAR). Результаты этих наблюдений кометы представлены в Minor Planet Electronic Circ. [287] и IAU Circ. [288].

Информация об астероидах, открытых С.И. Ипатовым, представлена на сайте: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_minor_planet_discoverers#S. I. Ipatov - список 8 малых планет, открытых С.И. Ипатовым совместно с Эриком Элстом или с Т. Пауэлсом (the list of 8 minor planets discovered by S. I. Ipatov). На сайте https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Discoveries_by_Sergei_I._Ipatov приведен список 5 малых планет, открытых С.И. Ипатовым совместно с Эриком Элстом, получивших названия (the list of 5 minor planets discovered by S. I. Ipatov that got names). Эти пять астероидов имеют следующие имена:

41107 Ropakov - Ivan V. Ropakov (1892-1992), grandfather of the second discoverer, was a very brave man and the director of a small butter industry in the village of Pogorelka (Vologodskaya region, Russia). Дед второго первооткрывателя был очень смелым человеком и директором небольшого маслозавода в селе Погорелка (Вологодская область, Россия). https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=41107. https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=41107. [Ref: Minor Planet Circ. 64564]. В первоначальном варианте текста о Иване Ропакове были слова о том, что он был героем первой мировой войны. Однако оказалось, что по правилам об именах астероидов нельзя упоминать какие-то военные заслуги. Пришлось в следующей заявке поменять предыдущие слова на «был очень смелым человеком». Иван Ропак был награжден двумя георгиевскими крестами.

43025 Valusha - Russian scientist Valentina I. Ipatova-Artioukhova (b. 1954) specializes in hydrobiology. She conducts biological monitoring of the environment in some regions of Russia, aiming with her work to protect the ecosystems from pollution and contamination. Русский учёный Валентина Ивановна Ипатова-Артюхова (р. 1954) специализируется в области гидробиологии. Она проводит биологический мониторинг окружающей среды в ряде регионов России, ставя своей работой защиту экосистем от загрязнения и засорения. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=43025.

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=43025. [Ref: Minor Planet Circ. 57951]. В.И. Ипатова – жена С.И. Ипатова.

49700 Mather - John C. Mather (born 1946), an American cosmologist and senior project scientist for the James Webb Space Telescope. He led the team that constructed the Cosmic Background Explorer (COBE). For his role in mapping microwave radiation and understanding the early Universe he received the 2006 Nobel prize in physics. Джон К. Мазер (родился в 1946 году), американский космолог и старший научный сотрудник проекта космического телескопа Джеймса Уэбба. Он руководил командой, которая построила Cosmic Background Explorer (COBE). За свою роль в изучении микроволнового излучения и понимании ранней Вселенной он получил Нобелевскую премию по физике 2006 года. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=49700.

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=49700. [Ref: Minor Planet Circ. 57952]. У С.И. Ипатова есть несколько совместных статей [27-30, 33, 37] с Джоном Мазером.

150316 Ivaniosifovich - Ivan Iosifovich Ipatov (1927–2015), father of the second discoverer, Sergei I. Ipatov, was one of the founders of the geodetical network of Russia. Иван Иосифович Ипатов (1927–2015), отец второго первооткрывателя Сергея Ивановича Ипатова, был одним из основателей геодезической сети России. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=150316.

https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=150316. [Ref: WGSBN Bull. 1, #3, 12]. В первоначальной заявке на имя предлагалось Ivanipatov, но оказалось, что Ipatov нельзя использовать, так как уже есть астероид с этим именем. Поэтому в повторной заявке на название астероида поменяли фамилию на отчество. Отца Ивана Ипатова звали Осипом, но в паспорт Ивана отчество вписали как Иосифович. Колхозники, каким был Осип, как правило, паспортов не имели до 1981 года.

337166 Ivanartioukhov - Ivan Semenovich Artioukhov (1908-1995), father of the wife of the second discoverer, was the founder of the society for nature conservation in Russia. Иван Семенович Артюхов (1908-1995), отец жены второго первооткрывателя, был основателем общества охраны природы в России. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=337166. https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=337166. [Ref: Minor Planet Circ. 10031].

В честь С.И. Ипатова назван астероид 14360 Ipatov - Sergej Ivanovich Ipatov (b. 1952) is a Russian scientist and specialist in the migration of minor planets. During his stay in 1999 at the Uccle Observatory, he was shown to be a very fine observer who made several discoveries with the Uccle Schmidt telescope. Сергей Иванович Ипатов (р. 1952) - российский учёный и специалист по миграции малых планет. Во время своего пребывания в 1999 году в обсерватории Уккле он проявил себя как прекрасный наблюдатель, сделавший несколько открытий с помощью телескопа Шмидта в Уккле. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=14360. https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=14360. [Ref: Minor Planet Circ. 55721].

19. Модели для определения вероятности обнаружения в различных областях неба объектов, сближающихся с Землей

Проблема астероидно-кометной опасности актуальна в настоящее время. Эта проблема рассматривается во многих работах. Число объектов, сближающихся с Землей, (ОСЗ) диаметром более 1 км и 40 м оценивается в 1000 и миллион объектов соответственно. Тело размером с Челябинский метеорит (диаметром в 20 м), упавшее на город под большим углом, может привести к значительному ущербу. Для организации наблюдений опасных объектов и противодействия столкновению этих объектов с Землей важно лучше знать, каким областям неба нужно уделять большее внимание при наблюдениях ОСЗ, сравнить эффективность наблюдений проектируемых космических телескопов на различных орбитах, оценить какое происхождение (а значит и какой состав) более вероятно могут иметь ОСЗ, движущиеся по данным орбитам, с какими типичными скоростями и под какими типичными углами ОСЗ сталкиваются с Землей.

В статье [72] и тезисах [107, 457] совместно с Л.В. Елениным Ипатов обсуждал возможности применения результатов компьютерного моделирования миграции малых тел с Солнечной системе к построению модели вероятности появления и обнаружения в различных областях неба ОСЗ, в том числе потенциально опасных объектов (для ряда телескопов). При построении такой модели можно также решить следующие задачи: (1) Оценки роли источников пополнения ОСЗ (астероидов, комет, транснептуновых объектов). (2) Вычисление вероятностей столкновений и векторов столкновений мигрировавших тел с Землей. Вероятности появления и обнаружения ОСЗ, в том числе опасных для жителей Земли, различных размеров на различных участках звездного неба предлагается исследовать не только для наблюдений с Земли, но и из нескольких областей, куда планируется запустить космические аппараты с телескопами для наблюдения ОСЗ.

При построении модели вероятности появления и обнаружения в различных областях неба ОСЗ нужно использовать распределение ОСЗ по элементам их орбит и массам. Учитывая наблюдательную селекцию, на основе популяции известных ОСЗ можно оценить реальное распределение ОСЗ по элементам их орбит. Сравнение наблюдаемых ОСЗ с результатами расчетов миграции различных малых тел позволит лучше понять распределение ОСЗ по элементам орбит для тел малых размеров, а также типичные орбиты ОСЗ, пришедших из различных источников, а значит различного состава и альбеда.

Полезно было бы разработать программы построения карт распределения вероятности обнаружения ОСЗ на небесной сфере на текущую наблюдательную ночь. Эти программы и используемые ими модели яркости звездного неба были бы ориентированы на российские телескопы. Вероятности появления и обнаружения ОСЗ на небесной сфере предлагается вычислять не только для всех ОСЗ, но и отдельно для ОСЗ, имеющих различное происхождение, а также для ОСЗ, проходящих на небольшом расстоянии около Земли и для объектов, которые могут столкнуться с Землей. В [72] обсуждались расчеты вероятности обнаружения небесного тела и яркости звездного неба. При вероятностном выборе элементов орбиты и звездной величины небесного тела сначала с учетом расстояния от наблюдателя до точки орбиты нужно определять положения тела на орбите, при которых оно может наблюдаться в идеальных условиях наблюдения. Затем этот интервал, если он ненулевой, будет уточняться с учетом яркости звездного неба около рассматриваемого тела и возможности телескопа наблюдать данную область неба.

Предлагаемая модель вероятности появления в различных областях неба потенциально опасных для земных объектов позволит наблюдателям лучше понимать, каким областям неба стоит уделять больше внимания при наблюдениях на определенную эпоху. Эта модель может быть применена для более эффективной эксплуатации оптических инструментов поиска и обнаружения ОСЗ (в частности, телескопов ISON-NM и ISON-SSO). Предлагаемые алгоритмы вычисления яркости звездного неба [433, 535] могут быть использованы астрономами при планировании наблюдений различных объектов. Предлагаемые исследования эффективности поиска ОСЗ различными телескопами позволят сравнить эффективность наблюдений проектируемых космических телескопов на различных орбитах и дать рекомендации по созданию и размещению новых, в том числе космических, телескопов, предназначенных для поиска ОСЗ. В 2015-2016 гг. мы подавали заявки на грант РФФИ по данной теме. Эти заявки не были поддержаны, и мы продолжили заниматься другими задачами.

Для организации наблюдений опасных объектов и противодействия столкновению этих объектов с Землей важно оценить какое происхождение (а значит и какой состав) более вероятно могут иметь ОСЗ, движущиеся по данным орбитам, с какими типичными скоростями и под какими типичными углами ОСЗ сталкиваются с Землей. Предлагаемые исследования помогут ответить на эти вопросы. Результаты предлагаемых исследований помогут уточнить массу и состав вещества, доставленного с различных расстояний от Солнца в популяцию ОСЗ, а также к планетам земной группы и Луне. Они будут важны для специалистов, занимающихся проблемой кратерообразования и оценками состава вещества в верхних слоях и на поверхности планет земной группы и Луны. Эти результаты позволят подробно изучить распределение векторов скоростей тел, сталкивающихся с планетами земной группы и Луной.

ЭКЗОПЛАНЕТЫ

20. Спектры экзопланет, похожих на Землю, с различными периодами осевых вращений

Первая экзопланета была обнаружена в 1995 г. В настоящее время открыто уже более 5 тысяч экзопланет. Об экзопланетах можно почитать, например, в монографии [Маров М.Я., Шевченко И.И. Экзопланеты: физика, динамика, космогония. М.: Физматлит, 2022].

Исследования спектров экзопланет, похожих на Землю, с различными периодами осевых вращений проводились Ипатовым совместно с Джеймсом Чо (James Y-K. Cho) в 2007-2008 гг. Полученные результаты сначала были кратко опубликованы в тезисах [384, 385, 435]. В 2014 году Ипатовым была подготовлена и представлена статья в труды семинара «Исследования экзопланет» (3-4 июня 2014 г., ИКИ РАН, Москва). Однако эти труды не были опубликованы, так как участниками семинара было представлено небольшое число статей. Ниже приводится текст той неопубликованной статьи для трудов семинара. Более подробно результаты исследований по этой теме опубликованы в статье [534] в 2025 г.

Резюме. Различия в спектрах излучения экзопланет, отличающихся от Земли только периодом осевого вращения, сравнимы с различиями, связанными с изменением угла наблюдения планеты. Максимальные отличия в спектрах землеподобных экзопланет получены для длины волны ~5-10 и ~13-16 микрон. Анализируя спектр с длиной волны около 9.4-10 микрон, можно сделать вывод, имеет ли атмосфера экзопланеты озон или нет.

Модели и методы исследования

В настоящее время найдены землеподобные планеты около других звезд. Считается, что около 1/3 звезд могут находиться планеты, подобные Земле. Чтобы оценить возможность обнаружения признаков жизни на таких планетах мы исследовали спектры планет, подобных Земле, но с различными периодами осевого вращения. Используя модель общей циркуляции атмосферы CCM3 и рассматривая циркуляцию атмосферы в течение 2 лет, с помощью программы SBDART мы вычисляли [384, 385, 435] спектры атмосфер Земли и экзо-Земли, вращающихся с периодами P , равными 1 или 100 дней. Модель общей циркуляции атмосферы CCM3, в частности, учитывает радиацию, конвекцию воды, долю облаков, типы земной поверхности, профили температуры и давления в каждой точке планеты (разрешение – 128 значений долготы l_{on} и 64 значения широты l_{at}), а также вычисляет спектр у поверхности планеты. Программа SBDART вычисляет радиационный перенос в атмосфере с учетом облаков [Ricchiazzi P., et al. BAMS, 1998, v. 79, 2101-2114]. Эта программа вычисляет спектр для одной точки на поверхности Земли (для пары значений долготы и широты), но она анализирует атмосферу на различной высоте. Используя SBDART, как подпрограмму, мы вычисляли средний спектр для некоторой области на планете. Мы анализировали спектр восходящего излучения на высоте h , равной 1 и 11 км, (ниже в основном обсуждается спектр при $h=11$ км) при длине волны от 0.3 до 1 микрон и от 1 до 18 микрон для начального состояния, для Земли и экзо-Земли. Начальные условия для Земли и экзо-Земли были одинаковыми. Рассматривались следующие модели:

Модель 1. В этой модели средний поток излучения зависит только от рассматриваемой области, а не от угла, под которым видна эта область. Для одного расчета с SBDART весовой коэффициент пропорционален площади области (размером 2.8° на 2.8° на экваторе), соответствующей паре (l_{on}, l_{at}) значений долготы и широты. Эта площадь пропорциональна $\cos(l_{at})$, но не зависит от l_{on} .

Модель 1a. Для модели 1a мы рассматривали фиксированную широту и все значения долготы ($0-360^\circ$).

Модель 1b. Для модели 1b вычислялись средние значения потока излучения для всех пар (l_{on}, l_{at}) , т.е. рассматривалась вся поверхность планеты.

Модель 1c. Рассматривалась южная полусфера ($-90^\circ \leq l_{at} \leq 0$, $0 \leq l_{on} \leq 360^\circ$).

Модель 2. В этой модели средний поток излучения зависит от значений угла, под которым видны различные части рассматриваемой области, которая составляет половину поверхности планеты. Например, если смотреть с экватора при $l_{on}=l_{on0}$, то весовой коэффициент k для одного расчета SBDART равен $\text{abs}(\cos(l_{at}) \times \cos(l_{at}) \times \cos(l_{on}-l_{on0}))$. В этом произведении один $\cos(l_{at})$ связан с тем, что область, соответствующая паре (l_{on}, l_{at}) , меньше для широт, более близких к полюсу, (как для модели 1), а другой множитель $\cos(l_{at})$ вызван тем, что наблюдатель видит области на разных широтах под различными углами. Если смотреть с полюса, то $k=\text{abs}(\cos(l_{at}) \times \sin(l_{at}))$.

Карты облаков и температуры

Карты облаков отличались для различных периодов вращения планеты (рис. 1). Для Земли было три больших области облаков (голубой цвет) в направлении меридиана, а для экзо-Земли (с $P=100$ дней) такая область было только около экватора. Для этой экзопланеты почти не было облаков около Южного полюса, а для Земли и для начального состояния было много облаков

около полюсов. Цветные рисунки можно посмотреть в интернете в файле этой книги, а также в статье [534].

В районе экватора карты температуры (рис. 2) мало отличались при $P=1$ день и $P=100$ дней. Для экзо-Земли значения температуры T были более однородными, чем для Земли. Например, область $T > 290^\circ \text{ K}$ для экзо-Земли была меньше, чем для Земли, а область $T < 230^\circ \text{ K}$ отсутствовала для экзо-Земли. Основное отличие в T -картах было около Южного полюса. На Южном полюсе для экзо-Земли температура была выше, чем для Земли и начального состояния.

Спектры излучения Земли и экзо-Земли

Примеры спектров излучения Земли и экзо-Земли (при $P=100$ дней) приведены на рис. 3-4. Для рассмотренных периодов осевого вращения в модели 1а поток излучения был максимален на экваторе и убывал к полюсам. Максимальное значение F_{max} потока обычно достигалось для длины волны $\lambda \sim 10$ микрон. Для Северного полюса максимальные значения потока были близки для Земли, экзо-Земли и начального состояния. Для Южного полюса значения F_{max} были больше для Земли и экзо-Земли, чем для начального состояния, в 1.3 и 1.7 раза соответственно. Излучения обеих планет значительно отличались для длин волн ~ 5 -10 и ~ 13 -16 микрон, например, около полюсов и при $i_{\text{at}} \leq -43^\circ$ and $i_{\text{at}} \geq 77^\circ$. Для всех графиков при $h=11$ км наблюдался локальный минимум при $\lambda \sim 14$ -16 микрон и меньший локальный минимум при $\lambda \sim 9.5$ микрон.

Для всей поверхности планеты (модель 1b), графики зависимости потока излучения от λ были очень близки для Земли, экзо-Земли и начального состояния. Значение F_{max} для всей поверхности южной полусферы (модель 1с) равнялось 15 ватт м^{-2} микрон $^{-1}$ и было меньше, чем для всей поверхности (16 ватт м^{-2} микрон $^{-1}$) (модель 1b), на 7% (эти значения в 2 раза меньше, чем на экваторе). Для модели 2 при взгляде на планету с Северного полюса F_{max} было в 1.2 раза больше, чем с Южного полюса (см. табл. 1). Разница между излучением с северной и южной полусфер могла быть вызвана Антарктидой. Полученные результаты для моделей 1b,с и 2 свидетельствуют в пользу того, что влияние линии взгляда на наблюдаемый поток излучения со всей планеты может быть больше влияния периода вращения. Для южной полусферы при длине волны 14-16 микрон и $h=11$ км для экзо-Земли поток был в 1.2 раза больше, чем для Земли и начального состояния. Отличия в значениях потока могут быть связаны с особенностями распределения облаков и с тем, что F_{max} больше для более горячих зон. Для экзо-Земли покрытие облаками было максимально в широкой зоне около экватора и было минимальным около Южного полюса.

Для Земли и экзо-Земли получены следующие общие черты: (1) планеты имеют широкий интервал абсорбции CO_2 около 14 микрон; (2) нет существенных различий для спектров около экватора (однако для некоторых областей, например, около полюсов, могут быть существенные различия в спектрах); (3) если интегрировать спектр по всему диску планеты, то разница в спектре, полученном при наблюдениях Земли/экзо-Земли с различных направлений, значительно снижается по сравнению с наблюдениями отдельных областей планет, но все же заметна разница в интегрированном сигнале спектра для Земли и экзо-Земли (например, эта разница заметна в случае спектра на высоте 11 км, наблюдаемом с Южного полюса, но разница небольшая, если наблюдать весь диск с различных направлений экватора). Наши результаты показывают, что спектральный сигнал не может быть использован для определения скорости вращения экзопланеты, так как угол наблюдения экзопланеты в общем случае заранее не известен. В случае земноподобных экзопланет наибольшие отличия в спектрах наблюдаются при длине волны ~ 5 -10 и ~ 13 -16 микрон.

Анализируя спектр с длиной волны около 9.4-10 микрон, можно сделать вывод, имеет ли атмосфера экзопланеты озон или нет. Локальный минимум при длине волны 9.4-10 микрон отсутствует (рис. 4) на графиках восходящего излучения на высоте 11 км при отсутствии озона, но этот минимум имеется на графиках моделей с озоном. При длинах волн меньших 0.35 микрон (SBDART не рассматривает длины волн меньше 0.25 микрон) также были получены некоторые отличия для моделей с озоном и без озона. Так как озон важен для жизни, то полоса 9.4-10 микрон может быть важна для будущих наблюдений экзопланет, похожих на Землю.

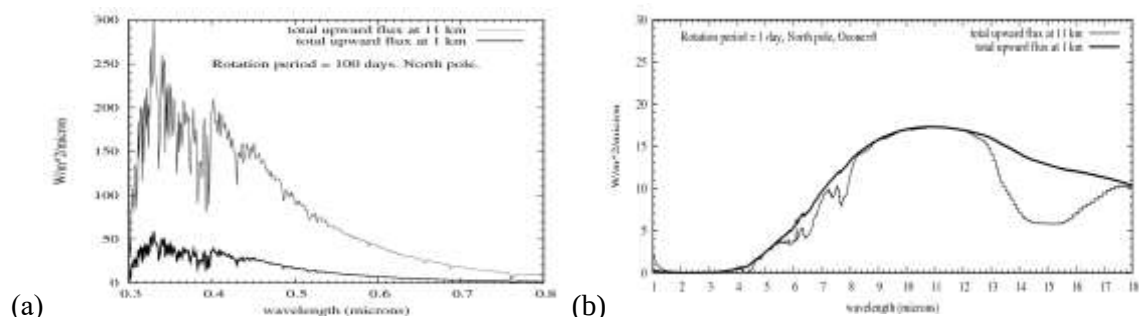
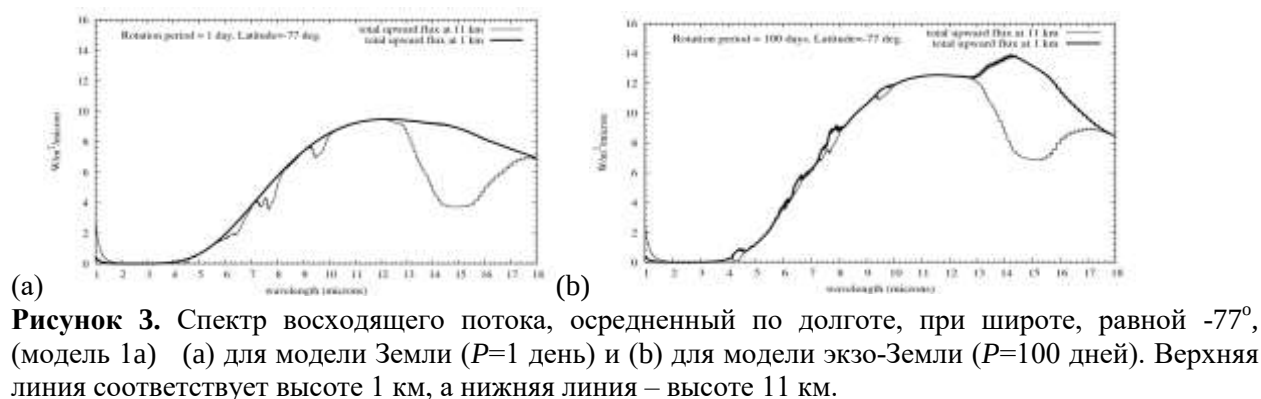
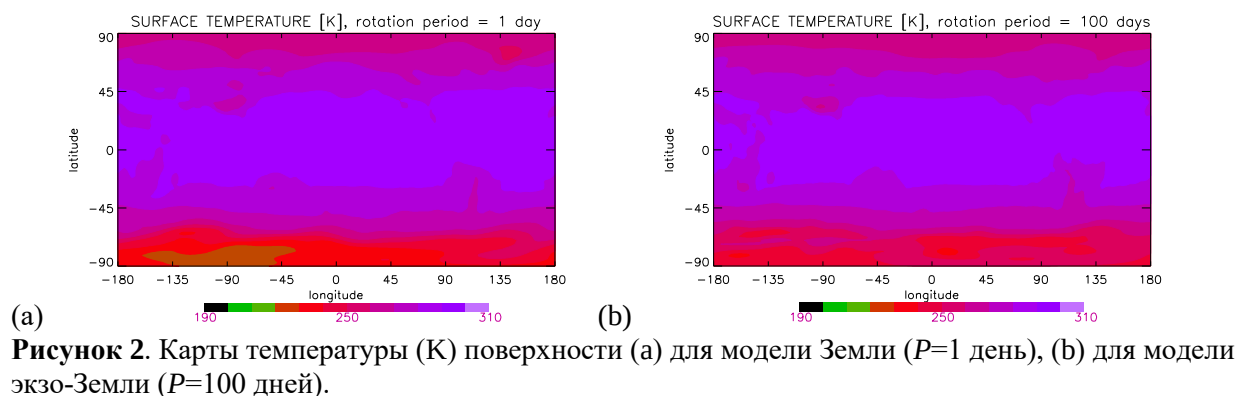
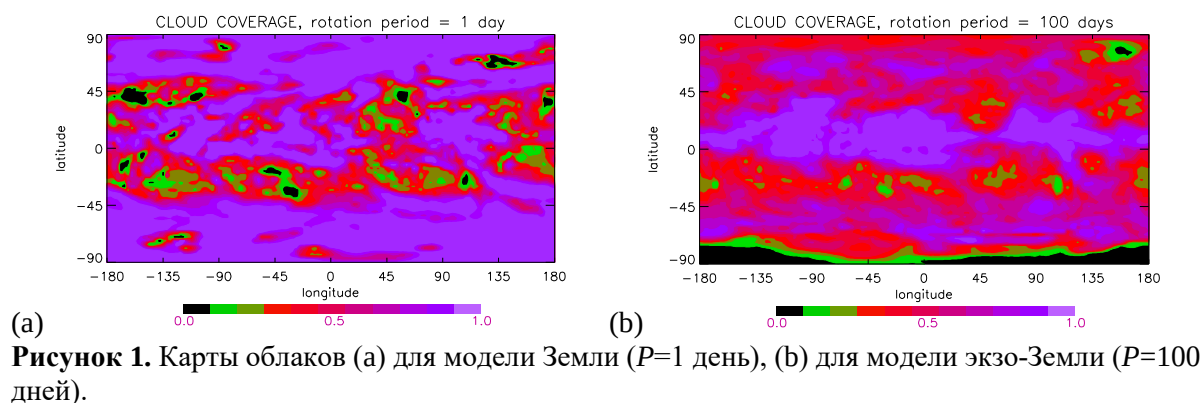


Рисунок 4. Спектры, видимые с направления на Северный полюс, (а) для экзо-Земли ($P=100$ дней, модель 1а, спектры почти такие же для Земли ($P=1$ день) и для начального состояния), (б) для Земли ($P=1$ день) в случае отсутствия озона. Верхняя линия на графиках соответствует высоте 1 км, а нижняя линия – высоте 11 км.

Таблица 1. Максимальный поток излучения (в $\text{ватт м}^{-2} \text{микрон}^{-1}$) от полусферы планеты при длине волны 10.0-10.4 микрон на высоте 1 км (на высоте 11 км поток обычно меньше в 1.01-1.02 раза) для нескольких направлений взгляда на планету (модель 2).

	Южный полюс	Северный полюс	Экватор. $l_{on}=90^\circ$	Экватор. $l_{on}=270^\circ$
--	-------------	----------------	----------------------------	-----------------------------

Нач. состояние	6.61	8.09	8.27	8.49
Земля	6.63	7.97	8.05	8.31
Экзо-Земля	6.61	7.77	8.25	8.09

21. Эффективность поиска экзопланет методом микролинзирования при использовании различных телескопов

Исследования эффективности поиска экзопланет методом микролинзирования при использовании различных телескопов проводились Ипатовым совместно с Кисом Хорне (Keith Horne) в 2011-2013 гг. Полученные результаты были опубликованы кратко в трудах [103] и в тезисах [417, 423, 430, 436]. В 2014 году Ипатовым была подготовлена и представлена статья в труды семинара «Исследования экзопланет» (3-4 июня 2014 г., ИКИ РАН, Москва). Однако эти труды не были опубликованы, так как участниками семинара было представлено небольшое число статей. Ниже приводится текст той неопубликованной статьи для трудов семинара. Более подробно результаты исследований по этой теме приведены в статье [535] в 2025 г. Ипатов был также соавтором статей [42-50], посвященных поиску планет методом микролинзирования.

Резюме

Сравниваются эффективности обнаружения экзопланет при наблюдениях событий микролинзирования с помощью различных телескопов и при нескольких подходах к выбору наблюдаемых событий. При построении алгоритма сравнения таких эффективностей мы рассматривали модели яркости неба, удовлетворяющие данным наблюдений OGLE и RoboNet в 2011.

1. Введение

Если луч света от звезды-источника по пути к Земле проходит мимо звезды-линзы, то наблюдаемая яркость звезды-источника может усиливаться (из-за искривления траектории движения света). Это явление называется микролинзированием. Если у звезды-линзы есть планета, то она может вызывать изменение яркости звезды-источника. Метод микролинзирования позволяет находить планеты с массами, близкими к массе Земли, находящиеся на таком расстоянии от звезды, при котором на этих планетах возможна жизнь. Нами проводилось [103] сравнение относительной эффективности обнаружения экзопланет при наблюдениях с помощью метода микролинзирования, проводимых на различных телескопах, для нескольких подходов к выбору наблюдаемых событий микролинзирования. Интервалы времени, при которых можно наблюдать события микролинзирования, определяются на основе положений Солнца и Луны и других ограничений на направление телескопа. Основываясь на подходе, представленном в [Horne K., Snodgrass C., and Tsapras Y. MNRAS, 2009, v. 396, 2087-2102], на каждом шаге времени мы вычисляли сравнительную эффективность обнаружения экзопланеты. На каждом шаге времени выбиралось событие с максимальной вероятностью обнаружения. Мы рассматривали следующие 13 телескопов, пронумерованных от $N_f=1$ to $N_f=13$:

1. 2 м FTS - Faulkes Telescope South - Siding Spring Observatory, Австралия.
2. 2 м FTN - Faulkes Telescope North - Haleakela, Гавайи, США.
3. 2 м LT - Liverpool Telescope - La Palma, Канарские острова, Испания.
4. 1.3 м OGLE - The Optical Gravitational Lensing Experiment - Las Campanas, Чили.
- 5-7. Три 1 м CTIO - Cerro Tololo Inter-American Observatory, Чили.
8. 1 м MDO - McDonald observatory, Техас, США.
- 9-11. Три 1 м SAAO - South African Astronomical Observatory, Южная Африка.
- 12-13. Два 1 м SSO - Siding Spring Observatory, Австралия.

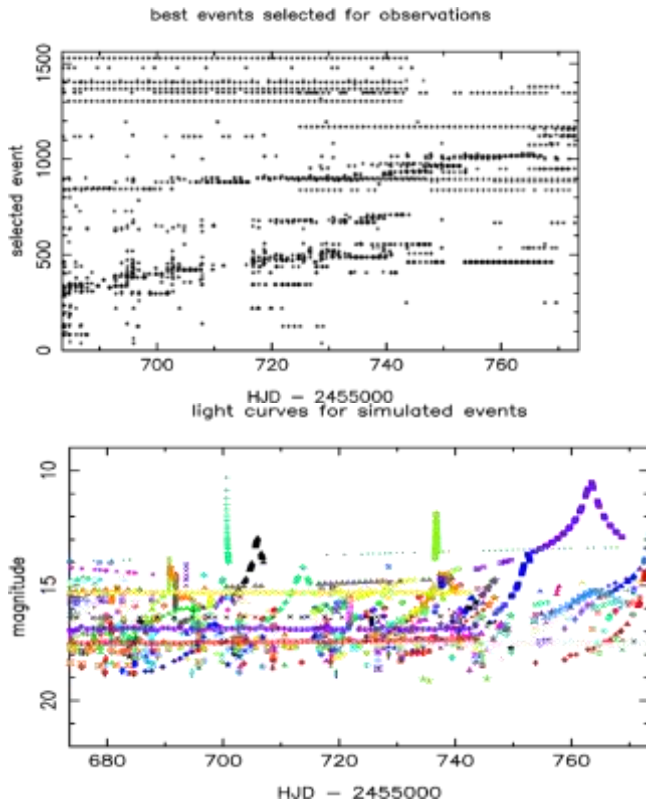
2. Модели яркости неба

Частью наших исследований для создания алгоритма оптимального выбора наблюдаемых событий микролинзирования, позволяющего максимизировать эффективность нахождения экзопланет, являлось построение модели яркости звездного неба [433] (основанной на [Krisciunas K., Schaefer B. PASP, 1991, v. 103, 1033-1039]) и seeing (характеристика искажения снимков из-за турбулентности в атмосфере) на основе наблюдений в инфракрасном диапазоне с помощью телескопов OGLE, FTS, FTN и LT в 2011. Для анализа наблюдений использовалась χ^2 оптимизация. Значения seeing для FTN были почти вдвое меньше, чем для трех других рассмотренных телескопов (FTS, LT и OGLE). Полученная яркость неба в зените при инфракрасных наблюдениях равнялась 19.0, 18.7, 19.6 и 18.1 mag arcsec⁻² для FTS, FTN, LT и OGLE соответственно. При одинаковых значениях airmass (airmass=1/cos(угол между

направлениями на рассматриваемую точку неба и на зенит)), типичная яркость звездного неба в различных областях неба обычно менялась меньше, чем на 1 зв. величину (mag), если рассматривались снимки, на которых Луна находилась ниже горизонта. Большинство отклонений яркости звездного неба от наилучшей модели для каждого события (наблюдения минус χ^2 оптимизация, которая различна для каждого события) находились в небольшом интервале (от -0.4 до 0.4 зв. величины) даже для всех положений Луны и Солнца; для Луны ниже горизонта было много значений в интервале [-0.2, 0.2], но абсолютные значения некоторых отклонений могли достигать 4 зв. вел., если рассматривались все наблюдения. Влияние высоты Солнца на яркость звездного неба начинало играть роль для высоты Солнца $\theta_{\text{Sun}} > -14^\circ$ и было значительным при $\theta_{\text{Sun}} > -7^\circ$. При рассмотрении FTS наблюдений при Луне ниже горизонта отклонения s_{br} яркости звездного неба могли достигать -3 зв. величины при $-8^\circ < \theta_{\text{Sun}} < -7^\circ$, $s_{br} > -1$ зв. вел. при $\theta_{\text{Sun}} < -8^\circ$, и $s_{br} > -0.4$ з. вел. при $\theta_{\text{Sun}} < -14^\circ$.

3. Наблюдения, увеличивающие эффективность обнаружения экзопланет

Разработанный нами алгоритм показывает, какие события микролинзирования лучше наблюдать в рассматриваемые моменты времени с помощью конкретного телескопа для того, чтобы увеличить эффективность обнаружения экзопланет при наблюдениях. Для оценок сравнительной эффективности обнаружения экзопланет, для «наилучших» событий (т.е. для событий, выбранных для наблюдений в текущий момент времени) мы рассматривали значение $w_{\text{sum}} = \sum g_i [(\Delta t + t_{\text{done}})^{1/2} - t_{\text{done}}^{1/2}]$ (где $\Delta t = 2t_{\text{slew}}$ для события, наблюдаемого в текущий момент времени, и $\Delta t = t_{\text{slew}}$ и $t_{\text{done}} = 0$ для других событий, t_{slew} - время поворота телескопа от одной цели к другой, t_{done} - прошедшее время экспозиции, коэффициенты g_i обсуждаются в [535] при описании алгоритма и области обнаружения i -го события). Пример работы алгоритма приведен на рис. 1. Цветные рисунки 1-2 можно посмотреть на сайте с этой книгой или в статье [535].



(a)

(б)

Рисунок 1. (а) Интервалы времени для событий, выбранных нашим алгоритмом для наблюдений телескопом OGLE. Рассмотренные события микролинзирования: 1110001-111562. (б) Кривые яркости для событий микролинзирования, выбранных для наблюдения с OGLE. Рассмотренные события: 110001-111562.

Для 13 телескопов вычислялись и сравнивались значения $r_{\text{wsum}} = (w_{\text{sum}}/w_{\text{sumOGLE}})/(t_{\text{sum}}/t_{\text{sumOGLE}})$, где t_{sum} – общее время за рассматриваемый интервал времени, в течение которого можно наблюдать, по крайней мере, одно событие (t_{sumOGLE} – значение для OGLE). Полученные результаты

показывают (рис. 2), что для поиска экзопланет методом микролинзирования, основанного на уже известных событиях микролинзирования, сравнительная эффективность r_{wsumt} обнаружения экзопланет за единицу времени для 2-х метровых телескопов сети RoboNet (телескопы FTS, FTN или LT) больше (обычно в 1.4-2.2 раза), чем для OGLE. Для ПЗС камеры SBIG значения w_{sum} были меньше в ~ 1.2 раза, чем для Sinistro. Для 1-м телескопа с ПЗС камерой Sinistro эта эффективность/вероятность часто составляла примерно 0.8 от значения для OGLE, но в ряде расчетов она была больше, чем для OGLE. Приведенные выше оценки сравнения эффективности телескопов для поиска экзопланет приведены для случая, при котором каждый телескоп направлен на то событие микролинзирования, при котором вычисленное значение эффективности обнаружения является максимальным для рассматриваемых событий. Телескопы с более широким полем зрения, такие как OGLE, более эффективны для поиска новых событий микролинзирования. Вероятность обнаружения экзопланеты обычно пропорциональна диаметру зеркала телескопа.

Анализ наших расчетов показывает, что при наблюдениях с помощью нескольких телескопов, расположенных в одной и той же обсерватории, большую часть времени наблюдений лучше наблюдать различные события микролинзирования с помощью различных телескопов, но в моменты времени, соответствующие пику кривой яркости события, часто лучше наблюдать одно и то же событие, используя все телескопы. Для выбора событий среди 1562 событий OGLE (с номерами 110001-111562) и 90-дневным (или более) периодом наблюдений значительная часть (часто больше 50%) вклада в эффективность обнаружения экзопланеты (в w_{sum}) приходилась на короткие интервалы времени, которые соответствовали пикам кривых яркости. Относительная эффективность телескопа по сравнению с OGLE может отличаться на множитель, вплоть до 3, в зависимости от наличия пиков кривых яркости в рассматриваемый интервал времени. Разработанный нами алгоритм может использоваться для планирования различных наблюдений (а не только для наблюдений событий микролинзирования).

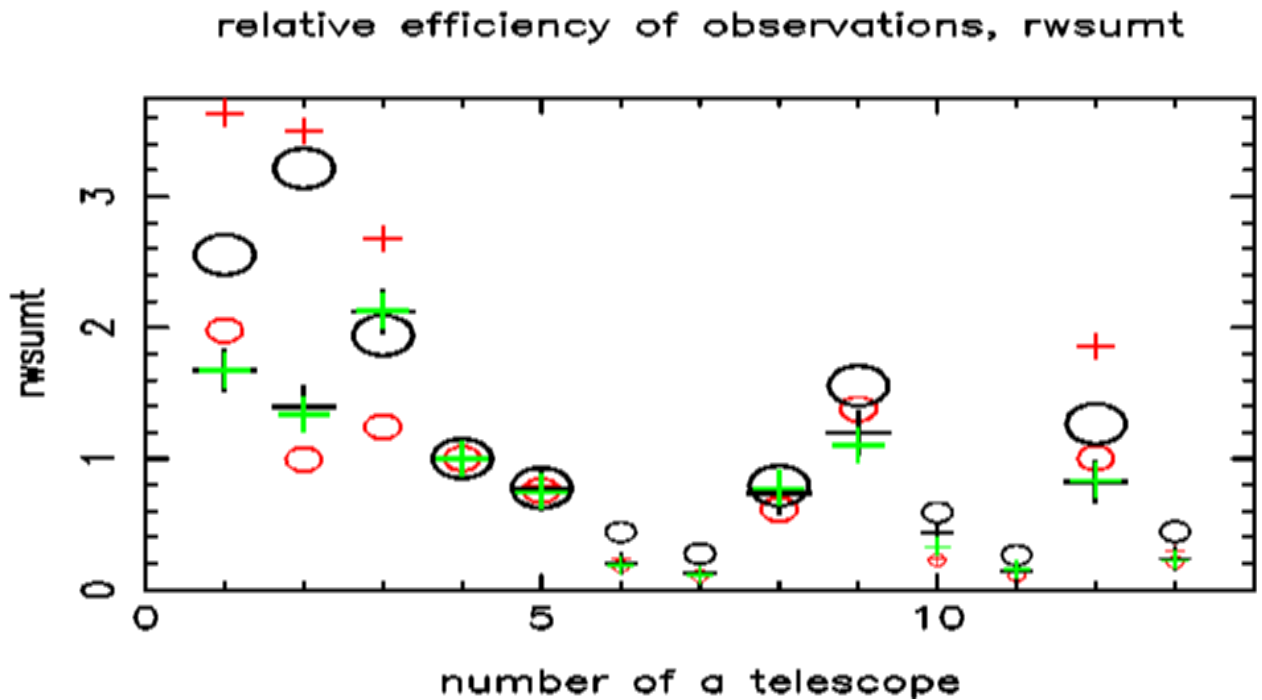


Рисунок 2. Относительная эффективность $r_{wsumt} = (w_{sum}/w_{sumOGLE}) / (t_{sum}/t_{sumOGLE})$ вероятности обнаружения экзопланет (в случае 1562 событий микролинзирования, доступных для наблюдений) в зависимости от номера телескопа в случае, когда 1 м телескопы (с CCD камерой Sinistro), расположенные в одном месте, наблюдают различные события в одно и то же время. Черные или красные кресты и эллипсы приведены для 100-дневного интервала, начинающегося 22 апреля и 1 августа соответственно. Значки для вычислений с реальными значениями t_0 (t_0 – момент времени, соответствующий пику кривой яркости) и со случайными значениями t_0 ($t_0 = R_{NDM} \cdot (t_{mx} + 2t_E) - t_E$ (где t_E – время, равное отношению углового радиуса Эйнштейна к соответствующей относительной скорости, R_{NDM} – случайное значение от 0 до 1, t_{mx} – продолжительность рассматриваемого интервала времени, t_0 – начало интервала) являются большими черными и небольшими красными соответственно. Зеленые крестики приводятся для

реальных значений t_0 и 90-дневного интервала, начинающегося 22 апреля 2011 г. Маленькие значки приведены для неприоритетных (не имеющих права наблюдать в конкретный момент времени те же события, что и более приоритетные телескопы из той же обсерватории) телескопов. При рассмотренном случайном выборе t_0 число пиков кривых яркости было больше.

Отношение r_{50} значения w_{sum} (характеризующего эффективность обнаружения экзопланеты) в случае наблюдений только событий с максимальным увеличением яркости события $A_{max} > 50$ (4% всех событий) к значению w_{sum} в случае возможности наблюдений всех (при любых значениях A_{max}) 1562 событий может отличаться на порядок величины для различных рассматриваемых интервалов времени. Например, для наблюдений с телескопом OGLE r_{50} равно 0.07 и 0.99 для 5-дневных интервалов, начинающихся с 22 апреля и с 1 августа 2011 г. соответственно. Для 100-дневных интервалов r_{50} равно 0.63 и 0.83 соответственно. Для $50 < A_{max} < 200$ (2% всех событий), аналогичные значения r_{50-200} равнялись 0.056, 0.78, 0.09 и 0.50 соответственно. Для 8 рассмотренных телескопов и 100-дневного интервала времени, значения r_{50} и r_{50-200} лежали в пределах 0.58 – 0.74 и 0.06 – 0.21 для интервала времени, начинавшегося 22 апреля, и в пределах 0.73 – 0.88 и 0.29 – 0.52 для интервала, начинающегося 1 августа 2011 г. Значения w_{sum} , полученные в нашем алгоритме, близки к значениям, полученным при выборе событий для наблюдений согласно [Dominik et al. Astron. Nachr, 2010, v. 331, No 7, 671-691].

22. Миграция тел и пыли в экзопланетной системе Проксима Центавра

Звезда Проксима-Центавра (Proxima Centauri) – это третья звёздная компонента (с) в системе Альфа Центавра (Alpha Centauri). Этот красный карлик имеет массу 0.12 от массы Солнца. У этой звезды обнаружена планета Proxima Centauri b ($a_b=0.04857$ а.е., $e_b=0.11$, $m_b=1.17 m_E$) с массой близкой к массе Земли. При гораздо меньшей светимости звезды (чем Солнца) эта планета находится в зоне обитаемости, имеющей радиальную протяженность от ~ 0.042 до ~ 0.082 а.е. Другие планеты, Proxima Centauri c и d, находятся вне этой зоны. Планета c ($a_c=1.489$ а.е., $e_c=0.04$, $m_c=7m_E$) находится за линией льда.

В статьях [60-62], а также в [119-120, 123, 195, 204, 207, 213, 489, 504, 507, 508, 510-511, 517, 522, 530, 531] были приведены результаты расчетов миграции планетезималей из зоны питания экзопланеты c, в том числе к внутренней экзопланете b ($a_b=0.04857$ а.е., $e_b=0.11$, $m_b=1.17m_E$), которая может находиться в зоне обитаемости. Проводились расчеты и для меньшей массы планеты c. При интегрировании использовался симплектический интегратор SWIFT. Для модели **МР** были проведены две серии расчетов. В первой серии расчетов были приняты следующие начальные значения больших полуосей орбит и масс двух экзопланет: $a_b=0.0485$ а.е., $a_c=1.489$ а.е., $m_b=1.27m_E$ и $m_c=12m_E$. Начальные эксцентриситет e_b и наклонение i_b орбиты экзопланеты b считались равными 0, а для экзопланеты c эксцентриситет e_c равнялся 0 или 0.1 и $i_c=e_c/2$ рад. Во второй серии расчетов, с учетом более поздних наблюдательных данных были приняты значения $a_b=0.04857$ а.е., $e_b=0.11$, $m_b=1.17m_E$, $a_c=1.489$ а.е., $e_c=0.04$, $m_c=7m_E$ и $i_b=i_c=0$. В обеих сериях расчетов плотности экзопланет b и c считались равными плотностям, соответственно, Земли и Урана. В каждом варианте расчетов начальные значения больших полуосей орбит 250 планетезималей находились в диапазоне от a_{min} до $a_{min}+0.1$ а.е., где a_{min} варьировалось от 0.9 до 2.2 а.е. с шагом, равным 0.1 а.е. Начальные эксцентриситеты e_o орбит планетезималей равнялись 0 или 0.15 для первой и $e_o=0.02$ или $e_o=0.15$ для второй серии расчетов, а начальные наклоны их орбит равнялись $e_o/2$ рад.

Для модели **МР** планетезимали и экзопланеты считались материальными точками и их столкновения не моделировались. Полученные массивы элементов орбит планетезималей с шагом в 100 лет использовались при вычислении вероятностей их столкновений с экзопланетами. Расчеты вероятностей столкновений проводились по методике, аналогичной использованной в [55], но с учетом соответствующих масс экзопланет и звезды. В случае, когда вероятность столкновения достигала 1 (в расчетах для Солнечной системы таких случаев не наблюдалось), то данная планетезималь больше не учитывалась при вычислении суммарной вероятности столкновений с экзопланетой. Вычислялась также вероятность p_d столкновения планетезимали, мигрировавшей из зоны питания экзопланеты c, с экзопланетой d ($a_d=0.02895$ а.е., $m_d=0.29m_E$, $e_d=i_d=0$), хотя при интегрировании уравнений движения эта экзопланета не рассматривалась. Орбита только одной из нескольких сотен планетезималей пересекала орбиту экзопланеты b, однако такая планетезималь довольно часто сталкивалась с этой экзопланетой. При рассмотрении

тысяч планетезималей величина p_b оказалась больше вероятности столкновения с Землей планетезимали из зоны питания планет-гигантов в Солнечной системе.

Во второй серии расчетов *MP* (с 250 начальными планетезималами в каждом варианте) при $e_o=0.02$ общее число планетезималей равнялось 4500 и только в 5 из 16 вариантов были получены ненулевые вероятности столкновений планетезималей с экзопланетой b . В двух вариантах было получено $p_b=0.004$, в то время как среднее значение p_b для одной из 4500 планетезималей равнялось 4.7×10^{-4} , но среди них были две планетезимали с $p_b=1$. Из 16 вариантов второй серии расчетов *MP* оказалось 4 случая с ненулевым значением p_d . В среднем для одной из 4500 планетезималей вероятность столкновения с экзопланетой d составила $p_d=2.7 \times 10^{-4}$, но среди них была одна планетезималь с $p_d=1$. При $e_o=0.15$ только в 3 из 6 вариантов второй серии расчетов *MP* с 250 начальными планетезималами (при общем числе 1500 планетезималей) были получены ненулевые значения вероятности p_b . Для планеты b среднее значение вероятности для 1500 планетезималей оказалось равным $p_b=2.0 \times 10^{-3}$ и $p_b=1$ для трех из них, а для планеты d среднее значение $p_d=2.0 \times 10^{-3}$ и также для трех планетезималей $p_d=1$. В первой серии расчетов *MP* при $i_c=e_c=0$ и $e_o=0.15$ значения вероятности p_c столкновения одной планетезимали, первоначально находившейся в окрестности экзопланеты c , с этой экзопланетой были порядка $p_c=0.06-0.1$. При $i_c=e_c/2=0.05$ и $e_o=0.15$ было получено, что $p_c=0.02-0.04$. Во второй серии расчетов *MP* значение p_c было в основном в диапазоне от 0.1 до 0.3, кроме вариантов при $a_{\min}=1.4$ а.е. и $e_o=0.02$, в которых было $p_c=0.4-0.8$. Спустя 20 млн лет рост p_c был обычно небольшим, так как к этому времени на эллиптических орбитах оставалось немного планетезималей.

Расчеты для основной модели *C*, в которой планетезимали, столкнувшиеся с планетой, исключались из дальнейшего интегрирования, проводились для исходных данных, аналогичных данным для второй серии расчетов *MP*. В этих расчетах $a_{\min}$ варьировалось от 0.9 до 2.2 а.е., а остальные начальные данные были такие же, как и для второй серии расчетов *MP*. Проводились также расчеты для модели, в которой масса планеты c была в 10 раз меньше современной массы этой планеты. Для обеих моделей (*C* и *MP*) из интегрирования исключались также тела, которые столкнулись со звездой или достигли границы сферы Хилла звезды (1200 а.е.). Рассмотренный интервал времени обычно равнялся нескольким сотням миллионов лет для модели *C* и был не менее 50 млн лет для модели *MP*.

Для модели *C* вероятность p_b столкновения планетезимали из зоны питания планеты c с планетой b была примерно в два раза меньше, а значения p_c были наоборот в среднем почти в 2 раза больше, чем для модели *MP*. Вероятность p_b для модели *C* оценивалась равной 2.0×10^{-4} при $e_o=0.02$ и 10^{-3} при $e_o=0.15$. Общая масса планетезималей, доставленных из зоны питания планеты c к планете b , равна $m_{c-b}=p_b \cdot m_{fzc}$, а масса воды в этих планетезималах $m_{ice}=p_b \cdot k_{ice} \cdot m_{fzc}$, соответственно, где m_{fzc} – общая масса планетезималей за линией льда, попавших в зону питания экзопланеты Проксима Центавра c , k_{ice} – доля воды в планетезималах. Пример эволюции орбиты планетезимали, столкнувшейся с планетой b , приведен на рис. 1.

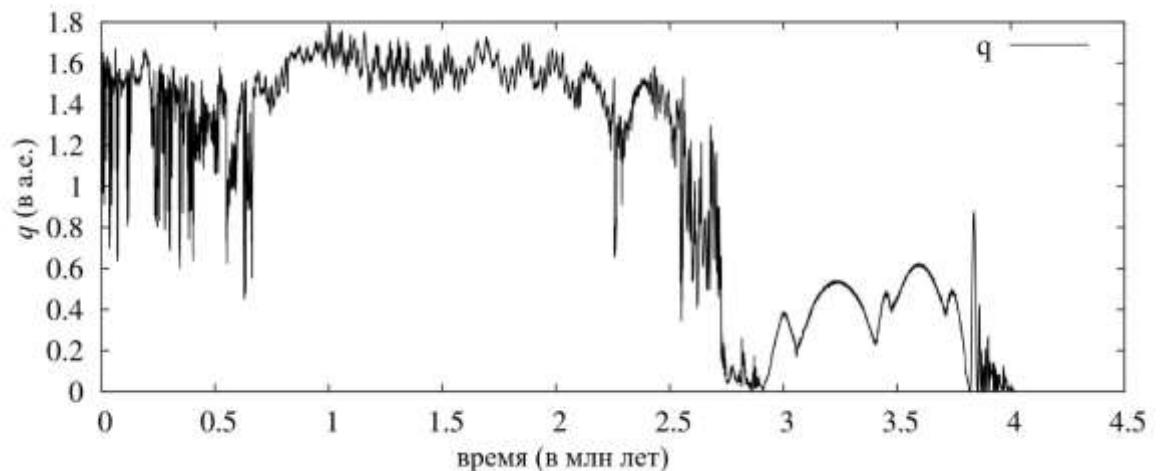


Рисунок 1. График изменения со временем (в млн лет) перигелийного расстояния (q) орбиты планетезимали, первоначально находившейся около орбиты планеты Proxima Centauri c , до ее столкновения с планетой Proxima Centauri b .

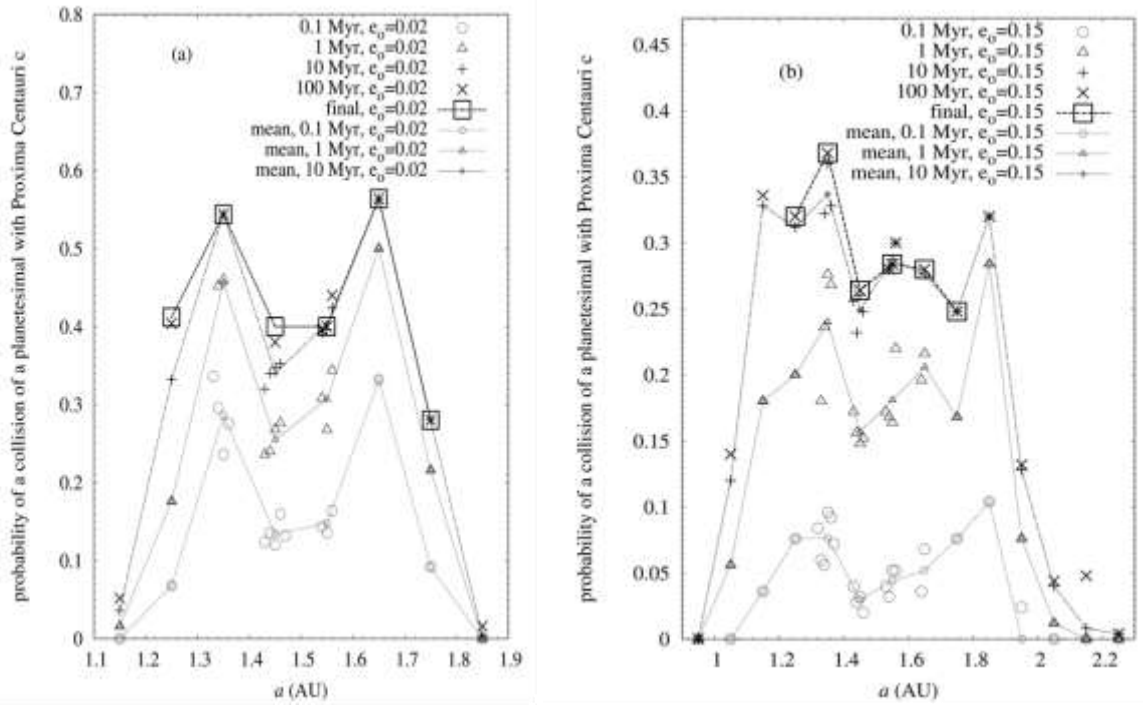


Рисунок 2. Вероятность p_c столкновения планетезимали с планетой Проксима Центавра с при $a = a_{\min} + 0.05 + a_{ts}$, где a_{ts} равно 0, -0.03, -0.02, -0.01 и 0.01 а.е. при шаге интегрирования t_s , равном соответственно 1, 0.1, 0.2, 0.5 и 2 земных суток соответственно. Значения вероятностей приводятся за весь рассмотренный интервал времени, а также за 0.1, 1, 10 и 100 млн лет. Начальные эксцентриситеты e_0 орбит планетезималей равнялись 0.02 на рис. (a) и равнялись 0.15 на рис. (b).

При $e_0 = 0.02$ конечные значения p_c вероятности столкновений планетезималей с планетой c были максимальными (около 0.55) при $a_{\min} = 1.3$ а.е. и $a_{\min} = 1.6$ а.е. и превышали 0.4 при $1.2 \leq a_{\min} \leq 1.6$ а.е. (рис. 2). При $e_0 = 0.15$ конечные значения p_c обычно были меньше, чем при $e_0 = 0.02$, и достигали максимума (около 0.37) при $a_{\min} = 1.3$ а.е. и превышали 0.25 при $1.2 \leq a_{\min} \leq 1.8$ а.е. Отношение $p_{cej} = p_c / p_{ej}$ вероятности столкновения планетезимали с планетой c к вероятности p_{ej} выброса планетезимали на гиперболическую орбиту при $e_0 = 0.02$ и $e_0 = 0.15$ было соответственно в диапазонах 0.8-1.3 и 0.4-0.6 при расчетах при $1.2 < a_0 < 1.8$ а.е. и современной массе планеты c (рис. 3). Это отношение было в интервалах 1.3-1.5 и 0.5-0.6 при массе планеты c , меньшей ее современной массы в два раза.

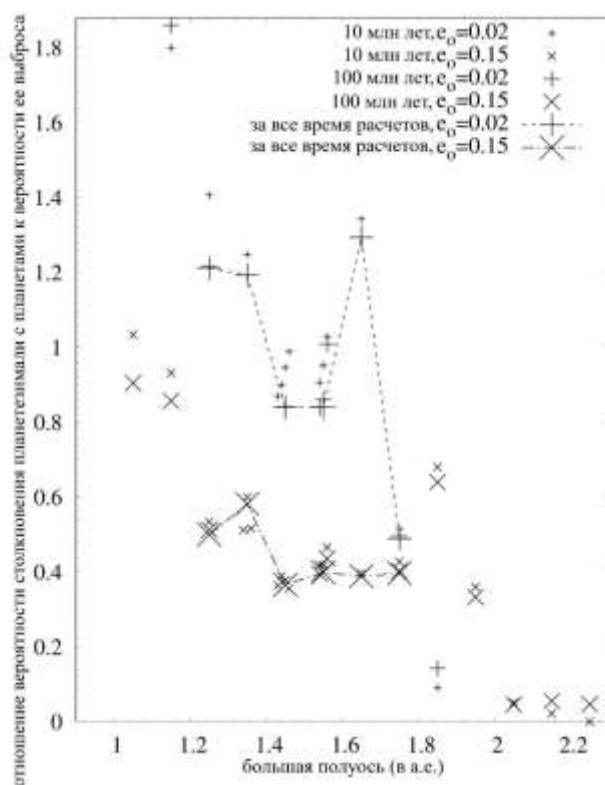


Рисунок 3. График отношения вероятности столкновения планетезимали с планетой к вероятности ее выброса на гиперболическую орбиту в зависимости от начального значения a_0 большой полуоси ее орбиты в окрестности орбиты планеты Proxima Centauri с за все время расчетов (обычно через 1 млрд лет), а также за 10 и 100 млн лет.

Суммарная масса планетезималей, выброшенных на гиперболические орбиты, превышала массу планетезималей, вошедших в планеты. На основании полученных значений p_{ej} из закона сохранения энергии можно оценить, что большая полуось орбиты планеты c в ходе ее аккумуляции могла уменьшиться не менее, чем в полтора раза. Общая масса планетезималей, выброшенных на гиперболические орбиты планетой c , могла быть около $(3.5-7)m_E$. Учитывая массу планеты c (равную $7m_E$), получаем, что масса m_{fzc} планетезималей в зоне питания планеты c могла быть не меньше $10m_E$ и $15m_E$ при $e_0=0.02$ и $e_0=0.15$ соответственно.

При расчетах было получено, что планетезимали могли столкнуться с планетой b уже при массе зародыша планеты c в десять раз меньшей современной массы планеты c . При $m_{fzc}=10m_E$ и $p_b=2 \cdot 10^{-4}$ получаем минимальную оценку $m_{c-b}=2 \cdot 10^{-3}m_E$ (соответствующую $e_0=0.02$) суммарной массы планетезималей, доставленных к планете b из зоны питания планеты c . Для $e_0=0.15$, $m_{fzc}=15m_E$ и $p_b=10^{-3}$ эта оценка равняется $m_{c-b}=1.5 \cdot 10^{-2}m_E$. Большие значения e_0 соответствуют росту эксцентриситетов орбит планетезималей вследствие их взаимного гравитационного влияния. При больших массах планетезималей рост эксцентриситетов орбит планетезималей мог быть больше. Оценки m_{c-b} , сделанные выше при современной массе планеты b , могли быть меньше, если при рассматриваемой бомбардировке масса планеты b была меньше ее современной массы. Однако можно предположить, что планета b сформировалась быстрее, чем планета c , так как планета b гораздо ближе к звезде, чем планета c . Количество вещества, доставленного к планете d могло быть немного меньше, чем к планете b . Вероятность столкновения планетезимали с планетой b , усредненная по всем рассматриваемым планетезималиям, составила $\sim 10^{-4}-10^{-3}$. Суммарная масса планетезималей из зоны питания планеты c , доставленных к планете b , оценивалась равной $0.002m_E$ и $0.015m_E$ при начальных эксцентриситетах орбит планетезималей, равных $e_0=0.15$ и $e_0=0.02$ соответственно. Нами получено, что значения вероятности столкновения с Землей планетезимали из зоны питания планет-гигантов порядка $10^{-6}-10^{-5}$, то есть существенно меньше значений p_b и p_d . Поэтому приток ледяных планетезималей к экзопланетам Проксима Центавра b и d мог быть больше аналогичного притока к Земле. Некоторая часть материала планетезимали, столкнувшейся с экзопланетой, была выброшена с экзопланеты. Обобщая данные ряда публикаций, можно предположить, что доля воды в планетезималиях в зоне питания планеты

Проксима Центавра c могла составлять от 10 до 50%. Масса воды, доставленной к экзопланете Проксима Центавра b , могла превышать массу земных океанов.

В [60] приведены оценки размеров **зоны питания планеты** Проксима-Центавра c при начальных эксцентриситетах орбит планетезималей, равных 0.02 или 0.15. Исследования основаны на результатах моделирования эволюции орбит планетезималей под влиянием звезды и планет Проксима-Центавра c и b . Рассматриваемый интервал времени достигал миллиарда лет. Если рассматривать начальные значения произведения $a \cdot e$, характеризующего изменения расстояния от звезды во время движения планеты Проксима-Центавра c и планетезимали (с начальным эксцентриситетом e_o), (например, $e_c \cdot a_c$ и $e_o \cdot a_{\min 002}$) то имеем $a_c - a_{\min 002} = 0.04a_c + 0.02a_{\min 002} + 2.54a_c \cdot \mu^{1/3}$, $a_{\max 002} - a_c = 0.04a_c + 0.02a_{\max 002} + 2.40a_c \cdot \mu^{1/3}$, $a_c - a_{\min 015} = 0.04a_c + 0.15a_{\min 015} + 2.23a_c \cdot \mu^{1/3}$, и $a_{\max 015} - a_c = 0.04a_c + 0.15a_{\max 015} + 4.3a_c \cdot \mu^{1/3}$, где a_c и $e_c = 0.04$ – большая полуось и эксцентриситет орбиты планеты c , μ – отношение массы планеты c к массе звезды, $a_{\min 002}$, $a_{\max 002}$, $a_{\min 015}$ и $a_{\max 015}$ – минимальные и максимальные начальные значения больших полуосей рассмотренных орбит планетезималей для зоны питания планеты c при начальных эксцентриситетах орбит планетезималей, равных 0.02 и 0.15 соответственно. Коэффициенты перед $a_c \cdot \mu^{1/3}$ в трех вышеприведенных формулах составляют примерно 2.2–2.5, т.е. близки к коэффициентам в $\gamma = (2.1 - 2.45)\mu^{1/3}$ для круговых начальных орбит.

После аккумуляции планеты Проксима-Центавра c некоторые планетезимали могли продолжать двигаться по устойчивым эллиптическим орбитам внутри ее зоны питания, в основном очищенной от планетезималей (рис. 4). Обычно такие планетезимали могут двигаться в некоторых **резонансах** с планетой c , например, в резонансах 1:1 (как троянцы Юпитера), 5:4 и 3:4, и обычно имеют небольшие эксцентриситеты (рис. 5). Некоторые планетезимали, двигавшиеся долгое время (1–2 млн лет) по хаотическим орбитам, попадали в резонансы 5:2 и 3:10 с планетой c и двигались в них минимум десятки миллионов лет.

Рассматривалось движение планетезималей, первоначально находившихся в зоне питания планеты Проксима Центавра c , **на расстояниях от звезды от 500 а.е. до радиуса сферы Хилла** звезды, равного 1200 а.е. [62]. В рассмотренной безгазовой модели основной выброс планетезималей из большей части зоны питания почти сформировавшейся планеты c на орбиты с апоцентричными расстояниями $a(1+e)$, большими 500 а.е., происходил в течение первых 10 млн лет. Только для планетезималей, первоначально находившихся на краях зоны питания планеты, доля планетезималей, достигших 500 а.е. за время большее 10 млн лет, была больше половины. Отдельные планетезимали могли достигать внешней части сферы Хилла звезды и через сотни миллионов лет. Около 90% планетезималей, достигших 500 а.е. от звезды Проксима Центавра, достигли 1200 а.е. от звезды менее, чем за 1 млн лет, при современной массе планеты c . При этом не более 2% планетезималей, имевших апоцентричные расстояния орбит между 500 и 1200 а.е., двигались по таким орбитам в течение более 10 млн лет (но менее нескольких десятков миллионов лет). При массе планеты, равной половине массы планеты c , доля планетезималей, увеличивших апоцентричные расстояния своих орбит с 500 до 1200 а.е. менее, чем за 1 млн лет, была около 70–80%. При современной массе планеты c среди планетезималей, достигших 500 а.е. от звезды, доля планетезималей с эксцентриситетами орбит, большими 1, равнялась 0.05 и 0.1 при начальных эксцентриситетах их орбит $e_o = 0.02$ и $e_o = 0.15$ соответственно. Среди планетезималей, достигших 1200 а.е. от звезды, эта доля была около 0.3 при обоих значениях e_o . Минимальные значения эксцентриситета орбит планетезималей, достигших 500 и 1200 а.е. от звезды, равнялись 0.992 и 0.995 соответственно.

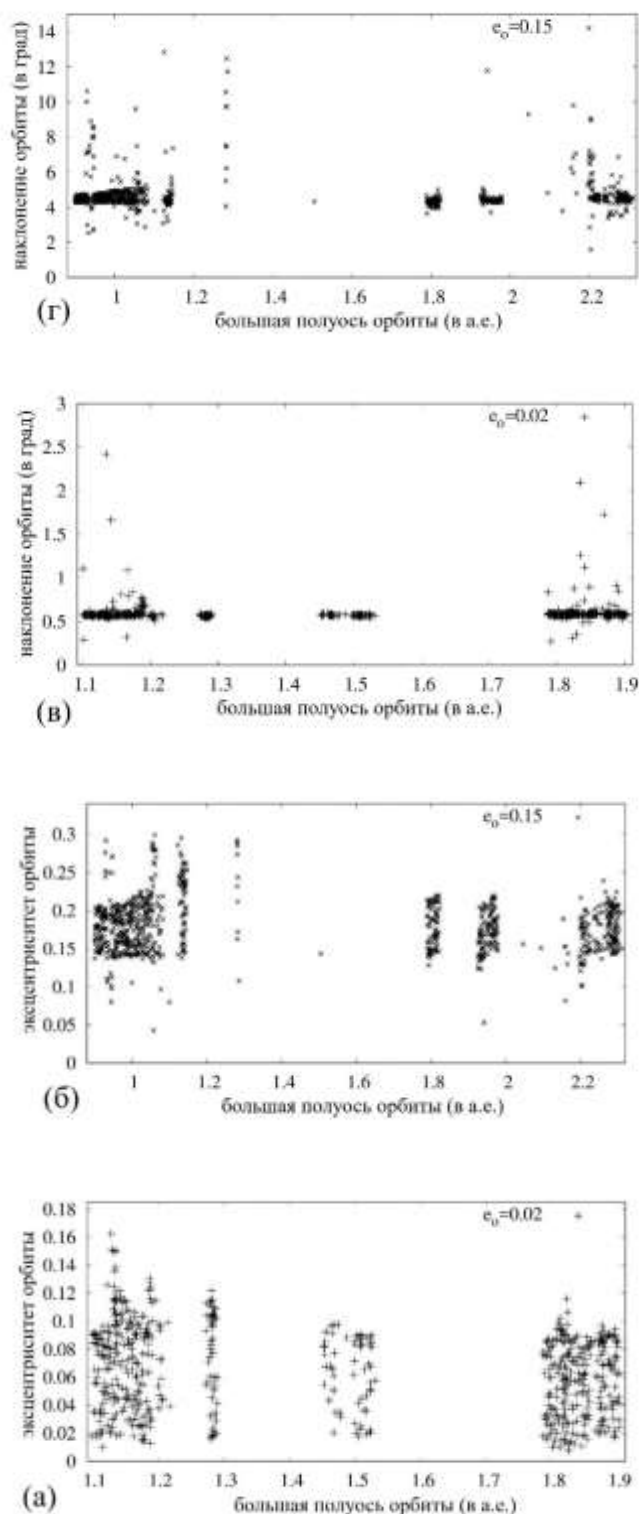


Рисунок 4. Графики распределения планетезималей по большим полуосям (в а.е.) и эксцентриситетам их орбит через 1 млрд лет при начальном эксцентриситете орбит планетезималей, равным 0.02 (а) и 0.15 (б), а также распределения планетезималей по большим полуосям и наклонениям (в градусах) их орбит при $e_0=0.02$ (в) и $e_0=0.15$ (г). Крестики соответствуют различным оставшимся планетезималам. Начальные значения больших полуосей орбит планетезималей варьировались от 0.9 до 2.3 а.е. и находились в зоне питания планеты Proxima Centauri с. Хотя зона питания этой планеты в основном очищалась от планетезималей, отдельные тела продолжали двигаться в ней по резонансным орбитам и через 1 млрд лет.

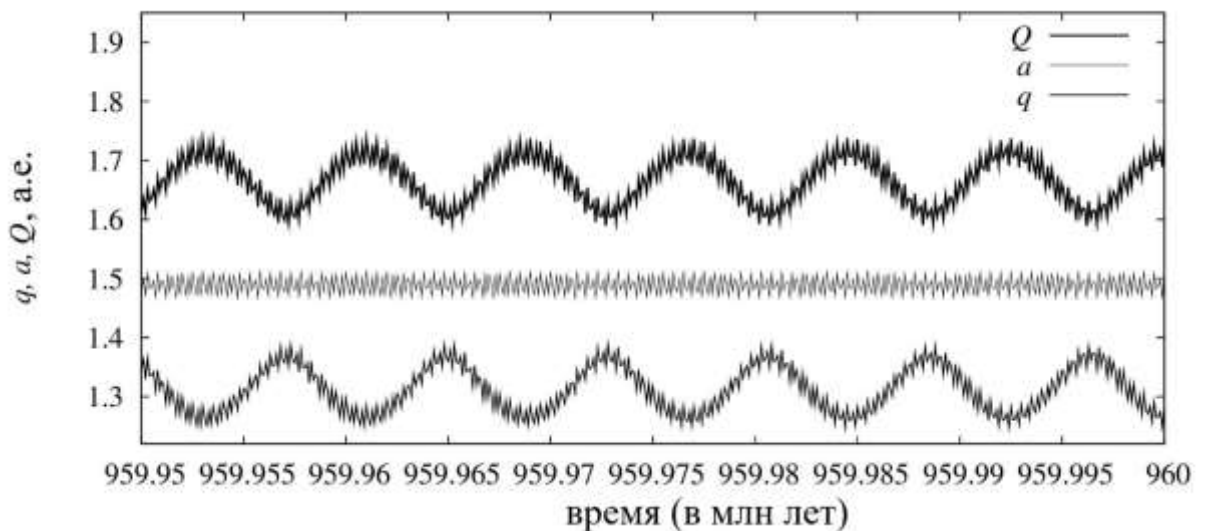


Рисунок 5. Изменения большой полуоси a , перигелийного и афелийного расстояний q и Q орбиты планетезимали со временем (в млн лет) при $a_0=1.50041$ а.е. и $e_0=0.15$. Планетезималь двигалась в резонансе 1:1 с планетой Проксима Центавра c .

В рассмотренной модели во внешней части сферы Хилла звезды диск планетезималей был довольно плоским. Наклонения i орбит более 80% планетезималей, достигших 500 или 1200 а.е. от звезды, не превышали 10° . При современной массе планеты c в среднем по всем вариантам расчетов доля таких планетезималей с $i>20^\circ$ не превышала 1%. Полученные результаты могут быть интересны для понимания движения тел в некоторых других экзопланетных системах, особенно в системах с одной доминирующей планетой. Они могут быть использованы для задания исходных данных для моделей эволюции диска тел во внешней части сферы Хилла звезды Проксима Центавра, которые учитывают гравитационные взаимодействия и столкновения тел между собой, а также влияние других звезд. Сильно наклоненные орбиты тел во внешней части сферы Хилла звезды Проксима Центавра могут быть получены только в основном за счет тел, пришедших в сферу Хилла извне. Радиус сферы Хилла звезды Проксима Центавра на порядок меньше радиуса внешней границы облака Хиллса в Солнечной системе и на два порядка меньше радиуса сферы Хилла Солнца. Облаком Хиллса называют внутреннюю (уплощенную) часть облака Оорта (от 1000–5000 до 20000 а.е.). Поэтому трудно ожидать существования у звезды Проксима Центавра столь же массивного аналога облака Оорта, как у Солнца.

В [119, 520] рассматривалась **миграция пылевых частиц**, начальные орбиты которых были близки к орбите планеты Проксима Центавра c . Начальные эксцентриситеты орбит частиц e_0 равнялись 0.02 или 0.15. При интегрировании использовался метод Булирша-Штера (Bulirsch-Stoer) из пакета SWIFT. Относительная ошибка на шаге интегрирования не превышала 10^{-8} . Миграция пыли изучалась аналогично расчетам [30] для Солнечной системы. Учитывалось гравитационное влияние звезды и планет b и c , эффект Пойтинга-Робертсона (the Poynting-Robertson drag), радиационное давление (radiation pressure) и давление звездного ветра (star wind drag). Отношение давления звездного ветра к давлению из-за эффекта Пойтинга-Робертсона, как и для Солнечной системы, считалось равным 0.35. В разных вариантах отношение β силы радиационного давления к силе гравитации варьировалось от 0.0002 до 1. Для силикатных частиц Солнечной системы такие значения β соответствуют диаметрам частиц d от 2000 до 0.4 микрон; причем d пропорционально $1/\beta$. В Солнечной системе силикатные частицы с $0.001 \leq \beta \leq 0.1$ соответствуют диаметрам от 4 до 400 микрон. При таких значениях β пылевые частицы эффективно доставляют вещество (в том числе летучие) на планету b . Если в системе Проксима Центавра радиационное давление меньше, чем в Солнечной системе (масса этой звезды на порядок меньше массы Солнца), то для одинаковых размеров частиц значение β будет меньше, то есть одинаковым β будут соответствовать большие частицы в системе Проксима Центавра. В Солнечной системе для силикатных частиц плотности 2.5 г/см^3 значения β , равные 0.001, 0.01 и 0.1, соответствовали диаметрам частиц, равным 500, 50 и 5 микрон соответственно. При плотности 1 г/см^3 для тех же значений β диаметры в 2.5 раза больше.

Вероятности столкновений частиц с планетой b при $e_0=0.02$ составляли около 0.15-0.2, 0.1, 0.06-0.08 и 0.016-0.03 при $0.001 \leq \beta \leq 0.004$, $\beta=0.01$, $\beta=0.02$ и $0.04 \leq \beta \leq 0.1$ соответственно. Для $e_0=0.15$ вероятности столкновений частиц с планетой b составляли около 0.07-0.15, 0.04 и 0.01-0.03 при $0.001 \leq \beta \leq 0.01$, $\beta=0.02$ и $0.04 \leq \beta \leq 0.1$ соответственно. Для $e_0=0.02$ вероятности столкновений частиц с планетой c были около 0.016-0.05, 0.02 и 0.01-0.02 при $0.001 \leq \beta \leq 0.004$, $\beta=0.01$ и $0.02 \leq \beta \leq 0.1$ соответственно. Для $e_0=0.15$ вероятности столкновений частиц с планетой c не превышали 0.03 для всех рассмотренных вариантов. Хотя начальные орбиты пылевых частиц были близки в орбите планеты c и масса планеты c больше, чем масса планеты b , при $0.001 \leq \beta \leq 0.1$ (в Солнечной системе при диаметрах частиц порядка 10-100 микрон) больше частиц сталкивались с внутренней планетой b , чем с планетой c .

При $\beta \geq 0.4$ большинство частиц выбрасывались на гиперболические орбиты. При $0.004 \leq \beta \leq 0.2$ большинство частиц столкнулись со звездой, причем вероятность столкновения была максимальна при $\beta=0.04$. Времена эволюции рассматриваемых пылевых дисков были в основном меньше при большем β (при меньшем диаметре частиц). Они составляли 300 лет при $\beta=1$ и несколько миллионов лет при $0.004 \leq \beta \leq 0.04$. Вероятность выпадения пылинки из окрестности орбиты планеты Проксима Центавра c на планету b при $0.001 \leq \beta \leq 0.01$ была в основном около 0.1-0.2, что значительно больше аналогичной вероятности для планетезимали ($\sim 10^{-4}$ - 10^{-3}). На внутренние экзопланеты Проксима Центавра b и d (с большими полуосями орбит, равными 0.05 и 0.03 а.е.) могло быть доставлено много ледяного материала и летучих веществ.

23. Миграция тел в экзопланетной системе ТРАППИСТ-1

Перемешивание тел-планетезималей в экзопланетной системе ТРАППИСТ-1 (TRAPPIST-1) исследовалось в [123, 205, 212, 214, 498, 508, 511, 517, 521, 530, 531] на поздней безгазовой стадии формирования почти сформировавшихся планет. По этой теме планируется опубликовать более подробную журнальную статью. Экзопланетная система TRAPPIST-1 состоит из звезды с массой, равной 0.0898 массы Солнца, и 7 планет (от b до h) с массами от 0.33 до 1.37 массы Земли. Большие полуоси орбит планет находятся в диапазоне от 0.012 до 0.062 а.е. Большие полуоси и эксцентриситеты орбит и массы планет представлены в табл. 1. Считается, что на планетах e , f и g может быть жидкая вода.

Исследовалась поздняя безгазовая стадия образования почти сформировавшихся планет системы TRAPPIST-1. Рассмотренная модель перемешивания тел в зоне планет TRAPPIST-1 также может характеризовать миграцию тел, выброшенных с некоторых планет после столкновений этих планет с некоторыми планетезималиями или другими телами. Движение планетезималей под гравитационным воздействием звезды и семи планет TRAPPIST-1 (от b до h) рассчитывалось с использованием симплектического интегратора RMVS3 из пакета SWIFT аналогично модели C для системы Проксима-Центавра. Планетезимали, столкнувшиеся с планетами или звездой или выброшенные на гиперболические орбиты (достигшие 50 а.е. от звезды), исключались из интегрирования. В каждом варианте расчетов начальные значения больших полуосей орбит $N_{p0}=250$ или $N_{p0}=1000$ планетезималей варьировались от $a_{\min}$ до $a_{\max}$ около большой полуоси орбиты одной из планет, начальные эксцентриситеты их орбит равнялись $e_0=0.02$ или $e_0=0.15$, а их начальные наклонения равнялись $e_0/2$ рад. Значения $a_{\min}$ и $a_{\max}$ представлены в табл. 1. Рассматриваемый диск планетезималей располагался вблизи орбиты одной из рассматриваемых планет. Также проводились расчеты при $a_{\min}=0.07$ а.е. В этих расчетах для «внешнего» диска $a_{\max}=0.1$ а.е. при $N_{p0}=250$ и $a_{\max}=0.09$ а.е. при $N_{p0}=1000$. Расчеты с шагом, равным 0.01, 0.02 и 0.1 земных суток, дали близкие результаты.

Таблица 1. Элементы орбит, массы m (в массах Земли m_E) экзопланет системы TRAPPIST-1 и значения $a_{\min}$ и $a_{\max}$ для рассматриваемых дисков вблизи планет b , c , d , e , f , g и h .

планеты	m/m_E	a , а.е.	e	$a_{\min}$, а.е.	$a_{\max}$, а.е.
b	1.37	0.0115	0.0062	0.0094	0.0137
c	1.31	0.0158	0.0065	0.0137	0.0190
d	0.39	0.0223	0.0084	0.0190	0.0258
e	0.69	0.0292	0.0051	0.0258	0.0339
f	1.04	0.0385	0.0101	0.0339	0.0427
g	1.32	0.0468	0.0021	0.0427	0.0544

<i>h</i>	0.33	0.0619	0.0057	0.0544	0.0694
----------	------	--------	--------	--------	--------

Таблица 2. Число столкновений планетезималей с планетами (от *b* до *h*) в системе TRAPPIST-1 для различных дисков (от *b* до *h*). Начальные эксцентриситеты орбит планетезималей равнялись e_0 . В каждом начальном диске было по 250 планетезималей. Варианты с шагом интегрирования $t_s=0.01$ земных суток отмечены жирными буквами в левой колонке (нижняя строка из двух соседних строк), для других вариантов $t_s=0.1$ земных суток.

	e_0	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	выброшены
<i>b</i>	0.02	199	47	2	2	0	0	0	0
<i>b</i>	0.02	187	54	2	3	2	1	0	0
<i>b</i>	0.15	188	55	6	1	0	0	0	0
<i>b</i>	0.15	180	63	5	2	0	0	0	0
<i>c</i>	0.02	49	153	32	9	3	4	0	0
<i>c</i>	0.02	56	148	26	11	3	5	0	0
<i>c</i>	0.15	77	140	13	10	6	2	2	0
<i>c</i>	0.15	73	141	23	7	0	5	1	0
<i>d</i>	0.02	13	42	120	43	18	11	3	0
<i>d</i>	0.02	13	47	128	29	16	14	3	0
<i>d</i>	0.15	28	69	68	45	16	19	3	2
<i>d</i>	0.15	30	71	59	43	23	19	5	0
<i>e</i>	0.02	5	20	31	110	38	39	3	3
<i>e</i>	0.02	7	27	24	105	46	34	4	3
<i>e</i>	0.15	11	38	32	69	53	32	12	3
<i>e</i>	0.15	7	29	22	72	57	53	3	7
<i>f</i>	0.02	6	11	10	37	98	75	11	2
<i>f</i>	0.02	4	7	14	43	108	58	14	2
<i>f</i>	0.15	6	21	26	42	61	77	12	5
<i>f</i>	0.15	7	20	23	45	57	80	10	8
<i>g</i>	0.02	3	12	12	33	45	110	31	4
<i>g</i>	0.02	1	11	16	20	48	114	33	7
<i>g</i>	0.15	2	12	20	36	62	94	18	6
<i>g</i>	0.15	5	16	16	26	68	95	22	2
<i>h</i>	0.02	1	10	7	15	43	79	90	5
<i>h</i>	0.02	6	3	6	24	31	71	105	4
<i>h</i>	0.15	6	9	8	22	48	83	66	8
<i>h</i>	0.15	1	6	14	31	51	86	54	7

В проведенных расчетах (см. табл. 2 и 3) на гиперболические орбиты было выброшено не более 3.2% планетезималей. Не было выброса планетезималей на гиперболические орбиты для дисков *b*, а для дисков *c* - *d* доля выброшенных планетезималей не превышала 0.01. Столкновений планетезималей с родительской звездой в рассмотренных вариантах расчетов не было. Более половины планетезималей из дисков, первоначально располагавшихся вблизи орбит планет от *b* до *g*, столкнулись с планетами менее чем за 1000 лет, а из дисков *b* - *d* даже за 250 лет. Количество столкновений планетезималей с планетами *c* - *h* за весь рассмотренный интервал времени было больше, чем за 100 тыс. лет, не более, чем на 4%. Планетезимали с динамическим временем жизни более 100 тыс. лет обычно выбрасывались на гиперболические орбиты или сталкивались с планетой *h*. Времена эволюции дисков планетезималей около планет *b* - *h* варьировались от 11 тыс. лет до более чем 60 млн лет при $N_{p0}=250$ и от 33 тыс. лет до более 48 млн лет (в трех дисках *h* оставалось по одному телу) при $N_{p0}=1000$.

Доля планетезималей, столкнувшихся с планетой-хозяином, составляла 0.36–0.8 при $e_0=0.02$ и 0.22–0.75 при $e_0=0.15$. Эта доля (по сравнению со столкновениями со всеми планетами), как правило, уменьшалась с увеличением рассматриваемого интервала времени. В каждом варианте расчетов была хотя бы одна планета, для которой количество столкновений планетезималей превышало 25% от числа столкновений планетезималей с планетой-хозяином. Доля столкновений

планетезималей с планетой-«хозяином» обычно была меньше для дисков, расположенных дальше от звезды. Для исходного диска вблизи орбиты планеты h (с массой $m_h=0.33m_E$, где m_E – масса Земли) число столкновений планетезималей с планетой g (с массой $m_g=1.32m_E$) было примерно таким же, как с планетой h .

Таблица 3. Число столкновений планетезималей с планетами (от b до h) в системе TRAPPIST-1 для различных дисков (от b до h). Начальные эксцентриситеты орбит планетезималей равнялись e_0 . В каждом начальном диске было по 1000 планетезималей. Варианты с шагом интегрирования $t_s=0.01$ земных суток отмечены жирными буквами в левой колонке (нижняя строка из двух соседних строк), для других вариантов $t_s=0.02$ земных суток. N_1 – число тел, оставшихся на эллиптических орбитах после 1000 лет. Эволюция диска заканчивалась через T млн лет.

	e_0	b	c	d	e	f	g	h	выброшены	N_1	T , млн лет
b	0.02	780	199	12	3	3	1	2	0	293	8.45
b	0.02	802	178	10	6	4	0	0	0	318	5.51
b	0.15	743	219	21	8	4	2	2	0	47	0.142
b	0.15	741	228	15	10	4	1	1	0	53	0.053
c	0.02	230	587	111	46	12	14	0	0	227	0.033
c	0.02	175	633	121	42	12	14	2	1	245	0.065
c	0.15	321	518	77	32	15	5	0	0	32	0.060
c	0.15	313	529	78	44	15	19	0	2	35	0.103
d	0.02	58	205	445	155	62	64	9	2	104	0.888
d	0.02	52	197	459	167	69	48	8	0	98	2.60
d	0.15	104	314	241	168	83	67	21	2	132	0.286
d	0.15	109	304	282	177	63	55	6	4	108	0.332
e	0.02	14	73	133	432	171	143	30	4	196	0.620
e	0.02	29	88	114	420	187	132	19	11	204	0.245
e	0.15	27	132	160	267	200	179	27	0	240	0.555
e	0.15	32	109	163	291	203	170	21	11	260	0.561
f	0.02	10	47	59	168	371	290	44	11	291	0.818
f	0.02	27	50	56	159	371	267	55	15	330	33.23
f	0.15	21	74	76	173	261	310	57	28	359	1.30
f	0.15	24	75	80	186	261	305	53	16	391	0.436
g	0.02	15	32	50	116	188	457	124	18	398	1.78
g	0.02	9	37	45	98	202	475	123	11	424	4.81
g	0.15	10	50	67	120	227	402	101	23	484	0.975
g	0.15	17	45	59	118	252	405	81	23	456	22.60
h	0.02	9	31	28	77	143	282	407	22	590	>48
h	0.02	5	31	31	80	153	279	406	14	598	>44
h	0.15	13	45	49	90	191	338	252	21	726	>25
h	0.15	9	37	47	89	165	376	246	31	726	11.28

Планетезимали, мигрировавшие с расстояний больших 0.7 а.е., могли столкнуться со всеми планетами, но большинство их столкновений (>70%) было с планетами g и h , и доля столкновений была больше для планет, более удаленных от звезды. Планетезимали могли столкнуться со всеми планетами для дисков $d - h$ и по крайней мере с планетами $b - e$ для дисков $b - c$. Поэтому внешние слои соседних планет в системе TRAPPIST-1 могут включать аналогичный материал, если вблизи их орбит на поздних стадиях аккумуляции планет было много планетезималей. Аналогичное перемешивание планетезималей было получено мною при моделировании аккумуляции планет земной группы (см. [15] и раздел 5 данной книги).

24. Миграция тел в экзопланетной системе Глизе 581

Первоначально считалось, что внесолнечная система Глизе 581 включает в себя звезду с массой, равной 0.307 массы Солнца, и пять планет (e, b, c, g, d , в порядке удаления от звезды).

Сейчас предполагается, что существуют только три планеты (e , b , c), близкие к звезде. Не подтвержденная планета Глизе 581g (с массой около двух масс Земли) находилась бы в зоне обитаемости своей звезды. Для этой планетной системы расчеты проводились Ипатовым [209, 212, 511, 530, 531] (по этой теме планируется опубликовать более подробную журнальную статью) для двух моделей: (1) для пяти планет, включая не подтвержденные планеты (при круговых начальных орбитах планет) и (2) с тремя подтвержденными планетами (с известными эксцентриситетами орбит). В каждом **варианте расчетов** начальные значения больших полуосей орбит $N_0=250$ или $N_0=1000$ тел-планетезималей варьировались от $a_{\min}$ до $a_{\max}$ около большой полуоси орбиты одной из планет, начальные эксцентриситеты их орбит равнялись $e_0=0.02$ или $e_0=0.15$, а их начальные наклонения равнялись $e_0/2$ рад. Значения $a_{\min}$ и $a_{\max}$ и большие полуоси и эксцентриситеты орбит и массы планет представлены в Табл. 1. В моих расчетах с пятью планетами эксцентриситеты и наклонения орбит планет считались равными 0. Рассматриваемый диск планетезималей располагался вблизи орбиты одной из рассматриваемых планет. Рассматривался также внешний диск h , для которого $a_{\min}=0.25$ а.е. и $a_{\max}=0.3$ а.е. Движение планетезималей под гравитационным влиянием звезды и планет моделировалось с использованием симплектического интегратора RMVS3 из пакета SWIFT. Планетезимали, столкнувшиеся с планетами или звездой или выброшенные на гиперболические орбиты (достигшие 50 а.е. от звезды), исключались из интегрирования.

Таблица 1. Элементы орбит и массы m (в массах Земли m_E) экзопланет системы Глизе 581 и значения $a_{\min}$ и $a_{\max}$ для рассматриваемых дисков вблизи планет e , b , c , g и d . Слева приводятся начальные данные для вариантов расчетов с пятью планетами, справа – с тремя планетами.

планеты	m/m_E	a , а.е.	e	$a_{\min}$, а.е.	$a_{\max}$, а.е.
e	1.7, 1.657	0.02815, 0.029	0.0, 0.125	0.022	0.0344
b	15.8, 15.2	0.0406, 0.041	0.0, 0.022	0.0344	0.0563
c	5.5, 5.65	0.0721, 0.074	0.0, 0.087	0.0563	0.1
g	2.2	0.13	0.0	0.1	0.174
d	6.98	0.218	0.0	0.174	0.25

Сначала ниже я обсуждаю **результаты расчетов, которые похожи для расчетов с 3 и 5 планетами**. В таких расчетах не было столкновений планетезималей со звездой. Доля p_{ej} планетезималей, выброшенных на гиперболические орбиты, была больше для дисков, расположенных дальше от звезды. Для планетезималей из зон питания планет, расположенных близко к звезде, большинство столкновений планетезималей с планетами пришлось на первую тысячу лет. Однако несколько планетезималей могли оставаться на эллиптических орбитах в течение миллионов и десятков миллионов лет. Некоторые планетезимали, первоначально расположенные вблизи орбиты одной из планет, могли также выпасть на большинство других планет.

Некоторые расчеты для системы Glisse 581 с $N_0=250$ для 5 планет и 10 млн лет обсуждались в [209]. Позже такие расчеты были сделаны для больших интервалов времени. Для **расчетов с 5 планетами** около 20-60% и менее 10% планетезималей все еще двигались по эллиптическим орбитам через несколько сотен миллионов лет при $e_0=0.02$ и $e_0=0.15$ соответственно.

Ниже в трех абзацах обсуждаются результаты эволюции дисков за **первые 10 млн лет**. В табл. 2 приведено число столкновений N_e , N_b , N_c , N_g и N_d планетезималей с планетами e , b , c , g и d в течение 10 млн лет. Доля p_{ej} выброшенных планетезималей была больше для дисков, расположенных дальше от звезды. Для дисков, соответствующих планетам, доля p_{ej} не превышала 0.05 и 0.15 при e_0 , равном 0.02 и 0.15 соответственно. Для диска h доля p_{ej} составляла около 0.01 и 0.27-0.4 при $e_0=0.02$ и $e_0=0.15$ соответственно. При $e_0=0.15$ доля оставшихся после 10 млн лет планетезималей не превышала 0.03 для дисков e , b , c и g и 0.1 для диска d . При $e_0=0.02$ эта доля не превышала 0.24 для диска e , 0.46 для дисков b и d , и 0.64 для дисков c и g .

При $e_0=0.02$ доля начальных планетезималей, столкнувшихся с планетой-хозяином, составляла около 0.4-0.46 для дисков e , b и d , около 0.3 для диска c , 0.18 для диска g (табл. 2). При $e_0=0.15$ такая доля составила 0.5, 0.8, 0.4, 0.2 и 0.5 для дисков e , b , c , g и d соответственно. Доля планетезималей, столкнувшихся с одной из соседних планет (близких к планете-хозяину) для дисков e , b , c , g и d , составила 0.26, 0.06, 0.04, 0.09 и 0.04 при $e_0=0.02$. Она составила 0.5, 0.12, 0.4, 0.35 и 0.15 при $e_0=0.15$.

Некоторые планетезимали, первоначально находившиеся рядом с одной из планет, могли также выпадать и на другие планеты. Наибольшее отношение K_a числа планетезималей, выпавших на другую планету, к числу планетезималей, выпавших на планету-хозяина исходного диска при $e_0=0.02$, наблюдалось для планеты e , которая находится ближе всего к звезде. Для диска e отношение N_b/N_e составляло около 0.55-0.75 и 0.98-1.2 при $e_0=0.02$ и $e_0=0.15$ соответственно. При $e_0=0.02$ отношение K_a для диска g равнялось 0.5 и было меньше 0.15 для дисков b , c и d . При $e_0=0.15$ для диска g значение N_g было даже примерно в два раза меньше, чем N_d . При $e_0=0.15$ отношение K_a для диска b было меньше 0.21, но для диска c оно составляло около 0.8-0.9. При $e_0=0.15$ для диска d отношение N_c/N_d составляло примерно 0.3, хотя планеты c и d находились не близко друг к другу. Планетезимали из диска h выпадали на четыре планеты при $e_0=0.15$, но не сталкивались ни с одной планетой при $e_0=0.02$.

Для дисков, близких к звезде, большинство столкновений планетезималей с планетами происходило за **первую тысячу лет**. При $e_0=0.02$ отношение k_1 общего числа столкновений планетезималей с планетами за первую тысячу лет к числу столкновений за 10 млн лет было между 0.6 и 0.67 для дисков e , b и c ; оно было равно 0.3 для диска g и находилось между 0.23 и 0.49 для диска d . Последний диапазон отмечался при различных значениях t_s шага интегрирования. Для всех остальных дисков такой диапазон значений k_1 был узким для разных рассмотренных t_s . При $e_0=0.15$ отношение k_1 составило соответственно 0.85, 0.8, 0.45, 0.13–0.15 и 0.06–0.08 для дисков e , b , c , g , d и h .

Отметим, что для диска g при $e_0=0.15$ доли планетезималей, столкнувшихся с планетами c и d (с каждой), были больше, чем доля планетезималей, столкнувшихся с планетой-хозяином g . В расчетах с пятью планетами около 5% планетезималей из окрестности орбиты внешней планеты d (с массой в 7 масс Земли) выпадали на планету g . Поэтому к такой планете g мог бы быть приток тел, содержащих воду.

Для вариантов, представленных в табл. 2 при $T=10$ млн лет, расчеты проводились и для интервалов времени, **больших 10 млн лет**. При шаге интегрирования t_s , равном 0.01 земных суток, они составляли несколько десятков млн лет (обычно немного менее 100 млн лет), а при t_s , равном 0.04 земных суток, - несколько сотен миллионов лет. Расчеты были приостановлены, так как число оставшихся планетезималей в вариантах не менялось в течение длительного интервала времени. По сравнению с данными табл. 2 при больших интервалах времени в итоговой таблице значения числа столкновений планетезималей с планетами отличались максимум на несколько единиц, а значения, меньшие 40, не менялись. Изменения числа оставшихся планетезималей не превышали 10% при $e_0=0.02$, а при $e_0=0.15$ число оставшихся планетезималей обычно отличалось только на единицу по сравнению с данными в табл. 2. Только для диска h и $e_0=0.15$ число оставшихся планетезималей при большом интервале времени было меньше значений в табл. 2 примерно на 30 из-за выброса планетезималей на гиперболические орбиты.

При $e_0=0.15$ и рассмотрении дисков планетезималей около планет, оставшиеся планетезимали двигались по устойчивым орбитам в **резонансах с планетами**. При эволюции **диска e** при расчетах с шагом t_s , равном 0.01 и 0.04 земных суток, через время соответственно около 80 и 300 млн лет в обоих вариантах остались по 7 одинаковых (для обоих вариантов) начальных планетезималей на одинаковых орбитах. Три планетезимали двигались в резонансе 4:3 с движением планеты e внутри ее орбиты. Другие три планетезимали двигались в резонансе 5:4 и одна планетезималь – в резонансе 1:1 с движением планеты e . Через время эволюции **диска b** около 100 и 350 млн лет при расчетах соответственно с t_s , равном 0.01 и 0.04 земных суток, в обоих вариантах остались 2 одинаковых начальных планетезимали, двигавшихся по одинаковым орбитам за орбитой планеты b в резонансе 4:5 с этой планетой. После около 100 и 360 млн лет эволюции **диска c** при расчетах соответственно с t_s , равном 0.01 и 0.04 земных суток, в обоих вариантах остались 3 одинаковых начальных планетезимали, двигавшиеся по одинаковым орбитам в резонансе 1:1 с планетой c . После около 100 и 330 млн лет эволюции **диска g** при расчетах соответственно с t_s , равном 0.01 и 0.04 земных суток, в обоих вариантах остались 3 одинаковых начальных планетезимали, двигавшиеся по одинаковым орбитам в резонансе 1:1 с планетой g , а также одна планетезималь, двигавшаяся за орбитой планеты g в резонансе 4:5 с этой планетой. При эволюции **диска d** при расчетах с t_s , равном 0.01 и 0.04 земных суток, через время соответственно около 50 и 200 млн лет в обоих вариантах остались 16 одинаковых (для обоих вариантов) начальных планетезималей, двигавшихся в резонансе 1:1 с движением планеты d . Во внешнем резонансе 5:6 с планетой d двигались 7 планетезималей при $t_s=0.01$ земных суток и 4 планетезимали при $t_s=0.04$ земных суток.

При эволюции диска h после 20 и 150 млн лет осталось 63 и 32 планетезималей при расчетах с t_s , равном соответственно 0.01 и 0.04 земных суток. Не все из них двигались по резонансным орбитам. Во внешнем резонансе 4:5 с планетой h двигались 13 планетезималей при расчетах с обоими значениями t_s , а во внешнем резонансе 3:4 с планетой h двигались 12 планетезималей при расчетах с t_s , равном 0.01 земных суток, и 11 планетезималей при $t_s=0.04$ земных суток. Число планетезималей, двигавшихся в резонансе 5:8, было больше (6 вместо 2) при расчете с меньшим значением t_s . Разница в этих расчетах связана с разным рассмотренным интервалом времени. При большем интервале времени было выброшено 104 планетезимали вместо 89.

Таблица 2. Число столкновений N_e , N_b , N_c , N_g и N_d планетезималей с планетами e , b , c , g и d в течение 10 млн лет при шаге интегрирования t_s , равном 0.01, 0.04 или 0.1 земных суток. Начальные эксцентриситеты орбит планетезималей были равны e_0 (0.02 или 0.15). Число начальных планетезималей в каждом варианте составляло 250. N_{ej} - число планетезималей, достигших 50 а.е. от звезды. N_{el} - число планетезималей, оставшихся на эллиптических орбитах.

диск	e_0	t_s	N_e	N_b	N_c	N_g	N_d	N_{ej}	N_{el}
e	0.02	0.01	116	66	5	0	2	3	58
e	0.02	0.04	106	80	5	0	0	0	59
e	0.02	0.1	120	66	3	1	1	0	59
b	0.02	0.01	10	117	12	0	0	2	109
b	0.02	0.04	7	111	16	1	1	2	112
c	0.02	0.01	1	13	79	1	3	4	149
c	0.02	0.04	1	9	73	7	6	4	150
g	0.02	0.01	0	3	17	51	14	5	160
g	0.02	0.04	0	6	12	44	22	6	160
d	0.02	0.01	0	4	11	8	104	9	114
d	0.02	0.04	0	6	4	5	118	12	105
d	0.02	0.1	0	3	6	8	114	13	106
h	0.02	0.04	0	0	0	0	0	2	248
e	0.15	0.01	120	117	4	1	0	1	7
e	0.15	0.04	105	125	8	2	1	2	7
b	0.15	0.01	8	200	29	3	3	4	3
b	0.15	0.04	17	183	38	1	1	7	3
c	0.15	0.01	1	85	111	16	16	17	4
c	0.15	0.04	4	95	105	13	16	13	4
g	0.15	0.01	0	35	54	45	88	21	7
g	0.15	0.04	5	41	52	34	83	30	5
d	0.15	0.01	1	14	35	16	123	37	24
d	0.15	0.04	1	20	36	21	118	30	24
h	0.15	0.01	0	8	10	13	53	68	98
h	0.15	0.04	0	7	8	12	84	82	63

При $e_0=0.02$ анализ орбит оставшихся планетезималей пока не проводился. В этих расчетах также есть случаи резонансов 1:1 с планетами. Оставшиеся планетезимали двигались в основном по орбитам, достаточно удаленным от орбит планет. В этом случае представляется интерес изучение тех начальных зон в диске, из которых планетезимали или столкнулись с планетами или покинули планетную систему, - при каких резонансах с планетами это происходит.

Для расчетов с 3 планетами при $N_0=1000$ доля планетезималей, оставшихся на эллиптических орбитах через 1 млн лет, была намного меньше, чем для расчетов с 5 планетами, в основном из-за эксцентричных орбит планет для расчетов с 3 планетами. Результаты эволюции таких дисков представлены в табл. 3. Для трех планет эволюция всех трех дисков (e , b , c) завершилась менее чем за 1.3 млн лет при $e_0=0.15$ и не более чем за 1.1 млн лет для дисков e и b при $e_0=0.02$. В конце эволюции диска c и $e_0=0.02$, шесть оставшихся планетезималей двигались в резонансе 1:1 с планетой c , а одна планетезималь – во внешнем резонансе 4:5 с этой планетой.

В конце эволюции при $e_0=0.02$ доля начальных планетезималей, столкнувшихся с планетой-хозяином, составила около 0.44, 0.74 и 0.57 для дисков e , b и c соответственно. При $e_0=0.15$ она составила 0.4, 0.79 и 0.52 соответственно. При $e_0=0.02$ доля планетезималей, столкнувшихся с одной из соседних планет (близких к планете-хозяину), для дисков e , b и c составила 0.50, 0.20 и 0.36 соответственно. При $e_0=0.15$ она составила 0.52, 0.15 и 0.40 соответственно. При рассмотрении миграции планетезималей с расстояний, больших $a_{\max}$ для диска c , отношение столкновений планетезималей с планетами c и b составило 2 и 2.9 при $e_0=0.02$ и $e_0=0.15$ соответственно. Эти результаты показывают, что внешние слои соседних экзопланет в экзопланетной системе Глизе 581 могут включать аналогичный материал. Диск g в расчетах с тремя планетами был внешним относительно этих планет, и больше половины планетезималей в нем остались на эллиптических орбитах.

Таблица 3. Число столкновений (N_e , N_b и N_c) планетезималей с планетами (e , b и c) в течение T млн лет при шаге интегрирования t_s , равном 0.04 земных суток, для расчетов с 3 планетами. Начальные эксцентриситеты орбит планетезималей были равны e_0 (0.02 или 0.15). Число начальных планетезималей в каждом варианте было равно 1000. N_{ej} - число планетезималей, достигших 50 а.е. от звезды. N_{el} - число планетезималей, оставшихся на эллиптических орбитах.

диск	e_0	t_s	N_e	N_b	N_c	N_{ej}	N_{el}	T , млн лет
e	0.02	0.04	445	501	47	9	0	0.11
b	0.02	0.04	28	742	205	25	0	0.91
c	0.02	0.04	22	363	568	40	7	146.
q	0.02	0.04	6	102	211	29	652	15.
e	0.15	0.04	401	524	65	10	0	0.13
b	0.15	0.04	45	787	150	18	0	0.25
c	0.15	0.04	26	403	524	47	0	1.28
q	0.15	0.04	7	87	253	31	622	13.

НЕАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

25. Минимизация числа переходов при трассировке двухслойных микросхем

Совместно с Н.Н. Козловым и В.Н. Торопцевой С.И. Ипатов принимал участие в разработке алгоритмов и компьютерных программ по минимизации числа переходов при трассировке двухслойных печатных плат. По этой теме в 1990 г. был опубликован препринт [231]. В 1990-е годы подобная тематика в России стала не актуальной в связи с развалом российской микроэлектроники.

26. Исследования генерации акустических волн под воздействием флюидов на стенки пор и их распространения в пористой среде с флюидами и газом

С.И. Ипатов отвечал за математическое моделирование в гранте нефтяной компании Шлюмберже (Schlumberger) «Исследования генерации акустических волн под воздействием флюидов на стенки пор и их распространения в пористой среде с флюидами и газом» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина (1999-2002). По результатам этих исследований была опубликована совместная статья [69] «Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах» в журнале Геофизика. Результаты этих исследований также вошли в разделы [79, 80, 81, 83] монографий Кременецкого М.И. и Ипатова А.И. (А.И. Ипатов – брат С.И. Ипатова).

Аннотация. Наиболее детально экспериментально были изучены явления, вызывающие при фильтрации в породах как акустическую, так и электромагнитную эмиссию. Форма и величина регистрируемых на спектрах аномалий амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) зависят в первую очередь от типа коллектора и структуры его порового пространства. Спектры АЧХ сигналов акустической эмиссии, полученные для сухих образцов с явно выраженными крупными каналами фильтрации и высокими проницаемостями k , легко отличить от аналогичных результатов в породах с меньшими k и с более сложной структурой пор (с наличием средних и мелких пор).

Скважинные исследования на основе анализа спектральных характеристик шумов эмиссии у некоторых физических полей позволяют в процессе фильтрации в горной породе оценить тип дренируемого флюида и характер порового пространства в отдельных толщинах пласта. Обоснование наблюдаемых явлений получено путем физического и математического моделирования фильтрации жидкости и газа в породах в широком диапазоне изменения петрофизических свойств и расходов фильтрации, а также для различных термобарических условий.

Список публикаций С. И. Ипатова

List publications by S.I. Ipatov

Текущий список публикаций на русском языке дополняется со временем и находится на сайте https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYFBAaaaaaBye6tCmVUGVWRphNZ_k-WI?e=DjHucX. Большинство статей на английском языке можно бесплатно загрузить, используя ссылки, приведенные ниже. В частности, много статей лежит на сайтах https://www.researchgate.net/profile/S_Ipatov/publications, <https://independent.academia.edu/SergeiIpatov> и <http://arxiv.org>.

List of my publications in English can be found on <http://siipatov.webnode.ru/publications/> and in the file <https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMahBwAAAAABRRn0ODVZPKj5m4sW9wQodg?e=zLQQFp>. Most of my papers in English can be downloaded free from https://www.researchgate.net/profile/S_Ipatov/publications, <https://independent.academia.edu/SergeiIpatov> and <http://arxiv.org>. Most of the journal papers can be downloaded for personal (non-commercial) use only.

Сайты, на которых приведен список публикаций С.И. Ипатова:

Websites with a list of publications by S.I. Ipatov:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603765191>
<https://www.webofscience.com/wos/author/record/O-2302-2014>. WoS Researcher ID: O-2302-2014.

<https://publons.com/researcher/1711006/sergei-ipatov/publications/>
<https://scholar.google.com/citations?user=496SwBAAAAAJ> (on this website the number of citations is greater than 3000 and h-index=28) and <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=si+ipatov&btnG=Search> – lists most of my English publications (with citations and links to abstracts of my papers). The links to papers are for journals, which can be not free to download papers.

https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=18595. e-library SPIN-код: 7182-9350. Список статей на английском языке не полный.

<https://orcid.org/0000-0002-1413-9180>

[https://ui.adsabs.harvard.edu/search/q=author%3A\(ipatov%2C%20s.\)&sort=date%20desc%2C%20bibcode%20desc&p=0](https://ui.adsabs.harvard.edu/search/q=author%3A(ipatov%2C%20s.)&sort=date%20desc%2C%20bibcode%20desc&p=0) or http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html (and print: ipatov, s.) – the list of publications that includes abstracts of publications (including abstracts of all papers in English and preprints; may include some abstracts for which there are no links on my web site and in the text below).

<https://openalex.org/authors?page=1&filter=ids.openalex%3Aa5023189280>

https://www.researchgate.net/profile/S_Ipatov/publications (you can look the links to files with papers on this website). С этого сайта и с сайта <https://independent.academia.edu/SergeiIpatov> можно бесплатно скачать много моих публикаций.

<https://independent.academia.edu/SergeiIpatov> (below in references you can use web addresses without text with the name of publication after the number; if the reference will not work you can find the correct reference in the list of all publications on the website). May be there are some files in academia and researchgate (for nonjournal publications) to which the links are not listed below.

<https://scinapse.io/authors/2515993428> may be now it is needed to pay to search on scinapse.io?

<https://arxiv.org/search/astro-ph?searchtype=author&query=Ipatov,+S> – with files of my papers

Статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в WoS и Scopus.

Papers in the journals indexed in WoS and Scopus.

1. Ипатов С.И. О гравитационном взаимодействии двух планетезималей. *Астрономический журнал*. 1981. Т. 58. N 3. С. 620-629. Перевод: Ipatov S.I., On the gravitational interaction of two planetesimals, *Soviet Astronomy* (translated from *Astronomicheskii Zhurnal*), 1981, v. 25 (58), N 3, pp. 352-357. <https://www.researchgate.net/publication/234297279>. <https://www.academia.edu/44447765>. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1981SvA....25..352I>.

2. Ипатов С.И. Моделирование на ЭВМ эволюции плоских колец гравитирующих частиц, движущихся вокруг Солнца. *Астрономический журнал*. 1981. Т. 58. N 5. С. 1085-1094. Перевод: Ipatov S.I., Computer modeling of the evolution of the plane rings of gravitating particles moving around the Sun, *Soviet Astronomy* (translated from *Astronomicheskii Zhurnal*), 1981, v. 25 (58), N 5, pp. 617-623. <https://www.researchgate.net/publication/234372167>. <https://www.academia.edu/44448038>. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1981SvA....25..617I>.

3. Ипатов С.И. Твердотельная аккумуляция планет земной группы. *Астрономический*

- вестник. 1987. Т. 21, N 3. С. 207-215. Перевод: Ipatov S.I., Solid body accumulation of terrestrial planets, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 1987, v. 21, N 3, pp. 129-135. <https://www.researchgate.net/publication/234436814>. <https://www.academia.edu/59079931>.
4. Ipatov S.I., Accumulation and migration of the bodies from the zones of giant planets, *Earth, Moon, and Planets*, 1987, v. 39, N 2, pp. 101-128. <https://www.researchgate.net/publication/227047521>. <https://www.academia.edu/44447538>. <https://doi.org/10.1007/BF00054059>. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987EM%26P...39..101I>.
5. Ипатов С.И. Численные исследования возможной эволюции орбит Плутона и тел занептунового пояса. *Кинематика и физика небесных тел*. 1988. Т. 4. N 6. С. 73-78. Перевод: Ipatov S.I., Computer simulation of the possible evolution of the orbits of Pluto and bodies of the trans-Neptune belt, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* (translated from *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*), 1988, v. 4, N 6, pp. 76-82. <https://www.researchgate.net/publication/253284007>. <https://www.academia.edu/126485666>.
6. Ипатов С.И. Эволюция резонансных орбит астероидного типа и проблема существования люков. *Кинематика и физика небесных тел*. 1988. Т. 4. N 4. С. 47-54. Перевод: Ipatov S.I., The gap problem and asteroid-type resonant orbit evolution, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* (translated from *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*), 1988, v. 4, N 4, pp. 49-57. <https://www.researchgate.net/publication/238555999>. <https://www.academia.edu/126485853>.
7. Ипатов С.И. Времена эволюции дисков планетезималей. *Астрономический журнал*. 1988. Т. 65. N 5. С. 1075-1085. Перевод: Ipatov S.I., Evolution times for disks of planetesimals, *Soviet Astronomy* (translated from *Astronomicheskii Zhurnal*), 1988, v. 32 (65), N 5, pp. 560-566. <https://www.researchgate.net/publication/241265869>. <https://www.academia.edu/44452977>. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1988SvA....32..560I>.
8. Ипатов С.И. Изменения эксцентриситетов орбит астероидного типа в окрестности резонанса 2:5. *Письма в Астрономический журнал*. 1989. Т. 15. N 8. С. 750-760. Перевод: Ipatov S.I., Variations in orbital eccentricities of asteroids near the 2:5 resonance, *Soviet Astron. Letters* (translated from *Pis'ma v Astronomicheskii Zhurnal*), 1989, v. 15, N 4 (8), pp. 324-328. <https://www.researchgate.net/publication/234455005>. <https://www.academia.edu/44452706>. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1989SvAL...15..324I>.
9. Ипатов С.И. Эволюция эксцентриситетов орбит планетезималей при формировании планет-гигантов. *Астрономический вестник*. 1989. Т. 23. N 3. С. 197-206. Перевод: Ipatov S.I., Evolution of the orbital eccentricities of planetesimals during formation of the giant planets, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 1989, v. 23, N 3, pp. 119-125. <https://www.researchgate.net/publication/241498872>. <https://www.academia.edu/works/59079941>.
10. Ипатов С.И. Миграция планетезималей на последних стадиях аккумуляции планет-гигантов. *Астрономический вестник*. 1989. Т. 23. N 1. С. 27-38. Перевод: Ipatov S.I., Planetesimal migration during the last stages of accumulation of the giant planets, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 1989, v. 23, N 1, pp. 16-23. <https://www.researchgate.net/publication/258976468>. <https://www.academia.edu/59079957>.
11. Ипатов С.И. Эволюция орбит растущих зародышей планет-гигантов, первоначально двигавшихся по сильно эксцентричным орбитам. *Письма в Астрономический журнал*. 1991. Т. 17. N 3. С. 269-281. Перевод: Ipatov S.I., Evolution of initially highly eccentric orbits of the growing nuclei of the giant planets, *Soviet Astron. Letters* (translated from *Pis'ma v Astronomicheskii Zhurnal*), 1991, v. 17, N 2, pp. 113-119. <https://www.researchgate.net/publication/253317841>. <https://www.academia.edu/44452706>. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1989SvAL...15..324I>.
12. Ипатов С.И. Изменения элементов орбит астероидного типа при резонансе 2:5. *Астрономический вестник*. 1992. Т. 26. N 6. С. 26-53. Перевод: Ipatov S.I., Numerical model of the evolution of asteroid orbits at the 2:5 resonance, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 1992, v. 26, N 6, pp. 520-541. <https://www.researchgate.net/publication/259022526>. <https://www.academia.edu/59079955>.
13. Ипатов С.И. Численные исследования миграции тел в формирующейся Солнечной системе. *Прикладная механика*. 1992. Т. 28. N 11. С. 91-96. Перевод: Ipatov S.I., Migration and accumulation of bodies in the forming solar system, *International Applied Mechanics* (translated from *Prikladnaya Mekhanika*), 1992, v. 28, N 11, pp. 771-774. <https://www.researchgate.net/publication/256171667>. <https://www.academia.edu/49325518>. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00847313>, DOI 10.1007/BF00847313.

14. Ipatov S.I. Evolution of asteroidal orbits at the 5:2 resonance. *Icarus*, v. 95, N 1. pp. 100-114 (1992), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/001910359290194C?via%3Dihub>, [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(92\)90194-C](https://doi.org/10.1016/0019-1035(92)90194-C), <https://www.researchgate.net/publication/253663007>, <https://www.academia.edu/44448338>.
15. Ипатов С.И. Миграция тел в процессе аккумуляции планет. *Астрономический вестник*. 1993. Т. 27. N 1. С. 83-101. Перевод: Ipatov S.I., Migration of bodies in the accretion of planets, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 1993, v. 27, N 1. pp. 65-79. <https://www.researchgate.net/publication/234281490>. <https://www.academia.edu/44448077>.
16. Ипатов С.И. Гравитационное взаимодействие двух планетезималей, движущихся по близким орбитам. *Астрономический вестник*. 1994. Т. 28. N 6. С. 10-33. Перевод: Ipatov S.I., Gravitational interaction of two planetesimals moving in close orbits, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 1994, v. 28, N 6, pp. 494-512. <https://www.researchgate.net/publication/234445433>. <https://www.academia.edu/59080069>.
17. Ipatov S.I. Migration of bodies in the accumulation of planets, *Earth, Moon, and Planets*, 1995, v. 67, N 1-3, pp. 217-219. <https://www.researchgate.net/publication/252149292>. <https://www.academia.edu/44452347>. <http://adsabs.harvard.edu/full/1995EM%26P...67..217I>.
18. Ипатов С.И. Гравитационное взаимодействие объектов, движущихся по пересекающимся орбитам. *Астрономический вестник*. 1995. Т. 29. N 1. С. 11-23. Перевод: Ipatov S.I., Gravitational interaction of objects moving in crossing orbits, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 1995, v. 29, N 1. pp. 9-20. <https://www.researchgate.net/publication/253123243>. <https://www.academia.edu/126464286>.
19. Ипатов С.И. Миграция малых тел к Земле. *Астрономический вестник*. 1995. Т. 29. N 4. С. 304-330. Перевод: Ipatov S.I., Migration of small bodies to the Earth, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 1995, v. 29, N 4. pp. 261-286. <https://www.researchgate.net/publication/225900805>. <https://www.academia.edu/49336026>.
20. Ipatov S.I. Migration of small bodies in the Solar system, *Earth, Moon, and Planets*, 1996, v. 72, N 1-3. pp. 211-214. <https://www.researchgate.net/publication/225900805>. <https://www.academia.edu/44452474>. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1995EM%26P...67..217I>.
21. Ипатов С.И., Дж. Хан. Эволюция орбит объектов P/1996 R2 и P/1996 N2. *Астрономический вестник*. 1999, т. 33, N 6. С. 553-566. Перевод: Ipatov S.I. and Hahn, G.J. Orbital evolution of the P/1996 R2 and P/1996 N2 objects, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), v. 33, N 6, pp. 487-500 (1999). <https://arxiv.org/abs/2412.12939>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.12939>. <https://www.researchgate.net/publication/224789085>. <https://www.academia.edu/59079985>.
22. Ipatov S.I. Migration of trans-Neptunian objects to the Earth, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 1999, v. 73, N 1-4, pp. 107-116. 3, N 1-4, pp. 107-116 (1999) <https://doi.org/10.1023/A:1008386727899>. <https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1008386727899>. <http://adsabs.harvard.edu/full/1999imda.coll..107I>. <https://www.researchgate.net/publication/225246530>. <https://www.academia.edu/44448423>. https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMbBBwAAAAABFh-oLcdO2GOETRrOiyL_Eg?e=eTgrat.
23. Ипатов С.И. Получение астрономических данных по Интернету. *Астрономический вестник*. 1999. т. 33. N 3, с. 282-286. Перевод: Ipatov S.I. Accessing astronomical data over the Internet, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 1999, v. 33, N 3, P. 247-251. <https://www.researchgate.net/publication/253591120>. <https://www.academia.edu/59079984>.
24. Ипатов С.И. Изменения элементов орбит планет. *Астрономический вестник*. 2000, т. 34, N 3. С. 195-201. Перевод: Ipatov S.I., Variations in orbital elements of planets, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 2000, v. 34, N 3, pp. 179-185. <https://arxiv.org/abs/2412.12925>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.12925>. <https://www.researchgate.net/publication/253300880>. <https://www.academia.edu/59080053>.
25. Ипатов С.И., Хенрард Ж. Эволюция орбит тел, находящихся в резонансе 2:3 с движением Нептуна. *Астрономический вестник*. 2000, т. 34, N 1, с. 68-81. Перевод: Ipatov S.I., Henrard J., Evolution of orbits of trans-Neptunian bodies at the 2:3 resonance with Neptune, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 2000, v. 34, N 1, pp. 61-74. <https://arxiv.org/abs/2412.13297>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.13297>. <https://www.researchgate.net/publication/252901582>. <https://www.academia.edu/59080057>.

<https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMa6BwAAAAABU04mw-I5GBoTsgLHM9Zecg?e=xdnA1e> - pdf in Russian.

26. Ipatov S.I. Comet hazard to the Earth, *Advances in Space Research*, Elsevier, 2001, v. 28, N 8, pp. 1107-1116. <https://www.researchgate.net/publication/2231935>. <https://www.academia.edu/44452766>. initial version on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0108187>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S027311770100494X?via%3Dihub>.

27. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets, *Earth, Moon, and Planets*, 2003, v. 92, p. 89-98. <https://doi.org/10.1023/B:MOON.0000031928.45965.7b>. http://www.roe.ac.uk/~jkd/kbo_proc/ipatov.pdf; initial version on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0305519>. <https://www.researchgate.net/publication/1931873>. <https://www.academia.edu/44452493>.

28. Ipatov S.I., Mather J.C., Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets, *Advances in Space Research*, Elsevier, 2004, v. 33, N 9, p. 1524-1533. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00451-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00451-4). <https://www.researchgate.net/publication/1928889>. <https://www.academia.edu/44452546>. Initial version on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0212177>.

29. Ipatov S.I., Mather, J.C. Migration of Jupiter-family comets and resonant asteroids to near-Earth space, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2004, v. 1017, pp. 46-65. <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1196/annals.1311.004>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=13462803>. <https://doi.org/10.1196/annals.1311.004>. initial version on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0308448>, <https://www.researchgate.net/publication/8488458>. <https://www.academia.edu/44447592>.

30. Ipatov S.I., Mather J.C., Taylor P.A. Migration of interplanetary dust, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2004, v. 1017, pp. 66-80. <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1196/annals.1311.005>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=13469889>. <https://doi.org/10.1196/annals.1311.005>. <http://www.findthatfile.com/search-66853853-hPDF/download-documents-ipatov-nyas-dust.pdf.htm>. initial version on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0308450>; DOI: 10.1196/annals.1311.005, <https://www.researchgate.net/publication/8488459>. <https://www.academia.edu/44447510>.

31. Маров М.Я., **Ипатов С.И.** Миграция пылевых частиц и доставка летучих на планеты земной группы. *Астрономический вестник*. 2005. Т. 39. N 5, С. 1-5. Перевод: Marov M.Ya., Ipatov S.I. Migration of dust particles and volatiles delivery to the terrestrial planets, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 2005, v. 39, N 5, 374-380. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11208-005-0050-1>. <https://www.researchgate.net/publication/225445817>. <https://www.academia.edu/44453038>. Russian text: <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYcCAAAAAAByoUVYwudc4X0JMoLf6oapg?e=5Yku1j>.

32. A'Hearn M.F., M. J. S. Belton, W. A. Delamere, J. Kissel, K. P. Klaasen, L. A. McFadden, K. J. Meech, H. J. Melosh, P. H. Schultz, J. M. Sunshine, P. C. Thomas, J. Veverka, D. K. Yeomans, M. W. Baca, I. Busko, C. J. Crockett, S. M. Collins, M. Desnoyer, C. A. Eberhardy, C. M. Ernst, T. L. Farnham, L. Feaga, O. Groussin, D. Hampton, **S. I. Ipatov**, J.-Y. Li, D. Lindler, C. M. Lisse, N. Mastrodemos, W. M. Owen Jr., J. E. Richardson, D. D. Wellnitz, R. L. White, Deep Impact: Excavating Comet Tempel 1, *Science*, 14 October 2005, v. 310, pp. 258-264. <https://science.sciencemag.org/content/310/5746/258.full.pdf+html>. <https://doi.org/10.1126/science.1118923>. <https://www.academia.edu/99306299>. <https://www.researchgate.net/publication/7611098>.

33. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of small bodies and dust to near-Earth space. *Advances in Space Research*, 2006, v. 37, N 1, 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.05.076>. <https://www.researchgate.net/publication/1802821>. Initial version on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0411004>. <https://www.academia.edu/49324706>.

34. Ipatov S.I., A'Hearn M.F., Klaasen K.P. Automatic removal of cosmic ray signatures on Deep Impact images, *Advances in Space Research*, 2007, v. 40, 160-172. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273117707003493?via%3Dihub>. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.04.012>. <https://www.researchgate.net/publication/228922305>, Initial version on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0610931>. <https://www.academia.edu/44448364>.

35. Klaasen K.P., A'Hearn M.F., Baca M.W., Delamere W.A., Desnoyer M., Farnham T.L., Groussin O., Hampton D., **Ipatov S.I.**, Li J.-Y., Lisse C.M., Mastrodemos N., McLaughlin S., Sunshine J.M., Thomas P.C., Wellnitz D.D. Invited article: Deep Impact instrument calibration. *Review of Scientific Instruments Journal*, 2008, v. 79, issue 9, pp. 091301-091301-77 (77 pages).

- <https://doi.org/10.1126/10.1063/1.2972112>. <https://www.researchgate.net/publication/23557358>.
<https://www.academia.edu/59080018>. <http://link.aip.org/link/?RSI/79/091301>.
36. Boss A.P., **Ipatov S.I.**, Keiser S.A., Myhill E.A., Vanhala H.A.T., Simultaneous triggered collapse of the presolar dense cloud core and injection of short-lived radioisotopes by a supernova shock wave, *Astrophysical Journal Letters*, 2008, v. 686, pp. L119-L123. <http://arxiv.org/abs/0809.3045>.
<http://iopscience.iop.org/1538-4357/686/2/L119/pdf>. <https://www.researchgate.net/publication/1775247>,
<https://www.academia.edu/70231160>.
37. Ipatov S.I., Kuttyrev A., Madsen G.J., Mather J.C., Moseley S.H., Reynolds R.J., Dynamical zodiacal cloud models constrained by high resolution spectroscopy of the zodiacal light, *Icarus*, 2008, v. 194, N. 2, pp. 769-788. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.11.009>;
<https://www.researchgate.net/publication/222219285>,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103507005623?via%3Dihub>,
<http://arxiv.org/abs/0711.3494>; an old version of the paper with a greater number of figures, but with less analysis is on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0608141>. <https://www.academia.edu/44448220>.
38. Boss A.P., Keiser S.A., **Ipatov S.I.**, Myhill E.A., Vanhala H.A.T. Triggering collapse of the presolar dense cloud core and injecting short-lived radioisotopes with a shock wave. I. Varied shock speeds, *Astrophysical Journal*, 2010, v. 708, pp. 1268-1280, <http://arxiv.org/abs/0911.3417>.
http://iopscience.iop.org/0004-637X/708/2/1268/pdf/0004-637X_708_2_1268.pdf.
<https://www.researchgate.net/publication/45885018>, <https://www.academia.edu/126486109>.
39. Ipatov S.I., The angular momentum of two collided rarefied preplanetesimals and the formation of binaries, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, v. 403, 405-414.
<http://arxiv.org/abs/0904.3529>. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16124.x>,
<https://academic.oup.com/mnras/article/403/1/405/1019032>,
<https://www.researchgate.net/publication/227698427>,
<http://mnras.oxfordjournals.org/content/403/1/405.full.pdf+html>. <https://www.academia.edu/44448131>.
40. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. The outburst triggered by the Deep Impact collision with Comet Tempel 1, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, v. 414, N 1, 76-107.
<http://arxiv.org/abs/0810.1294>. <http://mnras.oxfordjournals.org/content/414/1/76.full.pdf+html>.
<https://www.researchgate.net/publication/47822083>,
<https://academic.oup.com/mnras/article/414/1/76/1085918>, <https://www.academia.edu/44447456>.
41. Ipatov S.I. Location of upper borders of cavities containing dust and gas under pressure in comets, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, v. 423, 3474-3477.
<http://arxiv.org/abs/1205.6000>. <https://academic.oup.com/mnras/article/423/4/3474/1747981>.
<http://mnras.oxfordjournals.org/content/423/4/3474.full.pdf>,
<https://www.researchgate.net/publication/225046674>, <https://www.academia.edu/44448206>.
42. Shin I.-G. et al., including **Ipatov S.** (157 co-authors). Microlensing binaries with candidate brown dwarf companions, *The Astrophysical Journal*, 2012, vol. 760, Issue 2, article id. 116, 10 pp.
<http://arxiv.org/abs/1208.2323>. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/760/2/116/pdf>.
43. Street R.A. et al., including **Ipatov S.** (137 co-authors), MOA-2010-BLG-073L: An M-dwarf with a substellar companion at the planet/brown dwarf boundary, *The Astrophysical Journal*, 2013, vol. 763, Issue 1, article id. 67, 13 pp. <http://arxiv.org/abs/1211.3782>.
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/763/1/67/pdf>.
44. Hwang K.-H et al., including **Ipatov S.** (84 co-authors). Interpretation of a short-term anomaly in the gravitational microlensing event MOA-2012-BLG-486, *The Astrophysical Journal*, 2013, v. 778, article id. 55, 6 p, <http://arxiv.org/abs/1308.5762>, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/778/1/55/pdf>.
45. Han C. et al., including **Ipatov S.** (73 co-authors). Microlensing discovery of a tight, low mass-ratio planetary-mass object around an old, field brown dwarf. *The Astrophysical Journal*, 2013, vol. 778, issue 1, article id. 38, 6 pp. <http://arxiv.org/abs/1307.6335>, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/778/1/38/pdf>.
46. Kains N. et al., including **Ipatov S.** (130 co-authors). A giant planet beyond the snow line in microlensing event OGLE-2011-BLG-0251, *Astronomy & Astrophysics*, 2013, Volume 552, id. A70, 10 pp. <http://arxiv.org/abs/1303.1184>, <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2013/04/aa20626-12.pdf>.
47. Yee J.C. et al., including **Ipatov S.** (76 co-authors). MOA-2013-BLG-220Lb: Massive planetary companion to galactic-disk host, *The Astrophysical Journal*, 2014, v. 790, no 1, article id 14, 7 pp. <http://arxiv.org/pdf/1403.2134v1.pdf>, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/790/1/14/pdf>.

48. Tsapras Y. et al., including **Ipatov S.** (131 co-authors). Super-Jupiter orbiting a late-type star: A refined analysis of microlensing event OGLE-2012-BLG-0406, *Astrophysical Journal*, 2014, v. 782, issue 1, article id. 48, 9 pp., <http://arxiv.org/abs/1310.2428>, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/782/1/48/pdf>.

49. Fukui A. et al., including **Ipatov S.** (65 co-authors). A Saturn-mass planet around an M dwarf with the mass constrained by Subaru AO Imaging, *The Astrophysical Journal*, 2015. Volume 809, Issue 1, article id. 74, 16 pp. <http://arxiv.org/abs/1506.08850>, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/809/1/74/pdf>.

50. Kains N. et al., including **Ipatov S.** (36 co-authors). A Census of variability in globular cluster M68 (NGC 4590), *Astronomy & Astrophysics*, 2015. Volume 578, id. A128, 23 pp. <http://arxiv.org/abs/1502.07345>, <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2015/06/aa24600-14.pdf>. Also published in VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/578/A128. 2015. V. 357.

51. Ипатов С.И. Формирование транснептуновых спутниковых систем на стадии сгущений. *Астрономический вестник*. 2017. Т. 51. N 4. С. 321-343. DOI: 10.7868/S0320930X17040016. (<https://elibrary.ru/item.asp?id=29776920>, <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYTDwAAAAABJips7HN6WF5HNFeBFfZhUQ?e=A8mjiW> – русский pdf файл). Перевод: Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian satellite systems at the stage of condensations, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 2017, v. 51, N 4, P. 294-314. DOI: 10.1134/S0038094617040013. <https://arxiv.org/abs/1801.05217>. <https://link.springer.com/article/10.1134/S003809461704001>. <https://www.researchgate.net/publication/318595551>. <https://www.academia.edu/39245929>.

52. Ипатов С.И. Формирование орбит меньших компонент в обнаруженных двойных объектах транснептунового пояса. *Астрономический вестник*, 2017, т. 51, № 5, 441-449. DOI: 10.7868/S0320930X17050048. (<https://elibrary.ru/item.asp?id=30034447> – русский текст; <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYUDwAAAAABx36jtdBXhuRN9k9E6xcrsA?e=Gu1z9u> – pdf файл с русским текстом). Перевод: Ipatov S.I. Origin of orbits of secondaries in the discovered trans-Neptunian binaries, *Solar System Research* (translated from *Astronomicheskii Vestnik*), 2017, v. 51, N 5, 409-416. doi 10.1134/S0038094617050045. <https://arxiv.org/abs/1801.05254>. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0038094617050045>. <https://www.researchgate.net/publication/319885905>. <https://www.academia.edu/39246033>.

53. Маров М.Я., **Ипатов С.И.** Доставка воды и летучих к планетам земной группы и к Луне. *Астрономический вестник*, 2018, т. 52, № 5, с. 402-410. DOI: 10.1134/S0320930X18050055. <https://elibrary.ru/item.asp?id=35444113>. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYTDwAAAAABJips7HN6WF5HNFeBFfZhUQ?e=MBLagp> - Russian text. Перевод: Marov M.Ya., Ipatov S.I. Delivery of water and volatiles to the terrestrial planets and the Moon, *Solar System Research*, 2018, v. 52, N 5, p. 392-400. DOI: 10.1134/S0038094618050052. <https://arxiv.org/abs/2003.09982>. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0038094618050052>. <https://www.academia.edu/39245748>. <https://www.researchgate.net/publication/340115418>.

54. Ипатов С.И. Формирование зародышей Земли и Луны из общего разреженного сгущения и их последующий рост. *Астрономический вестник*, 2018, т. 52, № 5, с. 411-426. DOI: 10.1134/S0320930X18050043. ISSN: 0320-930X. <https://elibrary.ru/item.asp?id=35444114>. Перевод: Ipatov S.I. Formation of embryos of the Earth and the Moon from the common rarefied condensation and their subsequent growth. *Solar System Research*, 2018, v. 52, N 5, p. 401-416. DOI 10.1134/S0038094618050040. <https://doi.org/10.1134/S0038094618050040>. <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0038094618050040>, WOS: 000451063100004. ISSN: 0038-0946. eISSN: 1608-3423; <http://arxiv.org/abs/2003.09925>. <https://www.researchgate.net/publication/340115212>.

55. Ипатов С.И. Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной. *Астрономический вестник*, 2019, т. 53, № 5, с. 349-379. <https://elibrary.ru/item.asp?id=39180392>. DOI: 10.1134/S0320930X19050049. Перевод: Ipatov S.I. Probabilities of collisions of planetesimals from different regions of the feeding zone of the terrestrial planets with the forming planets and the Moon. *Solar System Research*, 2019, v. 53, N 5, p. 332-361. DOI: 10.1134/S0038094619050046. <https://rdcu.be/bRVA8>. <http://arxiv.org/abs/2003.11301>. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0038094619050046>.

- <https://www.researchgate.net/publication/340173252>, <https://www.academia.edu/42216860>,
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000511210600003>.
56. Ипатов С.И., Феоктистова Е.А., Светцов В.В. Количество объектов, сближающихся с Землей, и образование лунных кратеров в течение последнего миллиарда лет. *Астрономический вестник*, 2020, т. 54, N 5, С. 409-430. DOI: 10.31857/S0320930X20050011. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43878118>. https://elibrary.ru/download/elibrary_43878118_49752328.pdf. Translation: Ipatov S.I., Feoktistova, E.A., Svetsov V.V. Number of near-Earth objects and formation of lunar craters over the last billion years. *Solar System Research*, 2020, v. 54, N 5, P. 384-404. DOI: 10.1134/S0038094620050019. <https://rdcu.be/b7ZdT>. <https://arxiv.org/abs/2011.00361>.
<https://link.springer.com/article/10.1134/S0038094620050019>.
<https://www.researchgate.net/publication/345500846>, <https://www.academia.edu/44441315>.
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000574226000003>.
57. Feoktistova E.A., Ipatov S.I. Depths of Copernican craters on lunar maria and highlands. *Earth, Moon, and Planets*, 2021. v. 125, Article id. 1, 23 p. <https://doi.org/10.1007/s11038-021-09538-y>.
<http://arxiv.org/abs/2103.00291>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11038-021-09538-y>.
<https://www.researchgate.net/publication/349703674>, <https://www.academia.edu/49324295>,
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000612895400001>.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=44979320>.
58. Маров М.Я., Ипатов С.И. Формирование Земли и Луны: влияние малых тел. *Геохимия*, 2021, т. 66, N 11, с. 964-971. DOI: 10.31857/S0016752521110078. <https://doi.org/10.31857/S0016752521110078>.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=46464301>.
https://elibrary.ru/download/elibrary_46464301_50474679.pdf. <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=geokhim&y=2021&v=66&n=11&a=GeoKhim2111007Marov> Translation: Marov M.Ya, Ipatov S.I. Formation of the Earth and Moon: Influence of Small Bodies. *Geochemistry International*, 2021, Vol. 59, No. 11, pp. 1010–1017. ISSN 0016-7029, DOI: 10.1134/S0016702921110070, <http://arxiv.org/abs/2112.06047>.
<https://link.springer.com/article/10.1134/S0016702921110070>,
https://trebuchet.public.springernature.app/get_content/29ea1f0f-1e09-4ad2-806f-3589b28788c3.
<https://www.researchgate.net/publication/357014173>, <https://www.academia.edu/99306270>,
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000728564800002>.
59. Маров М.Я., Ипатов С.И. Процессы миграции в Солнечной системе и их роль в эволюции Земли и планет. *Успехи физических наук*, 2023, Т. 193. N 1. С. 2-32. http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=ufn&paperid=7321&option_lang=rus.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039044>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=50148754>. Translation: Marov M.Ya, Ipatov S.I. Migration processes in the Solar System and their role in the evolution of the Earth and planets. *Physics – Uspekhi*. 2023. V. 66, N 1, p. 2-31. http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=ufn&paperid=7321&option_lang=eng.
<https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.08.039044>. <https://arxiv.org/abs/2309.00716>,
https://www.academia.edu/99306270/Migration_processes_in_the_Solar_System_and_their_role_in_the_evolution_of_the_Earth_and_planets.
<https://www.researchgate.net/publication/373685580>,
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001112589600001>.
60. Ипатов С.И. Устойчивые орбиты в зоне питания планеты Проксима Центавра с // *Астрономический вестник*. 2023, т. 57, N 3. С. 248-261. DOI: 10.31857/S0320930X23030039, EDN: HYSOIV. https://elibrary.ru/download/elibrary_50502130_51878182.pdf. Translation: Ipatov S.I. Stable orbits in the feeding zone of the planet Proxima Centauri c. *Solar System Research*, 2023, v. 57, N 3, P. 236-248. DOI: 10.1134/S0038094623030036. <https://doi.org/10.1134/S0038094623030036>.
<http://arxiv.org/abs/2309.00492>, <https://link.springer.com/article/10.1134/S0038094623030036>.
<https://rdcu.be/df4dl>. <https://www.academia.edu/104388702/>.
<https://www.researchgate.net/publication/373641778>, <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001024449300005>
61. Ipatov S.I. Delivery of icy planetesimals to inner planets in the Proxima Centauri planetary system. *Meteoritics and Planetary Science*. 2023. V. 58. P. 752-774. <https://doi.org/10.1111/maps.13985>.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/maps.13985>. <https://arxiv.org/abs/2309.00695>,
<https://www.academia.edu/104387946/>. <https://www.researchgate.net/publication/373685582>.
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000994800100001>.
62. Ипатов С.И. Движение планетезималей в сфере Хилла звезды Проксима Центавра. *Астрономический вестник*. 2023, т. 57, N 6. С. 605-622. DOI: 10.31857/S0320930X2306004X, EDN: DDQLXU. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54804094>. <https://sciencejournals.ru/view->

- [article/?j=astvest&y=2023&v=57&n=6&a=AstVest2306004Ipatov](#). Translation: Ipatov S.I. Motion of planetesimals in the Hill sphere of the star Proxima Centauri // *Solar System Research*, 2023, v. 57, N 6. P. 612-628. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0038094623060047>, <https://doi.org/10.1134/S0038094623060047>, <http://arxiv.org/abs/2401.09086>, <https://www.researchgate.net/publication/377419089>, <https://www.academia.edu/113590871>.
63. Ипатов С.И. Рост Луны за счет тел, выброшенных с Земли. *Астрономический вестник*. 2024, т. 58, N 1, с. 99-117. DOI: 10.31857/S0320930X24010081, EDN: OHGFCE. <https://elibrary.ru/item.asp?id=68485972>. Translation: Ipatov S.I. Growth of the Moon due to bodies ejected from the Earth. *Solar System Research*, 2024, v. 58, N 1. P. 94-111. DOI: 10.1134/S0038094624010040. <https://doi.org/10.1134/S0038094624010040>, <http://arxiv.org/abs/2405.19797>, <https://www.researchgate.net/publication/381005974>, <https://www.academia.edu/122432299>, <https://rdcu.be/dGWze>.
64. Ipatov S.I. Migration of celestial bodies in the Solar system and in several exoplanetary systems. *Solar System Research*, 2024, v. 58, Suppl. 1, pp. S50-S63. <https://doi.org/10.1134/S0038094623600105>, <https://rdcu.be/d04Q0>, <http://arxiv.org/abs/2411.05436>, <https://www.researchgate.net/publication/385627526>, <https://www.academia.edu/125363162>, <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001361601400008>.
65. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of bodies ejected from forming Earth with the terrestrial planets. *Icarus*, 2025., v. 425, id. 116341. (24 p.) <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116341>, <http://arxiv.org/abs/2411.04218>, <https://www.researchgate.net/publication/384776785>, <https://www.academia.edu/125337439>.

Статьи в рецензируемых журналах, индексируемых только в РИНЦ.

Papers in the journals which are not indexed in WoS or Scopus

66. Ипатов С.И. Образование одного из люков Кирквуда. *Земля и Вселенная*. 1991. N 1, с. 86-88. [https://publ.lib.ru/ARCHIVES/Z/"Zemlya i Vselennaya" \(jurnal\)/](https://publ.lib.ru/ARCHIVES/Z/).
67. Ипатов С.И. Методы выбора пар контактирующих объектов при исследовании эволюции дискретных систем с бинарными взаимодействиями. *Математическое моделирование*. 1993, Т. 5. N 1. С. 35-59. <https://www.researchgate.net/publication/265479283>, http://www.mathnet.ru/php/getFT.shtml?jrnid=mm&paperid=1948&what=fullt&option_lang=rus or http://www.mathnet.ru/php/getFT.shtml?jrnid=mm&paperid=1948&volume=5&year=1993&issue=1&fpage=35&what=fullt&option_lang=eng.
68. Ipatov S.I. Migration of celestial bodies in the Solar System, *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 1998, v. 15. pp. 241-247. <http://images.astronet.ru/pubd/2008/09/28/0001230313/241-247.pdf>, https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29914114_10473458.pdf, https://elibrary.ru/download/elibrary_29914114_29135110.pdf, <http://adsabs.harvard.edu/full/1998A%26AT...15..241I>, <https://www.researchgate.net/publication/233045896>, <https://www.academia.edu/44453108>.
69. Ипатов А.И., Городнов А.В., Ипатов С.И., Марьенко Н.Н., Петров Л.П., Скопинцев С.П. Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах. *Геофизика* (журнал Евро-Азиатского геофизического общества), 2004, N 2, 25-30. <https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMbYBwAAAAABKBFOeNyKGn9pUonfilMyWg?e=Gncgdt> - резюме. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22294745>.
70. Ipatov S.I., Migration of trans-Neptunian objects to the Earth, *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 2005, v. 24, pp. 35-38. <http://images.astronet.ru/pubd/2008/09/28/0001230841/35-38.pdf>, <https://www.researchgate.net/publication/228677695>, https://elibrary.ru/download/elibrary_29768969_24725472.pdf, https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29768969_98652474.pdf, <https://www.academia.edu/49324809>.
71. Ипатов С.И. Формирование небесных тел со спутниками на стадии разреженных сгущений. *Механика, управление и информатика*. 2015. Т. 7. № 3 (56). с. 386-399. <http://www.iki.rssi.ru/books/2015marov.pdf>, https://elibrary.ru/download/elibrary_23244550_77400796.pdf, <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMabBAAAAABtnwd6SpCO6VP-kRL0SeBBw?e=ipTzwx>, <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYDwAAAAABjMkb-hdCI4JuwHXCzU5LA?e=dBZ0RU>.

72. Ипатов С.И., Еленин Л.В. Модели для определения вероятности обнаружения в различных областях неба объектов, сближающихся с Землей. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2017, №4, вып. 3. С. 69-75. <http://vestnik.kubsu.ru/archive/2017-issue-4v3/>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32331347>.

73. Ипатов С.И. Выпадения планетезималей из разных частей зоны питания планет земной группы на формирующиеся планеты и зародыш Луны. *Научные труды Института астрономии РАН*, 2020, том. 5, выпуск 3, стр. 97-99. DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.3.004. https://elibrary.ru/download/elibrary_44093126_92967049.pdf . <http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2020/12/ntr53.pdf#page=15>.

74. Маров М.Я., Ипатов С.И. Миграция планетезималей из зоны питания планет-гигантов к планетам земной группы и Луне. *Научные труды Института астрономии РАН*, 2020, том. 5, выпуск 3, стр. 94-96. DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.3.003. https://elibrary.ru/download/elibrary_44093125_77520272.pdf. <http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2020/12/ntr53.pdf#page=12>.

75. Ипатов С.И., Феоктистова Е.А., Светцов В.В. Оценки изменения численности околоземных объектов на основе возрастов лунных кратеров в течение последнего миллиарда лет. *Научные труды Института астрономии РАН*, 2020, том. 5, выпуск 3, стр. 100-102. DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.3.005. https://elibrary.ru/download/elibrary_44093127_37970864.pdf. <http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2020/12/ntr53.pdf#page=18>.

76. Ипатов С.И. Вклад Т.М. Эннеева в планетную космогонию. *Земля и Вселенная*. 2024, № 5, с. 60-66. DOI: 10.7868/S0044394824050050. <https://www.researchgate.net/publication/389497841>. <https://www.academia.edu/127962691>. https://elibrary.ru/download/elibrary_80373069_10087563.pdf .

77. Ипатов С.И. Процессы миграции в Солнечной системе и в некоторых экзопланетных системах. *Земля и Вселенная*. 2025. № 4, с. 18-43. DOI: 10.7868/S0044394825040024. <https://www.academia.edu/145078900> . <https://www.researchgate.net/publication/397870089> .

Монография (monograph in Russian)

78. Ипатов С.И. *Миграция небесных тел в Солнечной системе*. Изд-во УРСС. 2000 г. 320 с. Изд. стереотип.: ЛЕНАНД. 2021. https://www.rfbr.ru/view_book/1277/. https://elibrary.ru/download/elibrary_46237738_86402718.pdf. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46237738> , <http://booksee.org/book/1472075>. <https://www.researchgate.net/publication/369586110>. <https://www.academia.edu/49357889>. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYaDwAAAAAB40JEdQ5xs141snrwH27c4w?e=mGeHv8>.

Разделы в монографиях (Sections in monographs)

79. Кременецкий М.И., Ипатов А.И., **Ипатов С.И.** Соавтор разделов 7.5.1.2 и 7.5.1.3 (с. 312-315) в монографии А.И. Ипатова и М.И. Кременецкого “*Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов*”, Москва, Изд-во Академия, 2005 (второе издание в 2006, третье издание в 2010).

80. Кременецкий М.И., Ипатов А.И., **Ипатов С.И.** Механизм возникновения шумов акустической эмиссии в поровой матрице вследствие сжатия в естественных сужениях. Раздел. 5.3.1.2 в монографии М.И. Кременецкий, А.И. Ипатов «*Стационарный гидродинамико-геофизический мониторинг разработки месторождений нефти и газа*». Золотой фонд нефтегазовой науки. Газпром. 2018. с. 474-476.

81. Кременецкий М.И., Ипатов А.И., **Ипатов С.И.** Турбулентный механизм возникновения стоячих волн акустических шумов в калиброванных каналах (эффект резонанса). Раздел. 5.3.1.3 в монографии М.И. Кременецкий, А.И. Ипатов «*Стационарный гидродинамико-геофизический мониторинг разработки месторождений нефти и газа*». Золотой фонд нефтегазовой науки. Газпром. 2018. с. 476-478.

82. Ипатов С.И. Глава 2. Формирование системы Земля—Луна. С. 34-84. В монографии: Маров М.Я., Воропаев С.А., **Ипатов С.И.**, Бадюков Д.Д., Слюта Е.Н., Стенников А.В., Федулов В.С., Душенко Н.В., Сорокин Е.М., Кронрод Е.В. «*Формирование Луны и ранняя эволюция Земли*». URSS. 2019. 320 с. ISBN 978-5-9710-7283-6. <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=257942#FF1> – Содержание и предисловие. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41589572>

83. Кременецкий М.И., Ипатов А.И., **Ипатов С.И.** Механизм возникновения шумов акустической эмиссии в поровой матрице вследствие сжатия в естественных сужениях. Раздел. 3.3.2. с. 331-333. В книге: Кременецкий М.И., Ипатов А.И. *Применение промыслово-геофизического контроля для оптимизации месторождений нефти и газа*. Т. 2. Роль гидродинамико-геофизического мониторинга в управлении разработкой. М. Ижевск. Институт компьютерных исследований. 2020. 756 с. ISBN 978-5-4344-0887-5.

84. Dorofeeva V.A., Dunaeva A.N., **Ipatov S.I.**, Kronrod V.A., Kronrod E.V., Kuskov O.L., Marov M.Ya., Rusol A.V. Studies of the problems of planetary cosmogony, geochemistry and cosmochemistry by methods of mathematical modeling // *Advances in Geochemistry, Analytical Chemistry, and Planetary Sciences: 75th Anniversary of the Vernadsky Institute of the Russian Academy of Sciences*. Ed. by V.P. Kolotov and N.S. Bezaeva. Springer. Cham. 2023. P. 263-295. DOI: 10.1007/978-3-031-09883-3_14. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-09883-3_14. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-031-09883-3_14?pdf=chapter%20toc. <https://www.academia.edu/102439508/>. <https://www.researchgate.net/publication/368919287> – pdf file with the paper. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-09883-3> – a whole book. (индексируется в Scopus)

Нежурнальные публикации в научных сборниках и периодических научных изданиях, индексируемые в WoS и/или Scopus. Non-journal publications indexed in WoS and/or Scopus

85. Ipatov S.I. Computer modelling of the process of solar system formation, *Proc. Intern. IMACS Conference on Mathematical modelling and applied mathematics* (June 18-23, 1990, Moscow). Ed. by A.A. Samarskii and M.P. Sapagovas. Elsevier. Amsterdam, 1992, pp. 245-252. <https://www.academia.edu/44453062>. <https://www.amazon.com/Mathematical-Modelling-Applied-Mathematics-International/dp/0444891803>. <https://www.ebay.com/itm/296620800951>. (индексируется в WoS)

86. Ipatov S.I. Migration of matter from the Edgeworth-Kuiper and main asteroid belts to the Earth. Proceedings of the IAU Colloquium No 181 and COSPAR Colloquium No. 11 "Dust in the solar system and other planetary systems" (April 10-14, 2000, Canterbury, UK), ed. by S.F. Green, I.P. Williams, J.A.M. McDonnell and N. McBride, *COSPAR Colloquia Series*, Pergamon, 2002, V. 15, pp. 233-236, <http://arXiv.org/format/astro-ph/0205250>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17810354>. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020067409>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964274902803481?via%3Dihub>, DOI: 10.1016/S0964-2749(02)80348-1 (индексируется в WoS и Scopus).

87. Ipatov S.I., Formation and migration of trans-Neptunian objects and asteroids. Proceedings of the conference "Asteroids, comets, meteors, 2002" (July 29 - August 2, 2002, Berlin), ed. by B. Warmbein. SP-500, European Space Agency, 2002, pp. 371-374, <http://arXiv.org/format/astro-ph/0211618>. <https://www.academia.edu/44453287>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002ESASP.500..371I/abstract>, <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2002ESASP.500..371I>. https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMaqDAAAAAABSyXFX04dUGtO2g1ER2_ZUw?e=OAFf8m (индексируется в Scopus)

88. Ipatov S.I. Evolution of the Edgeworth-Kuiper belt. Highlights of astronomy JD4 ASP (Proceedings of JD-4 of IAU General Assembly, August 7-18, 2000, Manchester, UK), ed. H. Rickman, *IAU Symposia. Highlights of astronomy*, 2002. V. 12, pp. 247-248. <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/1588AB52442DCC86C4084C1C9EB5F1EC/S153929960001340Xa.pdf> (индексируется в WoS).

89. Ipatov S.I., Formation and migration of trans-Neptunian objects. *Proc. of international conference «Scientific Frontiers in Research of Extrasolar Planets»* (18-21 June 2002, Washington D.C., USA), D. Deming and S. Seager, eds., *ASP Conference Series*, 2003, v. 294, pp. 349-353. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0210131>. <http://adsabs.harvard.edu/full/2003ASPC..294..349I>, <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2003ASPC..294..349I> (индексируется в WoS).

90. Marov M.Ya., Ipatov S.I. Migration processes and volatiles delivery, *Proc. of the 213th IAU Symposium "Bioastronomy 2002: Life among the stars"* (8-12 July 2002, Great Barrier Reef, Australia). Edited by R. Norris, and F. Stootman. San Francisco: *Astronomical Society of the Pacific*, 2004, pp. 295-298. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb2BwAAAAABTMSHP08XhP5WWyFwxGP1MQ?e=pqGWye>.

<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/163E12E5568952F21757F517B6CE5EA5/S007418090019343Xa.pdf>.
<https://articles.adsabs.harvard.edu/full/2004IAUS..213..295M>. (индексируется в WoS).

91. Ipatov S.I. Migration of celestial bodies in the Solar system. “*Planetary Systems in the Universe: Observation, Formation and Evolution*” *Proc. of IAU Symposium N 202*, August 7-10, 2000, Manchester, UK), Astronomical Society of the Pacific Conference Series, *IAU Symposium Volumes*, ed. by A. Penny, P. Artymowicz, A.-M. Lagrange, and S. Russell, 2004, pp. 190-192.
<http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2004IAUS..202..190I>.

<https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMbzBwAAAAABtxSmb15m7hpzVwylhGi3LQ?e=CA9dLF>.

<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/D1EE6B25B9435059539599D5FCE69125/S0074180900217816a.pdf> (индексируется в WoS).

92. Ipatov S.I. Formation and migration of trans-Neptunian objects, *Proc. of the 14th Annual Astrophysics Conference in Maryland “The Search for Other Worlds”* (October 13-14, 2003, University of Maryland, College Park, MD, USA), ed. by S.S. Holt and D. Deming, American Institute of Physics, *AIP Conference Proceedings*, 2004, Volume 713, pp. 277-280. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0401279>. DOI 10.1063/1.1774538. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1774538>. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/713/1/277/720350/Formation-and-Migration-of-Trans-Neptunian-Objects?redirectedFrom=fulltext>. (индексируется в WoS).

93. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of small bodies and dust to the terrestrial planets, *Proc. of the IAU Colloq. N 197 “Dynamics of populations of planetary systems”* (Belgrade, Serbia and Montenegro, 31 August – 4 September, 2004), ed. by Z. Knezevic and A. Milani, 2005, pp. 399-404. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0411005>. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMbwBwAAAAABhpLEF5J2NRwbrdvO6Lwxjg?e=zib1eD>. or
<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/C1924E278F759197F592DBAF63312A29/S1743921304008907a.pdf>.
<https://doi.org/10.1017/s1743921304008907>. (индексируется в WoS и Scopus).

94. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of comets to the terrestrial planets, *Proceedings of the IAU Symposium No. 236 “Near-Earth Objects, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk”* (14-18 August 2006, Prague, Czech Republic), ed. by A. Milani, G.B. Valsecchi, & D. Vokrouhlický, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007, pp. 55-64. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0609721> – initial version.
<http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2007IAUS..236...55I>. <https://www.academia.edu/44452956>.
<https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMbuBwAAAAABzP-q7brxfEWdsdrA-uGBzA?e=ZHpj5N>, or
<http://www.journals.cambridge.org/action/displayFulltext?type=1&fid=997604&jid=&volumeId=&issueId=S236&aid=997596> (индексируется в Scopus).

95. Madsen G.J., Reynolds R.J., **Ipatov S.I.**, Kuttyrev A., Mather J.C., Moseley S.H. New observations and models of the kinematics of the zodiacal dust cloud, *Proceedings of the workshop “Dust in Planetary Systems”* (September 26-30, 2005, Kaua'i, Hawaii, USA), ed. by H. Krüger and A. Graps, *ESA Publications*, SP-643, 2007, v. 643. p. 61-64. <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2007ESASP.643...61M>. Initial version on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0604229>. (индексируется в WoS и Scopus).

96. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of dust particles to the terrestrial planets, *Proceedings of the workshop “Dust in Planetary Systems”* (September 26-30, 2005, Kaua'i, Hawaii, USA), ed. by H. Krüger and A. Graps, *ESA Publications*, SP-643, 2007, v. 643. pp. 91-94. <https://www.lpi.usra.edu/meetings/dust2005/pdf/4049.pdf> - abstracts. http://www.mpi-hd.mpg.de/dustgroup/~graps/dips2005/370_Ipatov_FINAL.pdf, or
https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMbvBwAAAAABuMA_vLJ3VItX7iMUc4P1Og?e=a74D5R, initial version on <http://arXiv.org/format/astro-ph/0606434>. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2007ESASP.643...91I> (индексируется в WoS и Scopus).

97. Boss A.P., **Ipatov S.I.**, Myhill E.A. Triggering presolar cloud collapse and injection of short-lived radioisotopes by a supernova shock wave, *70th Annual Meteoritical Society Meeting* (Tucson, Arizona, August 13-17, 2007). *Meteoritics and Planetary Science*, 2007, Vol. 42, Supplement, p. A23, #5011. <https://www.lpi.usra.edu/meetings/metsoc2007/pdf/5011.pdf>. WOS:000248755800029. (индексируется в WoS).

98. Ipatov S.I. Angular momentum of two collided rarefied preplanetesimals and formation of binaries, *Proceedings of the International Astronomical Union*, IAU Symposium, IAU vol. 5, *Symposium S263, "Icy bodies in the Solar System"* (Rio de Janeiro, Brazil, 3-7 August, 2009), ed. by J.A. Fernandez, D. Lazzaro, D. Prialnik, R. Schulz, Cambridge University Press, 2010, pp. 37-40. <https://doi.org/10.1017/S1743921310001468>. <http://arxiv.org/abs/1011.5544>. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMalDAAAAAABTkeoY0RWGjchGGeZPZGl4g?e=8kZol1>. <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/FB1F3086D4A9C17A484D831192D83B4C/S1743921310001468a.pdf>. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2010IAUS..263...37I> (индексируется в WoS).
99. Ipatov S.I. Collision probabilities of migrating small bodies and dust particles with planets, *Proceedings of the International Astronomical Union*, IAU Symposium, IAU vol. 5, *Symposium S263, "Icy bodies in the Solar System"* (Rio de Janeiro, Brazil, 3-7 August, 2009), ed. by J.A. Fernandez, D. Lazzaro, D. Prialnik, R. Schulz, Cambridge University Press, 2010, pp. 41-44. <http://arxiv.org/abs/0910.3017>. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2010IAUS..263...41I>. <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/D26F868B87FD73D83AC561A83906A3FD/S174392131000147Xa.pdf>. <https://www.academia.edu/44453257>. <https://arxiv.org/abs/0910.3017> (индексируется в WoS).
100. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Deep Impact ejection from Comet 9P/Tempel 1 as a triggered outburst, *Proceedings of the International Astronomical Union*, IAU Symposium, IAU vol. 5, *Symposium S263, "Icy bodies in the Solar System"* (Rio de Janeiro, Brazil, 3-7 August, 2009), ed. by J.A. Fernandez, D. Lazzaro, D. Prialnik, R. Schulz, Cambridge University Press, 2010, pp. 317-321. doi:10.1017/S1743921310002000. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2010IAUS..263..317I>. <http://arxiv.org/abs/1011.5541>. https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMakDAAAAAABEYNUCouSH_ETUtOLvP8jfg?e=9IQ7Hf. <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/8EFB2ACEAE31DAAE10057631239CB599/S1743921310002000a.pdf>. (индексируется в WoS).
101. Ipatov S.I. Cavities as a source of outbursts from comets (chapter 3), In “Comets: Characteristics, Composition and Orbits”, ed. by Peter G. Melark, Nova Science Publishers, ISBN 978-1-61324-658-0, 2012, pp. 101-112, <http://arxiv.org/abs/1103.0330>. <https://www.academia.edu/44453155>. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMahDAAAAAABY9WWhxYYpXcyCFOUoqOA-w?e=U9ytQM>. (индексируется в Scopus).
102. Ipatov S.I. Angular momenta of collided rarefied preplanetesimals, *Proc. IAU Symp. No. 293 “Formation, detection, and characterization of extrasolar habitable planets”* (20-31 August 2012, Beijing, China), ed. by Nader Haghighipour, *Proceedings of the International Astronomical Union*, vol. 8, Symposium S293, Cambridge University Press. DOI: 10.1017/S1743921313013008, 2014, pp. 285-288, <http://arxiv.org/abs/1412.8445>. https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/491545577B112C7A6B7739EC73B61681/S1743921313013008a.pdf/angular_momen [ta of collided rarefied preplanetesimals.pdf](https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/491545577B112C7A6B7739EC73B61681/S1743921313013008a.pdf/angular_momen). (индексируется в Scopus).
103. Ipatov S.I., Horne K., Alsubai K., Bramich D., Dominik M., Hundertmark M., Liebig C., Snodgrass C., Street R., Tsapras Y. Simulator for Microlens Planet Surveys, *Proc. IAU Symp. No. 293 “Formation, detection, and characterization of extrasolar habitable planets”* ((20-31 August 2012, Beijing, China), ed. by Nader Haghighipour, Cambridge University Press. *Proceedings of the International Astronomical Union*, Vol. 8, Issue S293, 2014, pp. 416-419, DOI: 10.1017/S1743921313013306, <http://dx.doi.org/10.1017/S1743921313013306>. <http://arxiv.org/abs/1308.6159>. https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/41D9134736C10CB1172B91F8A4C431CA/S1743921313013306a.pdf/simulator_for [microlens planet surveys.pdf](https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/41D9134736C10CB1172B91F8A4C431CA/S1743921313013306a.pdf/simulator_for). <https://www.academia.edu/44452515>. (индексируется в Scopus).
104. Ipatov S.I. Location of the upper border of the cavity excavated after the Deep Impact collision, *XXVIIIth IAU General Assembly*, August 2012, ed. Editor-in-Chief: Thierry Montmerle, Publisher: Cambridge University Press, *Highlights of Astronomy*, 2015, Vol. 16, p. 157. <https://doi.org/10.1017/S1743921314005122>. <http://www.cambridge.org/it/academic/subjects/astronomy/astronomy-general/highlights-astronomy-volume-16>. <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/1CC7856F6308098EC47343C2C760C0B9/S1743921314005122a.pdf>. (индексируется в Scopus).

105. Ipatov S.I. Formation and growth of the embryos of the Earth and the Moon. *81st Annual Meeting of the Meteoritical Society* (July 22-27, 2018, Moscow, Russia). LPI Contrib. No. 2067. *Meteoritics and Planetary Science*. 2018. V. 53. Issue S1, #6024, p. 114. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2018/pdf/6024.pdf>. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/maps.13146> - a whole issue. An oral presentation. Устный доклад. WOS: 000438212400115. (индексируется в WoS).
106. Ipatov S.I. Migration of interplanetary dust particles to the Earth and the Moon. *81st Annual Meeting of the Meteoritical Society* (July 22-27, 2018, Moscow, Russia). LPI Contrib. No. 2067. *Meteoritics and Planetary Science*. 2018. V. 53. Issue S1, #6075, p. 115. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2018/pdf/6075.pdf>. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/maps.13146> - a whole issue. A poster. Стендовый доклад. WOS: 000438212400116. (индексируется в WoS).
107. Ipatov S.I., Elenin L.V. Suggested models for calculation of the probabilities of detection of near-Earth objects in different sky regions. *81st Annual Meeting of the Meteoritical Society* (July 22-27, 2018, Moscow, Russia). LPI Contrib. No. 2067. *Meteoritics and Planetary Science*. 2018. V. 53. Issue S1, p. 116. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2018/pdf/6249.pdf>. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/maps.13146> - a whole issue. An oral presentation. Устный доклад. WOS: 000438212400117. (индексируется в WoS).
108. Marov M.Ya., Ipatov S.I. Water and volatiles inventory from beyond Jupiter's orbit to the terrestrial planets and the Moon. *81st Annual Meeting of the Meteoritical Society* (July 22-27, 2018, Moscow, Russia). LPI Contrib. No. 2067. *Meteoritics and Planetary Science*. 2018. V. 53. Issue S1, #6144, p. 187. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2018/pdf/6144.pdf>. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/maps.13146> - a whole issue. An oral presentation. Устный доклад. WOS: 000438212400188. (индексируется в WoS).
109. Ipatov S.I. Accumulation of planetesimals by forming terrestrial planets from different regions of their feeding zone. *82nd Annual Meeting of the Meteoritical Society* (July 7-12, 2019, Sapporo, Hokkaido, Japan). <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2019/pdf/6147.pdf>. *Meteoritics and Planetary Science*. 2019. V. 54. Issue S2, #6147. P. 173. LPI Contribution No. 2157, id. 6147. <https://onlinelibrary.wiley.com/toc/19455100/2019/54/S2>. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2019/eposter/6147.pdf> - e-poster. WOS:000472113600174. (индексируется в WoS).
110. Ipatov S.I. Probabilities of collisions with the Earth and the Moon of planetesimals migrated from outside the orbit of Mars. *82nd Annual Meeting of the Meteoritical Society* (July 7-12, 2019, Sapporo, Hokkaido, Japan). <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2019/pdf/6290.pdf>. *Meteoritics and Planetary Science*. 2019. V. 54. Issue S2, #6290, p. 174. LPI Contribution No. 2157, id.6290. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2019/eposter/6290.pdf> - e-poster. <https://onlinelibrary.wiley.com/toc/19455100/2019/54/S2>. WOS:000472113600175. (индексируется в WoS).
111. Ipatov S.I. Formation of the Earth-Moon system. *Proc. IAU Symp. No. 345 "Origins: from the Protosun to the First Steps of Life"*, ed. by Bruce G. Elmegreen, L. Viktor Tóth, Manuel Gudel, Proceedings of the International Astronomical Union, Vol. 14. Symposium S345, Cambridge University Press, 2020, 148-151. doi:10.1017/S1743921319001455. <https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-international-astronomical-union/article/formation-of-the-earthmoon-system/2D426A2F9E04167ADD5F22AB653E8083>, <https://www.researchgate.net/publication/338568709>, <https://www.academia.edu/44453178>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43225106> (индексируется в Scopus).
112. Marov M.Ya., **Ipatov S.I.** Water inventory from beyond the Jupiter orbit to the terrestrial planets and the Moon. *Proc. IAU Symp. No. 345 "Origins: from the Protosun to the First Steps of Life"*, ed. by Bruce G. Elmegreen, L. Viktor Tóth, Manuel Gudel, Proceedings of the International Astronomical Union, Vol. 14. Symposium S345, Cambridge University Press, 2020, p. 164-167. doi:10.1017/S1743921319001479. <https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-international-astronomical-union/article/water-inventory-from-beyond-the-jupiters-orbit-to-the-terrestrial-planets-and-the-moon/916B963BACB9DAAB9519EE71AE7EA059>. <https://www.researchgate.net/publication/338567896>. <https://www.academia.edu/44453190>. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43232574>. (индексируется в Scopus).
113. Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V. Near-Earth object population and formation of lunar craters during the last billion of years. *Proc. IAU Symp. No. 345 "Origins: from the Protosun to the*

- First Steps of Life*”, ed. by Bruce G. Elmegreen, L. Viktor Tóth, Manuel Gudel, Proceedings of the International Astronomical Union, Vol. 14. Symposium S345, Cambridge University Press, 2020, 299-300. doi:10.1017/S1743921319001467. <https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-international-astronomical-union/article/nearearth-object-population-and-formation-of-lunar-craters-during-the-last-billion-of-years/E26746F910B82DD3B77E3ED5AA1033D3>. <https://www.researchgate.net/publication/336738161>, <https://www.academia.edu/44453199>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43235365> (индексируется в Scopus).
114. Ipatov S.I. Delivery of bodies to the Earth and the Moon from the zone of the outer asteroid belt. *84th Annual Meeting of the Meteoritical Society* 2021 (LPI Contrib. No. 2609). *Meteoritics and Planetary Science*. 2021. V. 56. Issue S1, #6040, p. 113. LPI Contribution No. 2609, id.6040. a poster; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/maps.13727>, <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000684014300114>. (индексируется в WoS).
115. Ipatov S.I. Delivery of icy planetesimals to inner planets in the Proxima Centauri system. *84th Annual Meeting of the Meteoritical Society* on August 15–21, 2021 (Chicago, Illinois), #6042, <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2021/pdf/6040.pdf> a poster. *Meteoritics and Planetary Science*. 2021. V. 56. Issue S1, #6042, p. 114. LPI Contribution No. 2609, id.6042. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/maps.13727>, p. 114, <https://doi.org/10.1111/maps.13727> – one DOI for all abstracts. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000684014300115> (индексируется в WoS).
116. Ipatov S.I. Mixing of planetesimals in the TRAPPIST-1 exoplanetary system. Abstracts of *85th Annual Meeting of The Meteoritical Society* (August 14–19, 2022, Glasgow, Scotland). - *Meteoritics and Planetary Science*. 2022. V. 57. Issue S1. P. A208. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2022/pdf/6059.pdf>. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000834630400210>. (индексируется в WoS). Стендовый доклад.
118. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of bodies ejected from the Earth with planets and the Moon. Abstracts of *85th Annual Meeting of The Meteoritical Society* (August 14–19, 2022, Glasgow, Scotland). <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2022/pdf/6104.pdf>. *Meteoritics and Planetary Science*. 2022. Volume 57, Issue S1. P. A209. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000834630400211>. (индексируется в WoS). Стендовый доклад.
119. Ipatov S.I. Migration of dust from the orbit of planet Proxima Centauri c. Abstracts of *86th Annual Meeting of The Meteoritical Society* (August 13–18, 2023, Los Angeles, California, USA). - *Meteoritics and Planetary Science*. 2023. V. 58. Issue S1. P. A131. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2023/pdf/6078.pdf>. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001048626300132> (индексируется в WoS).
120. Ipatov S.I. Scattering of planetesimals from the feeding zone of planet Proxima Centauri c. Abstracts of *86th Annual Meeting of The Meteoritical Society* (August 13–18, 2023, Los Angeles, California, USA). - *Meteoritics and Planetary Science*. 2023. V. 58. Issue S1. P. A132. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2023/pdf/6077.pdf>. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001048626300133> (индексируется в WoS). Стендовый доклад.
121. Ipatov S.I. Exchange of meteorites between the terrestrial planets. *86th Annual Meeting of the Meteoritical Society*. Jul 28-Aug 2, 2024. Brussels, Belgium. LPI Contribution No. 3036, 2024, id.6025. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2024/pdf/6025.pdf> - abstract. *Meteoritics and Planetary Science*. 2024. V. 59. P. A204-A204. Supplement 1. WOS:001317679600205. <https://www.academia.edu/126487408> (индексируется в WoS).
122. Ipatov S.I. Migration of bodies to the Earth from different distances from the Sun. *Proc. IAU Symp. No. 374 “Astronomical Hazards for Life on Earth”* (the symposium was on August 9-11, 2022, Busan, Korea), ed. by Tancredi, G., Vol. ??, Symposium S374, Cambridge University Press, Proceedings of the International Astronomical Union. ??, <http://arxiv.org/abs/2411.06777>, in press. (индексируется в Scopus).
123. Ipatov S.I. Migration of bodies in the Proxima Centauri and Trappist 1 planetary systems. *Proc. IAU Symposium 393 “Planetary Science and Exoplanets in the Era of the James Webb Space Telescope”* (August 13-15, 2024, Cape Town, South Africa). Proceedings of the International Astronomical Union. 5 pages, <http://arxiv.org/abs/2411.05954>, Online ISBN: 9781009546157, 2025, in press. (индексируется в Scopus)

124. Ipatov S.I. Migration of bodies ejected from the Earth and the Moon. *Proc. IAU Symposium 393 "Planetary Science and Exoplanets in the Era of the James Webb Space Telescope"* (August 13-15, 2024, Cape Town, South Africa). Proceedings of the International Astronomical Union. 5 pages, <http://arxiv.org/abs/2411.06777>, Online ISBN: 9781009546157, 2025, in press. (индексируется в Scopus).

Публикации в научных сборниках и периодических научных изданиях, неиндексируемые в WoS или Scopus. Non-journal publications non-indexed in WoS or Scopus

125. Ипатов С.И. Осевые вращения аккумулирующихся планет. "О.Ю. Шмидт и советская геофизика 80-х годов". М. "Наука". Под ред. М.А. Садовского, 1984. с. 239-243. <https://search.rsl.ru/ru/record/01001194033>.

126. Ипатов С.И. Численные исследования аккумуляции планет. "Планетная космогония и науки о Земле". М.: Наука. Под ред. В.А. Магницкого. 1989. С. 89-105. <https://search.rsl.ru/ru/record/01001469164/>. https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_339040/.

127. Ипатов С.И. Моделирование на ЭВМ процесса аккумуляции планет. *Происхождение Солнечной системы. Кинетические и термодинамические аспекты*. Москва. "Наука". Под ред. А.В. Витязева. 1993. С. 73-87. <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-%D0%91%D0%91%D0%9A22.6/%D0%9F%20802-112348461>. <https://spbib.ru/ru/catalog/-/books/11198903-proiskhozhdeniye-solnechnoy-sistemy>.

128. Ipatov S.I. Evolution times for disks of planetesimals, "The origin of the Solar System: Soviet Research 1925-1991". Ed. by A.E. Levin and S.G. Brush. American Inst. of Physics Press, through Oxford University Press. 1995. pp. 243-249. <https://www.amazon.com/Origin-Solar-System-Research-1925-1991/dp/1563962810>.

129. Marov M.Ya., **Ipatov S.I.** Volatile inventory and early evolution of planetary atmospheres, *Collisional processes in the solar system*, eds. M.Ya. Marov and H. Rickman, *Astrophysics and space science library*, Vol. 261, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 223-247. <http://books.google.com/books?id=ICEFIUZmoSwC&pg=PA223&lpg=PA223&dq=ipatov&source=web&ots=tl62C5KVCi&sig=yxJPIsB74zjJtZbZfMfMVbQkWEM&output=html>

130. Ипатов С.И. Формирование и миграция транснептуновых тел к планетам земной группы. В Сб.: "Современные проблемы механики и физики космоса" (ред. В.С. Авдуевский и А.В. Колесниченко), Физматлит, Наука, 2003, с. 58-82. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqClmk30ggMawDAAAAAABaCGFa0F24wBCRD5-A-j6bA?e=yVAGgS/>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=24056518>.

131. Cooray A. et al., including **Ipatov S.** (53 co-authors). A New Era in Extragalactic Background Light Measurements: The Cosmic History of Accretion, Nucleosynthesis and Reionization, the science white paper for the *US Astro2010-2020 Decadal Survey Committee*. <http://arxiv.org/abs/0902.2372>, <http://www8.nationalacademies.org/astro2010/publicview.aspx>. <https://www.researchgate.net/publication/24008955>.

132. Ипатов С.И. 23 сентября 2024 года исполняется 100 лет со дня рождения академика РАН Тимура Магомедовича Энеева. На сайте журнала «Наука и Жизнь» <https://www.nkj.ru/info/51055>. 2024.

133. Ипатов С.И. Луна от нас удаляется. О новой модели образования Луны. Журнал «Дельфис». 2024. № 3. С. 39-42. <http://www.delphis.ru/journal/article/soderzhanie-zhurnala-delfis-3-119-2024>. <https://www.academia.edu/126459146>. <https://www.researchgate.net/publication/388874304>.

134. Ипатов С.И. Т.М. Энеев как научный руководитель и человек. "Дельфис". 2024, № 4. С. 50-54. <http://www.delphis.ru/journal/article/soderzhanie-zhurnala-delfis-4-120-2024>. <https://www.academia.edu/127567432>. <https://www.researchgate.net/publication/388870640>

Публикации в материалах научных мероприятий (не менее трех страниц). Publications in materials of scientific meetings (not less than 3 pages).

135. Ipatov S.I. Asteroid-type orbit evolution near the 5:2 resonance, Proc. Intern. Conference "Asteroids, comets, meteors 1991" (June 24-28, 1991, Flagstaff). Ed. by A. Harris and E. Bowell, 1992, pp. 245-248. https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqClmk30ggMb9BwAAAAAB0L7bG2_caS0wt5z10qaORg?e=HzrCSF or http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930009982_1993009982.pdf; <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992acm..proc..245I> - starting from this webpage you can get a free file with the paper; <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1992acm..proc..245I> - see each page separately.

136. Ипатов С.И. Миграция тел к орбите Земли из люков Кирквуда и из зон планет-гигантов. Труды Всесоюзного совещания (с международным участием) "Астероидная опасность" (10-11 октября 1991, Санкт-Петербург). С.-Петербург. Под ред. А.Г. Сокольского. 1992. С. 121-125.

137. Ipatov S.I. Migration of small bodies in the Solar system, *Worlds in interaction: Small bodies and planets of the Solar System*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London. (Proc. of the Meeting "Small bodies in the Solar System and their interactions with the planets" held in Mariehamn, Finland, August 8-12, 1994). Ed. by H. Rickman and M.J. Valtonen, 1996, pp. 211-214. <http://adsabs.harvard.edu/full/1996EM%26P...72..211I>.

138. Ипатов С.И. Миграция небесных тел в Солнечной системе. Труды Международной научно-практической конференции "Анализ систем на пороге XXI века: теория и практика" (27-29 февраля 1996 г., Москва). Изд-во "Интеллект". М. 1997. т. 3. с. 293-305. <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tggcvf>.

139. Ipatov S.I. Migration of celestial bodies in the forming solar system, Proc. of 9th Rencontres de Blois (June 22-28, 1997) "Planetary systems: the long view", Editions Frontieres, Gif. sur Yvette Cedex, Ed. by L.M. Celnikier and J. Tran Thanh Van, 1998, pp. 93-94. https://books.google.ru/books?id=mBTs2a7hEiIC&hl=ru&source=gbs_navlinks_s.

140. Ipatov S.I. Migration of Kuiper-belt objects inside the solar system, Proc. of 9th Rencontres de Blois (June 22-28, 1997) "Planetary systems: the long view", Editions Frontieres, Gif. sur Yvette Cedex, Ed. by L.M. Celnikier and J. Tran Thanh Van, 1998, pp. 157-160. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb8BwAAAAABSXUkCzFYszGs5SzBJLA9g?e=pc34oh>.

141. Ipatov S.I., Hahn G.J. Orbital evolution of the objects P/1996 R2 and P/1996 N2, Proc. of 9th Rencontres de Blois (June 22-28, 1997) "Planetary systems: the long view", Editions Frontieres, Gif. sur Yvette Cedex, Ed. by L.M. Celnikier and J. Tran Thanh Van, 1998, pp. 179-180. https://books.google.ru/books?id=mBTs2a7hEiIC&hl=ru&source=gbs_navlinks_s.

142. Ipatov S.I. Migration of trans-Neptunian objects to the Earth, Proc. of the IAU Colloquium 172 "The impact of modern dynamics in astronomy" (July 6-11, 1998, Namur, Belgium), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, Ed. by J. Henrard and S. Ferraz-Mello, 1999, pp. 107-116. <http://adsabs.harvard.edu/full/1999imda.coll..107I>.
http://books.google.com/books?id=YQlrx7u_JwC&pg=PA107&lpg=PA107&dq=ipatov&source=web&ots=eBP5m7qZ7a&sig=tR72OH8hMNq-aYFLqVh0R5a1e5A&output=html.
<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/2855D111D053F887836683B40D3A185F/S0252921100072468a.pdf>. DOI: 10.1007/978-94-011-4527-5_11, <https://www.academia.edu/44448423/>.

143. Ипатов С.И. Миграция транснептуновых тел к Земле. Труды конф. "Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы" (25-29 октября 1999, Обнинск), Москва, 2000, 151-162. <https://search.rsl.ru/ru/record/01000662025>.

144. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian objects and their migration to the Earth. Proc. of the international conference "Comets, asteroids, meteors, meteorites, astroids, craters" "CAMMAC-99" (September 26 - October 1, 1999, Vinnitsa, Ukraine), 2000, pp. 41-46. https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb7BwAAAAABg5DLCCZYaXUoP_Tf_6bgRQ?e=igUID0.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000camm.conf...41I/abstract>.

145. Ипатов С.И. Формирование транснептуновых тел и их миграция к Земле. Труды конференции "Околоземная астрономия XXI века (научные и практические аспекты)" (21-25 мая 2001 г., Звенигород), Москва, ИНАСАН, 2001, с. 388-400. https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb_BwAAAAABYALHlh71dx1sDP7Xf4ABsA?e=60b9cJ.

146. Ipatov S.I. Ozernoy L.M., Formation and evolution of the trans-Neptunian belt and dust, Proc. of International Conference "Kazan Astronomy 2001" (September 24-29, 2001, Kazan, Russia), 2001, pp. 137-142, <http://arXiv.org/format/astro-ph/0107591>. <https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb6BwAAAAABY9lp3VhC61nVd41DYljiBg?e=4zOZrT>.

147. Ipatov S.I. Migration of Tunguska-type objects from the trans-Neptunian belt to the Earth, Proc. of the Third International Aerospace Congress (August 23-27, 2000, Moscow), both Russian and English texts, 2003. https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb1BwAAAAABNCSLKQ0waFeeay06o4oZ_w?e=Y9P3k6

148. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of Jupiter-family comets and resonant asteroids to near-

Earth space, Proc. of the international conference “*New trends in astrodynamics and applications*” (20-22 January 2003, University of Maryland, College Park), 2003, CD-ROM <http://arXiv.org/format/astro-ph/0303219>.

149. Ipatov S.I., Mather J.C., Taylor P.A. Migration of asteroidal dust particles, Proc. of the international conference “*New trends in astrodynamics and applications*” (20-22 January 2003, University of Maryland, College Park), CD-ROM, 2003, <http://arXiv.org/format/astro-ph/0303398>.

150. Ipatov, S.I. and Mather, J.C., Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets, in EKO [Proceedings of the international scientific workshop on the “*First Decadal Review of the Edgeworth-Kuiper Belt - Towards New Frontiers*” (11-14 March 2003, Antofagasta, Chile)], p. 89-98. Kluwer, reprinted from Earth, Moon, and Planets. DOI: 10.1007/978-94-017-3321-2_8, https://doi.org/10.1007/978-94-017-3321-2_8, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-3321-2_8, <https://www.semanticscholar.org/paper/Migration-of-Trans-Neptunian-Objects-to-the-Planets-Ipatov-Mather/426d16d232eaae19b4410bbcbfcd82ad8834fd51>

151. Ipatov S.I. Migration of comets to near-Earth space, Proc. of the Joint International Scientific Conference “*New Geometry of Nature: Mathematics, Mechanics, Geophysics, Astronomy & Biology*” (August 25 – September 5, 2003, the Kazan University, Kazan, Russia), V. 3 “Astronomy”, Kazan University, 2003, pp. 94-101. <https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb3BwAAAAABhDFEvGrsJtYqcpI-idariw?e=cQgoxI>.

152. Ipatov S.I. Migration of interplanetary dust, Proc. of the international conference “*Near-Earth Astronomy – 2003*” (NEA-2003) (8-13 September, 2003, Terskol, Russia), vol. 1, Saint-Petersburg, Institute of chemistry, 2003, p. 81-86. <https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb5BwAAAAABmUGxgw2q8IC48EhzXHs-uA?e=9IKmcA>.

153. Ipatov S.I. Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets, Proc. of the international conference “*Near-Earth Astronomy – 2003*” (NEA-2003) (8-13 September, 2003, Terskol, Russia), vol. 1, Saint-Petersburg, Institute of chemistry, 2003, p. 87-94. <https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb5BwAAAAABmUGxgw2q8IC48EhzXHs-uA?e=RKWUGH>.

154. Ipatov S.I. Formation and migration of trans-Neptunian objects, *Proceedings of the Second TPF/Darwin International Conference* (San Diego, CA, July 26-29, 2004), 2004. <https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMb0BwAAAAABw2oZK95o5broCatCBkY7pA?e=PJuSKc>

155. Ipatov S.I. Sources of zodiacal dust, Proceedings of the conference “*Near-Earth astronomy-2007*” (Terskol, Russia, 3-7 September 2007), ed. by L.V. Rykhlova & V.K. Tarady, Nalchik, 2008, p. 132-138. <http://arxiv.org/abs/0712.2624>. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggManDAAAAABg2XSiZqQTvCtA2bYIftXzg?e=pCC96r>.

156. Ipatov S.I. Formation of small-body binaries at the stage of rarefied preplanetesimals, Proceedings of the conference “*Near-Earth astronomy - 2009*” (Kazan, Russia, 23-27 August, 2009). Moscow: GEOS. Ed. by L.V. Rykhlova, V.V. Emelyanenko, E.S. Bakanas. 2010, pp. 203-208. https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMamDAAAAABBB_9c3xveoFBGk-eIHafM2A?e=AJq7qZ. <http://agora.guru.ru/display.php?conf=oza-2009&page=program&PHPSESSID=6ifgl49ih14machq21f7f1q54> – программа.

157. Ipatov S.I. Formation of embryos of the Earth-Moon system as a result of a collision of two rarefied condensations, “*The Fifth Moscow Solar System Symposium 5M-S3*” (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 13-18, 2014), 5MS3-MN-01, book of abstracts, CD-ROM, http://ms2014.cosmos.ru/sites/ms2014.cosmos.ru/files/5m-s3_abstract_book.pdf, 2014, pp. 30ab-32ab, <http://arxiv.org/abs/1412.8453>, an oral presentation.

158. Ipatov S.I. The Earth-Moon system as a typical binary in the Solar System, “*SPACEKAZAN-IAPS-2015*”, ed. by M.Ya. Marov, The International Space Forum “SPACEKAZAN-IAPS-2015” (June 1-7, 2015, Kazan, Russia), Publishing house of Kazan University, 2015, pp. 97-105. <http://arxiv.org/abs/1607.07037>. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYeCAAAAAAB1f5IeBKRMHuOFECfCykcw?e=bnhc7l>.

159. Ипатов С.И., Маров М.Я. Миграция малых тел и пыли к планетам земной группы. Труды межд. конференции «*Околосолнечная астрономия-2015*» (31 августа – 5 сентября 2015, Терскол), ред. Б.М. Шустов, Л.В. Рыхлова, Е.С. Баканас, А.П. Карташова. Москва Янус-К. 2015. С. 6-11. Устный доклад. <https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMaTDAAAAAABZC1D4pPudvT9uprtQzGQ9A?e=dqJFJ3>.

160. Ipatov S.I. Origin of orbits of secondaries in discovered trans-Neptunian binaries, “*The Sixth Moscow Solar System Symposium 6M-S3*” (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 5-9, 2015), 6MS3-SB-10, CD-ROM, http://ms2015.cosmos.ru/sites/ms2015.cosmos.ru/files/6m-s3_abstract_book.pdf, 2015, pp. ab-74 - ab-76 (3 pages), or CD-ROM, an **oral** presentation.
161. Маров М.Я., **Ипатов С.И.** Механика космических процессов миграции малых тел в Солнечной системе: Природа и модели. *Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях* (NPNJ'2016, 25-31 мая 2016 г. Алушта, Россия). М.: МАИ, 2016. С. 359-362. Пленарный доклад. http://www.npnj.ru/files/npnj2016_web.pdf, https://elibrary.ru/download/elibrary_27460266_61827676.pdf.
162. Маров М.Я., **Ипатов С.И.** Вода и летучие на Земле: проблема происхождения. Семнадцатая международная конференция “*Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*” (Москва, 26-28 сентября, Борок, 30 сентября 2016 г.). Материалы конференции. Москва. ИГЕМ РАН. 2016. С. 223-226. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26657334>. http://www.igem.ru/petrometing_XVII/docs/sbornik_2016.pdf
163. Ipatov S.I., Marov M.Ya. Delivery of water and planetesimals from the feeding zone of Jupiter and Saturn to forming terrestrial planets, “*The Seventh Moscow Solar System Symposium 7M-S3*” (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 10-14, 2016), 7MS3-AB-05, 115-ab – 117-ab (3 pages), an **oral** presentation. http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7ms3-2016_abstract_book_www.pdf
164. Ипатов С.И. Формирование зародышей Земли и Луны из общего сгущения и их последующий рост. Восемнадцатая международная конференция “*Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*” (Москва, 2-4 октября, Борок, 6 октября 2017 г.). Материалы конференции. Москва. ИГЕМ РАН. 2017. С. 122-125. http://www.igem.ru/petrometing_XVIII/tbgdocs/sbornik_2017.pdf. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26657334>.
165. Marov M.Ya., **Ipatov S.I.** Heterogeneous accretion: some results of the computer modeling, “*The Eighth Moscow Solar System Symposium 8M-S3*” (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 9-13, 2017), 2017, 8MS3-PA-01, p. 1-3, https://ms2017.cosmos.ru/docs/8m-s3_abstract_book_2.pdf. An oral presentation.
166. Ipatov S.I. Formation and growth of embryos of the Earth-Moon system, “*The Eighth Moscow Solar System Symposium 8M-S3*” (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 9-13, 2017), 2017, 8MS3-PS-36, p. 287-289, https://ms2017.cosmos.ru/docs/8m-s3_abstract_book_2.pdf. A poster.
167. Ипатов С.И. Источники объектов, выпадающих на Землю. *География и геоэкология на службе науки и инновационного образования: материалы XIII-й Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, посвященной 70-летию Музея геологии и землеведения КГПУ им. В.П. Астафьева, 110-летию со дня рождения Михаила Васильевича Кириллова, 110-летию Тунгусского феномена*. Красноярск, 20 апреля 2018. / отв. ред. М.В. Прохорчук, ред. кол.; Красноярский гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева. – Красноярск, 2018. – Вып. 13. С. 114-116. ISBN 978-5-00102-205-3. Индексирована в РИНЦ. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32854839>.
168. Маров М.Я., **Ипатов С.И.** Расчеты миграции малых тел в Солнечной системе. *Материалы XII Международной конференции по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли* (NPNJ'2018) (24-31 мая 2018 г., Алушта, Крым). Издательство: Издательство МАИ, Москва. http://www.npnj.ru/files/npnj2018_web.pdf. С. 414-416. <https://elibrary.ru/item.asp?id=35651552>. ISBN 978-5-4316-0491-1. Устный доклад.
169. Ипатов С.И. Вероятности столкновений тел из зоны питания планет земной группы с планетами и Луной. Девятнадцатая международная конференция “*Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*” (Москва, 24-30 сентября 2018). Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. 2018. С. 134-137. Стендовый доклад. ISBN 978-5-88918-053-1/ <https://elibrary.ru/item.asp?id=36060214>.
170. Ипатов С.И. Миграция малых тел к Земле и Луне с различных расстояний от Солнца. Девятнадцатая международная конференция “*Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*” (Москва, 24-30 сентября 2018). Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. 2018. С. 138-141. Устный доклад. Индексирована в РИНЦ. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36060221>. ISBN 978-5-88918-053-1
171. Ипатов С.И. Миграция пылевых частиц к Земле и Луне из зоны Юпитера и Сатурна. Девятнадцатая международная конференция “*Физико-химические и петрофизические*

исследования в науках о Земле" (Москва, 24-30 сентября 2018). Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. 2018. С. 142-145. Стендовый доклад. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36060225>. ISBN 978-5-88918-053-1.

172. Ipatov S.I. Migration of bodies to the Earth and the Moon from different distances from the Sun. *The Ninth Moscow Solar System Symposium 9M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 8-12, 2018). <https://ms2018.cosmos.ru/>, 2018, # 9MS3-SB-11, p. 104-106. an oral presentation. Устный доклад. ISBN 978-5-00015-008-5. https://elibrary.ru/download/elibrary_37178225_95329110.pdf, <https://www.academia.edu/44453329>.

173. Ipatov S.I. Migration of interplanetary dust particles to the Earth and the Moon. *The Ninth Moscow Solar System Symposium 9M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 8-12, 2018). <https://ms2018.cosmos.ru/>, # 9MS3-DP-01, p. 144-146, 3 pages, an oral presentation, устный доклад. ISBN 978-5-00015-008-5. https://elibrary.ru/download/elibrary_37178447_89380013.pdf, <https://www.academia.edu/44453504>.

174. Busarev V.V., **Ipatov S.I.** Observational evidences and possible dynamical reasons of sublimation activity of primitive asteroids in the main-belt. *The Ninth Moscow Solar System Symposium 9M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 8-12, 2018). <https://ms2018.cosmos.ru/>, 2018, 9MS3-PS-48, p. 293-295, 3 pages, a poster. Стендовый доклад. ISBN 978-5-00015-008-5. https://elibrary.ru/download/elibrary_37178457_93734719.pdf.

175. Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V. Variation of near-Earth object population based on analysis of diameters of lunar craters. *The Ninth Moscow Solar System Symposium 9M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 8-12, 2018). <https://ms2018.cosmos.ru/>, 2018, 9MS3-PS-77. P. 349-351, 3 pages, a poster. Стендовый доклад. ISBN 978-5-00015-008-5. https://elibrary.ru/download/elibrary_37178333_94707009.pdf

176. Feoktistova E.A., **Ipatov S.I.**, Svetsov V.V. Lunar craters formed by encounters of satellite systems of near-Earth objects with the Moon. *The Ninth Moscow Solar System Symposium 9M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 8-12, 2018). <https://ms2018.cosmos.ru/>, 2018, 9MS3-PS-79, p. 352-355, 4 pages, a poster. Стендовый доклад. ISBN 978-5-00015-008-5. https://elibrary.ru/download/elibrary_37178336_58137643.pdf

177. Ипатов С.И. Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной. *Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии.* (ВЕСЭМПГ-2019). 16-17 апреля 2019г. Москва. <http://intranet.geokhi.ru/rasempg/Shared%20Documents/2019/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B4%D1%8B%20%D0%92%D0%95%D0%A1%D0%AD%D0%9C%D0%9F%D0%93-2019.pdf> . с. 285-288. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41404886> (это труды, статус доклада приводится рядом с тезисами).

178. Ипатов С.И. Вероятности столкновений с Землей и Луной планетезималей, мигрировавших из-за орбиты Марса. *Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии.* (ВЕСЭМПГ-2019). 16-17 апреля 2019 г. Москва. <http://intranet.geokhi.ru/rasempg/Shared%20Documents/2019/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B4%D1%8B%20%D0%92%D0%95%D0%A1%D0%AD%D0%9C%D0%9F%D0%93-2019.pdf> . с. 289-292. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41404887> (это труды, статус доклада приводится рядом с тезисами).

179. Ипатов С.И., Феоктистова Е.А., Светцов В.В. Численность околоземных объектов и образование лунных кратеров в течение последнего миллиарда лет. *Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии.* (ВЕСЭМПГ-2019). 16-17 апреля 2019г. Москва. <http://intranet.geokhi.ru/rasempg/Shared%20Documents/2019/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B4%D1%8B%20%D0%92%D0%95%D0%A1%D0%AD%D0%9C%D0%9F%D0%93-2019.pdf> . с. 293-296. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41404888>. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41404888_17746407.pdf.

180. Ипатов С.И. Перемешивание планетезималей в зоне питания планет земной группы. *Двадцатая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле"* (Москва, 23-25 сентября 2019). Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. 2019. С. 122-125. 4 стр. Стендовый доклад. ISBN 978-5-88918-056-2. http://www.igem.ru/petrometing_XX/tbgdocs/sbornik_2019.pdf, https://elibrary.ru/download/elibrary_40938725_91893136.pdf, <https://elibrary.ru/item.asp?id=40938725>.

181. Ипатов С.И., Феоктистова Е.А., Светцов В.В. Изменения численности околоземных объектов и лунных кратеров в течение последнего миллиарда лет. *Двадцатая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле"* (Москва, 23-25 сентября 2019). Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. 2019. С. 126-129. ISBN 978-5-88918-056-2. Устный доклад. http://www.igem.ru/petrometing_XX/tbgdocs/sbornik_2019.pdf, <https://elibrary.ru/item.asp?id=40938726>, https://elibrary.ru/download/elibrary_40938726_66245553.pdf
182. Маров М.Я., Ипатов С.И. Миграция планетезималей к планетам земной группы и Луне из-за орбиты Марса. *Двадцатая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле"* (Москва, 23-25 сентября 2019). Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. 2019. С. 226-229. Устный доклад. ISBN 978-5-88918-056-2. http://www.igem.ru/petrometing_XX/tbgdocs/sbornik_2019.pdf, <https://elibrary.ru/item.asp?id=40938778>.
183. Marov M.Ya., Ipatov S.I. Migration of planetesimals from different distances outside Mars' orbit to the terrestrial planets and the Moon. *The Tenth Moscow Solar System Symposium 10M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 7-11, 2019). <https://ms2019.cosmos.ru/docs/10m-s3-abstract-book.pdf>, # 10MS3-SB-02, 3 стр. Vol. 1, p. 171-173, ISBN-978-5-00015-028-3. <https://ms2019.cosmos.ru/docs/10m-s3-abstract-book.pdf>, p. 189-191. an oral presentation. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41829253>, https://elibrary.ru/download/elibrary_41829253_49027230.pdf.
184. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of planetesimals from different parts of the feeding zone of the terrestrial planets with the forming planets, the Moon, and their embryos. *The Tenth Moscow Solar System Symposium 10M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 7-11, 2019). # 10MS3-SB-04, Vol. 1, p. 177-179, 3 стр. ISBN-978-5-00015-028-3, <https://ms2019.cosmos.ru/docs/10m-s3-abstract-book.pdf>, p. 195-197. an oral presentation. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41829255>, https://elibrary.ru/download/elibrary_41829255_76116769.pdf.
185. Ipatov S.I. Angular momenta of colliding rarefied condensations and formation of the Earth-Moon system. *The Tenth Moscow Solar System Symposium 10M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 7-11, 2019). # 10MS3-PS-56, 3 стр., vol. 2, p. 126-128. ISBN-978-5-00015-028-3. a poster presentation. <https://ms2019.cosmos.ru/docs/10m-s3-abstract-book.pdf>, p. 386-388. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41829343>.
186. Busarev V.V., Ipatov S.I. Estimation of the fraction of ice material delivered to the Main asteroid belt in the early Solar system. *The Tenth Moscow Solar System Symposium 10M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 7-11, 2019). # 10MS3-PS-75, 2019. Vol. 2, p. 436-438, 3 стр., ISBN-978-5-00015-028-3, a poster presentation. <https://ms2019.cosmos.ru/docs/10m-s3-abstract-book.pdf>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=41829362>, <https://www.researchgate.net/publication/337869943>.
187. Ипатов С.И. Вклад Т.М. Энеева в планетную космогонию. *XLIV Академические чтения по космонавтике* (28-31 января 2020, Москва). Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. ISBN 978-5-7038-5343-6 (т. 1). 2020. Т. 1. С. 251-254. http://www.korolevspace.ru/sites/default/files/uploads/Abstracts_44_2020_Vol1.pdf, <https://elibrary.ru/item.asp?id=42702351>. Приглашенный доклад. Ipatov S.I. Contribution of T.M. Eneev to planetary cosmogony. *XLIV Academic space conference* (28-31 January 2020), 2020. Vol. 1. P. 251-254. Invited presentation.
188. Ипатов С.И. «Миграция экзопланетезималей в системе Проксима-Центавра». Двадцать первая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (Москва, 21-23, 25 сентября 2020). Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. 2020. стр. 101-104. ISBN 978-5-88918-059-3, ISSN 2686-8938. Стендовый доклад. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44139396>, https://elibrary.ru/download/elibrary_44139396_54723641.pdf – вся конференция. https://elibrary.ru/download/elibrary_44835907_68393380.pdf – мои тезисы.
189. Ипатов С.И., Маров М.Я. Миграция планетезималей к Земле из зоны внешнего астероидного пояса. *Двадцать первая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле"* (Москва, 21-24 сентября 2020). Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. 2020. 105-108. ISBN 978-5-88918-059-3, ISSN 2686-8938. Устный доклад. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44835908> – вся конференция. https://elibrary.ru/download/elibrary_44835908_21183755.pdf - мои тезисы.
190. Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V. Estimates of the number of near-Earth objects based on the number of lunar craters formed during the last billion years. *11th Moscow International Solar System Symposium*, 5-9 October 2020, IKI, Moscow, Russia, 11MS3-MN-PS-06, (p. 206-208, https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract_book_full_version_05.pdf), (p. 191-193, a hard copy), (p. 211-

213, https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45672827&pff=1,https://elibrary.ru/download/elibrary_45672827_29294412.pdf) 3 pages, (DOI: 0.21046/11MS3-2020 – for a whole book), a poster. <https://www.youtube.com/watch?v=DlSfYoy-tlA> – day 3 of the conference, my presentation was at the end (without sounds).

191. Feoktistova E.A., **Ipatov S.I.** Depths of the lunar Copernicans craters located on lunar maria and highlands. *11th Moscow International Solar System Symposium*, 5-9 October 2020, IKI, Moscow, Russia, 11MS3-MN-PS-09, (p. 214-216, https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract_book_full_version_05.pdf), (p. 199-201, a hard copy), (p. 219-221, https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45672830&pff=1,https://elibrary.ru/download/elibrary_45672830_45675027.pdf), (DOI: 0.21046/11MS3-2020 – for a whole book), 3 pages, a poster. Стендовый доклад.

192. Marov M.Ya., **Ipatov S.I.** Migration of planetesimals to the Earth from the zone of the outer asteroid belt. *11th Moscow International Solar System Symposium*, 5-9 October 2020, IKI, Moscow, Russia, 11MS3-SM-11, (p. 277-279, https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract_book_full_version_05.pdf), (p. 262-264, a hard copy), 3 pages, (p. 282-284, https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45672856&pff=1,https://elibrary.ru/download/elibrary_45672856_87819955.pdf) (DOI: 0.21046/11MS3-2020 – for a whole book), an oral presentation. <https://www.youtube.com/watch?v=nHHS0IX6qtw> - day 4 of the conference, my presentation from 4h34 to 4h47. Устный доклад.

193. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of exoplanetesimals with exoplanets in the Proxima Centauri planetary system. *11th Moscow International Solar System Symposium*, 5-9 October 2020, IKI, Moscow, Russia, 11MS3-EP-14, (p. 353-355, https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract_book_full_version_05.pdf), (p. 338-340, a hard copy), (p. 358-360, https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45672890&pff=1,https://elibrary.ru/download/elibrary_45672890_53369576.pdf), (DOI: 0.21046/11MS3-2020 – for a whole book), <https://www.academia.edu/44447360/>. 3 pages, an oral presentation. <https://www.youtube.com/watch?v=z6aqnzU41OY> - day 5 of the conference, my presentation from 3h 34 to 3.42 with questions. Устный доклад.

194. Ипатов С.И. Вероятности столкновений околоземных объектов с Землей. *Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии*. Москва. 20-21 октября 2020. / Отв. редактор О.А. Луканин, - М: ГЕОХИ РАН, 2020. ISBN 978-5-905049-24-8. с. 242-246. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45676471&pff=1,http://www.geokhi.ru/rasempg/Shared%20Documents/2020/ТрудыХит%202020_НА%20ПЕЧАТЬ_ФИНАЛ.pdf. Устный доклад.

195. Ipatov S.I. Delivery of water and volatiles to planets in the habitable zone in the Proxima Centauri system. Abstracts of the *AASTCS Habitable Worlds 2021 Workshop* (22-26 February 2021, a virtual conference). Open Engagement Abstracts, https://aas.org/sites/default/files/2021-02/Abstracts_Open_Engagement_HW2_final.pdf, # 123, p. 63-66. <https://kistorm.com/0MqpKkBD0J8Cw8V6y3Gg/Y58cURvfngDM20wlHkSt> - an abstract. https://drive.google.com/file/d/1nn_Mu3bjeDdMS8QUS7sVxwCIHoAd20uY/view - a poster. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021BAAS...53c1126I/abstract>. AASTCS8, Habitable Worlds 2021, id. 1126. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2021, Vol. 53, No. 3 e-id 2021n3i1126, 5 pages. <https://baas.aas.org/pub/2021n3i1126/release/2>. Стендовый доклад.

196. Ипатов С.И. Миграция планетезималей в экзопланетной системе Траппист и в зоне планет земной группы. *Двадцать вторая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле»* (27 сентября -3 октября 2021 года, Москва). Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. 2021. с. 114-117. 4 стр. http://www.igem.ru/petromeeting_XXII/tbgdocs/sbornik_2021.pdf. <https://elibrary.ru/item.asp?id=47336179>. https://elibrary.ru/download/elibrary_47336179_93660561.pdf/ SBN 978-5-88918-064-7. ISSN 2686-8938. Устный доклад.

197. Ipatov S.I. Migration of bodies in the Proxima Centauri planetary system. *12th Moscow International Solar System Symposium*, 11-15 October 2021, IKI, Moscow, Russia, https://ms2021.cosmos.ru/docs/2021/12ms3_book_5.pdf, 12MS3-EP-11, p. 199-201, 3 pages. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48368710>. https://elibrary.ru/download/elibrary_48368710_77849862.pdf. An oral presentation.

198. Ipatov S.I., Marov M.Ya. Collisions of planetesimals with the Earth and the Moon, *12th Moscow International Solar System Symposium*, 11-15 October 2021, IKI, Moscow, Russia,

https://ms2021.cosmos.ru/docs/2021/12ms3_book_5.pdf. 12MS3-SB-11, p. 293-295, 3 pages.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=48368762>. https://elibrary.ru/download/elibrary_48368762_60937783.pdf.
An oral presentation.

199. Ипатов С.И. Вероятности выпадений на Землю и Луну тел, выброшенных с Земли при выпадениях на нее тел-ударников. Тезисы Научно-практической конференции с международным участием «Околоземная астрономия–2022» (18-21 апреля 2022 г., Москва). <http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2022/04/Abstract-Book-2022.pdf>. 2022. с. 120-123. Устный доклад.

200. Ипатов С.И., Маров М.Я. Миграция тел к Земле и Луне с различных расстояний от Солнца. Тезисы Научно-практической конференции с международным участием «Околоземная астрономия–2022» (18-21 апреля 2022 г., Москва). <http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2022/04/Abstract-Book-2022.pdf>. 2022. 162-164. Стендовый доклад.

201. Ипатов С.И. Вероятности столкновений тел, выброшенных с Земли и Луны, с планетами земной группы и Луной. Материалы XXIII международной конференции "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (26 сентября - 2 октября 2022 года, Москва). ISBN 978-5-88918-069-2. ISSN 2686-8938. 2022. С. 104-107. Устный доклад. http://www.igem.ru/petrometing_XXIII/tbgdocs/sbornik_2022.pdf - abstracts book.

202. Ипатов С.И. Миграция ледяных планетезималей к внутренним планетам в системе Проксима Центавра. Материалы XXIII международной конференции "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (26 сентября - 2 октября 2022 года, Москва, ИГЕМ РАН). 2022. С 108-111. ISBN 978-5-88918-069-2 / ISSN 2686-8938. Устный доклад. http://www.igem.ru/petrometing_XXIII/tbgdocs/sbornik_2022.pdf - abstracts book.

203. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of bodies ejected from the Earth with the terrestrial planets and the Moon. *Thirteenth Moscow Solar System Symposium* (13M-S3) (October 10-14, 2022, Moscow, the Space Research Institute). ISBN: 978-5-00015-057-3. DOI: 10.21046/13MS3-2022. 2022. 13MS3-SB-11. P. 264-266. https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf. <https://elibrary.ru/item.asp?id=50086655>. https://elibrary.ru/download/elibrary_50086655_43391244.pdf. Устный доклад.

204. Ipatov S.I. Scattering of planetesimals from the feeding zone of Proxima Centauri c. *Thirteenth Moscow Solar System Symposium* (13M-S3) (October 10-14, 2022, Moscow, the Space Research Institute). 2022. 13MS3-EP-08. P. 372-374. ISBN: 978-5-00015-057-3. DOI: 10.21046/13MS3-2022. <https://elibrary.ru/item.asp?id=50086723>. https://elibrary.ru/download/elibrary_50086655_43391244.pdf. Устный доклад.

205. Ipatov S.I. Mixing of planetesimals in the TRAPPIST-1 exoplanetary system. *Thirteenth Moscow Solar System Symposium* (13M-S3) (October 10-14, 2022, Moscow, the Space Research Institute). 2022. 13MS3-EP-PS-02. P. 378-380. URL: https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf. ISBN: 978-5-00015-057-3. DOI: 10.21046/13MS3-2022. <https://elibrary.ru/item.asp?id=50086725>. https://elibrary.ru/download/elibrary_50086725_88823830.pdf. Стендовый доклад.

206. Маров М.Я., Ипатов С.И. Роль миграции небесных тел в эволюции Земли и планет. Материалы XXIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСПМС'2023), 4–10 сентября 2023 г., Дивноморское, Краснодарский край. - М.: Изд-во МАИ, 2023. С. 493-495. http://www.cmmass.ru/files/cmmass2023_web.pdf - материалы конференции. <http://www.cmmass.ru/files/cmmass2023program.pdf> - программа конференции. https://elibrary.ru/download/elibrary_65489375_69967172.pdf. Стендовый доклад.

207. Ипатов С. И. Миграция тел из зоны питания планеты Проксима Центавра с. // Материалы XXIV международной конференции "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле". (25 сентября – 27 сентября 2023 г., Москва; 29 сентября Борок). М.: ИГЕМ РАН, 2023. С. 115-118. ISBN 978-5-88918-072-2 / ISSN 2686-8938. Устный доклад. https://elibrary.ru/download/elibrary_59367516_20494363.pdf. <https://elibrary.ru/item.asp?id=59367516&pf=1> – мои тезисы. http://www.igem.ru/petrometing_XXIV/tbgdocs/sbornik_2023.pdf – сборник. http://www.igem.ru/petrometing_XXIV/tbgdocs/programm_2023.pdf – программа конференции. https://www.youtube.com/watch?v=eWI_n9T8H6s – доклады.

208. Ipatov S.I. Migration of bodies ejected from the Earth and the Moon. *Fourteenth Moscow Solar System Symposium* (14M-S3) (October 9-13, 2023, Moscow, the Space Research Institute),

- https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT-BOOK-2023-10-06.pdf . ISBN: 978-5-00015-061-0. DOI: 10.21046/14MS3-2023. P. 274-276. An oral presentation. https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14M-S3_PROGRAM_3B-0926.pdf - программа конференции. <https://elibrary.ru/item.asp?id=65489334>. https://elibrary.ru/download/elibrary_65489334_81821420.pdf.
209. Ipatov S.I. Mixing of planetesimals in the Glisse 581 planetary system. *Fourteenth Moscow Solar System Symposium* (14M-S3) (October 9-13, 2023, Moscow, the Space Research Institute), https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT-BOOK-2023-10-06.pdf . ISBN: 978-5-00015-061-0. DOI: 10.21046/14MS3-2023. P. 333-335. An oral presentation. https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14M-S3_PROGRAM_3B-0926.pdf - программа конференции. https://elibrary.ru/download/elibrary_65489334_81821420.pdf.
210. Ипатов С. И. Обмен метеоритами между планетами земной группы. // Материалы XXV международной конференции "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (30 сентября-4 октября 2024 г., ГЕОХИ РАН, ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН и ГО «Борок» ИФЗ РАН). Москва. ИГЕМ РАН. 2024. ISBN 978-5-88918-075-3. ISSN 2686-8938. С. 87-90. Устный доклад. <https://www.youtube.com/live/FL2IlkBuAL4> - трансляция моего доклада 30 сентября на конференции с 11-ой минуты по 25-ую минуту трансляции.
211. Ipatov S.I. Migration of bodies ejected from Mars. Тезисы Московского международного симпозиума по исследованиям Солнечной системы (15M-S3), Москва. 21-25 октября 2024 г. *The Fifteenth Moscow Solar System Symposium* (15M-S3). Moscow, Russia. October 21- 25, 2024. 15MS3-SB-06. P. 236-238. <http://ms2024.cosmos.ru>, an oral presentation. https://ms2024.cosmos.ru/docs/2024/15M-S3_Program_07.10.pdf – conference program. https://ms2024.cosmos.ru/docs/2024/15-MS3_Abstract_Book-10-18.pdf. https://elibrary.ru/download/elibrary_80856144_39006326.pdf. <https://youtube.com/playlist?list=PLGyFz6xpxOYlFhol5ORap9INvTVQargy-&si=Tvkk325LEhPOzqwy> - Мой доклад 24 октября с 12 до 12-10 по московскому времени (примерно между 2 час 9 мин и 2 час 20 минутами записи). Устный доклад.
212. Ipatov S.I. Migration of planetesimals in the TRAPPIST-1 and GLISSE 581 exoplanetary systems. Тезисы Московского международного симпозиума по исследованиям Солнечной системы (15M-S3), Москва. 21-25 октября 2024г. *The Fifteenth Moscow Solar System Symposium* (15M-S3). Moscow, Russia. October 21-25, 2024. <http://ms2024.cosmos.ru>, an oral presentation. https://ms2024.cosmos.ru/docs/2024/15M-S3_Program_07.10.pdf - программа конференции. https://ms2024.cosmos.ru/docs/2024/15-MS3_Abstract_Book-10-18.pdf. 15MS3-EP-01. p. 320-322. <https://www.academia.edu/126487193/>. <https://youtube.com/playlist?list=PLGyFz6xpxOYlFhol5ORap9INvTVQargy-&si=Tvkk325LEhPOzqwy> - Мой доклад 25 октября с 10 до 10-20 по московскому времени (примерно между 11 и 29 минутами записи). Устный доклад.
213. Ipatov S.I. Migration of planetesimals and dust particles in the Proxima Centauri exoplanetary system. *Modern astronomy: from the Early Universe to exoplanets and black holes*. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук. 2024. С. 845-851. DOI: 10.26119/VAK2024.134. https://sao.editorum.ru/ru/nauka/conference_article/11858/view. <https://doi.org/10.26119/VAK2024.134>. <https://www.researchgate.net/publication/387473114>. <https://www.academia.edu/126685835> .
214. Ipatov S.I. Migration of planetesimals in the TRAPPIST-1 exoplanetary system. *Modern astronomy: from the Early Universe to exoplanets and black holes*. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук. 2024. С. 852-855. DOI: 10.26119/VAK2024.135. https://sao.editorum.ru/ru/nauka/conference_article/11832/view . <https://doi.org/10.26119/VAK2024.135>. <https://www.researchgate.net/publication/387472279>. <https://www.academia.edu/126684939>.
215. Ipatov S.I. Exchange of meteorites between the terrestrial planets and the Moon. *Modern astronomy: from the Early Universe to exoplanets and black holes*. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук. 2024. С. 904-909. DOI: 10.26119/VAK2024.143. https://sao.editorum.ru/ru/nauka/conference_article/11887/view. <https://doi.org/10.26119/VAK2024.143>. <https://www.researchgate.net/publication/387471384>. <https://www.academia.edu/126685916>. <https://arxiv.org/abs/2501.00134>

https://library.keldysh.ru/author_page.asp?aid=1077 .

Препринты ИПМ рассылались в центральные библиотеки в качестве обязательной рассылки.

Абстракты моих препринтов на английском языке доступны на <https://ui.adsabs.harvard.edu/> (search for Ipatov, S.I.)

216. Ипатов С.И. Эволюция плоского кольца гравитирующих материальных точек. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1978. N 2. 60 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007779447/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978iam..reptQ...1I/abstract> .

217. Ипатов С.И. Эволюция плоского кольца гравитирующих тел, объединяющихся при столкновениях. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1978. N 101. 66 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007779448/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978iam..rept....1I/abstract> .

218. Ипатов С.И. Взаимное гравитационное влияние двух протопланет в плоской задаче трех тел при первоначально круговых орбитах. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1979. N 183. 32 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007748475/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979iam..reptQ...1I/abstract> .

219. Ипатов С.И. Задача трех тел и взаимодействие протопланет в протопланетном облаке. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1979. N 192. 28 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007748476/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979iam..reptR...1I/abstract> .

220. Ипатов С.И. Эволюция резонансных астероидных орбит в плоской задаче трех тел: Солнце-Юпитер-астероид. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1980. N 30. 32 с. https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_1141265/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980iam..reptQ...1I/abstract> .

221. Ипатов С.И. О приближенном методе исследования взаимного гравитационного влияния тел протопланетного облака. К вопросу об эволюции орбиты Плутона. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1980. N 43. 33 с. https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_1141264/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980iam..reptR...1I/abstract> .

222. Ипатов С.И. Численные исследования вращательных моментов аккумулирующихся тел. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1981. N 101. 28 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001061162/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1981iam..reptQ...1I/abstract> .

223. Ипатов С.И. Некоторые вопросы формирования осевых вращений планет. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1981. N 102. 28 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001061163/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1981iam..reptR...1I/abstract> .

224. Ипатов С.И. Численные исследования аккумуляции планет земной группы. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1982. N 144. 28 с. https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_1105978/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982iam..reptR...1I/abstract> .

225. Ипатов С.И. Оценки эволюции пространственных колец гравитирующих тел, объединяющихся при столкновениях. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1982. N 186. 28 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001146726/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982iam..reptQ...1I/abstract> .

226. Ипатов С.И. Численные исследования плоской модели аккумуляции ядер планет-гигантов. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1983. N 117. 28 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001177306/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1983iam..rept....1I/abstract> .

227. Ипатов С.И. Численные исследования эволюции пространственных колец гравитирующих тел, соответствующих зонам питания планет-гигантов. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1984. N 1. 28 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001195896/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984iam..rept....1I/abstract> .

228. Ипатов С.И. Эволюция эксцентриситетов орбит на начальной стадии твердотельной аккумуляции планет. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1985. N 4. 28 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010820805/ . <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1985iam..rept....1I/abstract> .

229. Ипатов С.И. Численные исследования эволюции орбит астероидов и планетезималей в рамках плоской задачи трех тел. Препринт. Ин. прикл. матем. АН СССР. 1988. N 62. 23 с.

https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001411809/.

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1988iam..rept....1I/abstract>.

230. Ипатов С.И. Происхождение люка Кирквуда 5:2. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1989. N 67. 28 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001490552/.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1989iam..rept....1I/abstract>.

231. Козлов Н.Н., Ипатов С.И., Торопцева В.Н. Минимизация числа переходов при трассировке двухслойных микросхем. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1990. N 118. 14 с.

231b. Ипатов С.И. Эволюция орбит астероидного типа при резонансе 5:2. Препринт Ин. прикл. матем. АН СССР. 1991. N 125. 48 с.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991iam..rept....1I/abstract>.

232. Ипатов С.И. Гравитационное взаимодействие планетезималей, движущихся по близким орбитам. Препринт Ин. прикл. матем. РАН. 1994. N 23. 60 с.
https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001689071/ - информация о препринте в Российской государственной библиотеке (РГБ). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994iam..reptQ...1I/abstract>.

233. Ипатов С.И. Миграция малых тел к Земле. Препринт Ин. прикл. матем. РАН. 1994. N 105. 48 с. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001700550/.
<https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=a4a227fc039ec8dae04ee652c51e681d&irbDb=ESVODT> – заказ в ГПНТБ (другие препринты также можно найти в центральных библиотеках).
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994iam..reptR...1I/abstract>.

Тезисы конференций и другие небольшие публикации (1-2 страницы).

Abstracts of conferences and other small publications (1-2 pages)

234. Ипатов С.И. Численные исследования эволюции дисков гравитирующих твердых тел, движущихся вокруг массивного центрального тела. Аннотации докладов на *VI Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике* (Ташкент, сент. 1986). 1986. С. 314.

235. Ипатов С.И. Эволюция орбит астероидного типа в окрестности резонанса 2:5. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции "*Методы исследования движения, физика и динамика малых тел Солнечной системы*". Душанбе. 22-26 августа 1989. 1989. С. 33.
https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001496710/?ysclid=m7xilbwul2504403932/

236. Ипатов С.И. Моделирование на ЭВМ эволюции дисков гравитирующих тел, движущихся вокруг Солнца. Тезисы докладов на Всесоюзном совещании "*Методы компьютерного конструирования моделей классической и небесной механики-89*" Секция 1. Ленинград. 21-23 ноября 1989. 1989. С. 41-42.
<https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=bc9c4d045a07bf40589bf6738a7bb370&irbDb=ESVODT>.

237. Ipatov S.I., Computer modelling of the process of solar system formation, Abstr. Intern. IMACS Conference "*Mathematical modelling and applied mathematics*" (June 18-23, 1990, Moscow), 1990, pp. 200-201.

238. Ипатов С.И. Методы выбора пар контактирующих объектов в эволюционирующем диске. Тезисы докладов на Всесоюзном совещании "*Алгоритмы и программы небесной механики*" Ленинград. 20-22 ноября 1990. 1990. С. 31-32.

239. Ipatov S.I. Possible migration of the giant planets embryos, Abstracts of 22nd Lunar and Planetary Science Conference (March 18-22, 1991, Houston), 1991, pp. 607-608.
<https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYQCAAAAAABPW80jdwKLqebQaBxBjijMA?e=2lfl2w>,
<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1991LPI....22..607I>

240. Ipatov S.I. Asteroid-type orbit evolution near the 5:2 resonance, Abstr. Intern. Conference "*Asteroids, comets, meteors 1991*" (June 24-28, 1991, Flagstaff, Arizona), LPI Contribution No 765, 1991, p. 98. <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1992LPI....23..567I>.

241. Ипатов С.И. Численные исследования миграции тел в формирующейся Солнечной системе. Аннотации докладов на *VII Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике* (15-21 августа, 1991, Москва). 1991. С. 172-173.

242. Ipatov S.I. Computer simulation of the bodies migration in the forming solar system, Abstr. Intern. Conference "*Origin and evolution of the solar system*" (August 27-31, 1991, Moscow), 1991, p. 31.

243. Ипатов С.И. Миграция тел к орбите Земли из люков Кирквуда и из зон планет-гигантов. Труды Всесоюзного совещания (с международным участием) "Астероидная опасность" (С.-Петербург, 10-11 октября 1991. Ред. А.Г. Сокольский. С.-Петербург. ИТА. 1992. С. 121-125.

244. Ipatov S.I. Migration of bodies during the accumulation of terrestrial planets, Abstracts of 23rd Lunar and Planetary Science Conference (March 16-20, 1992, Houston), 1992, pp. 567-568. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYRCAAAAAABL7U2JmZYjgaaoB4IvSEqvQ?e=DcgTNM>. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992LPI....23..567I> - starting from this webpage you can get a free file with the abstract; <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1992LPI....23..567I>.

245. Ipatov S.I. Migration of planetesimals and planets in the forming solar system, Abstracts of 24th Meeting of Division for Planetary Sciences of the American Astronomical Society (Munich, October 12-16, 1992). *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1992, 25-14P, N 3, p. 984. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMarDAAAAABG6PujDfolItGWjZv9Nn62Q?e=zRgeTd>, <http://adsabs.harvard.edu/full/1992DPS....24.2516P> or <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1992DPS....24.2514I>.

246. Ipatov S.I. Migration of bodies to the orbit of Earth, Abstracts of the Conference "Hazards due to comets and asteroids" (January 5-9, 1993, Tucson, Arizona), 1993.

247. Ivashkin V.V., **Ipatov S.I.**, Smirnov V.V. Ballistical analysis of the problem of the asteroid hazard mitigation. Abstr. of the conference (with international participation) "Asteroid hazard-93" (May 25-27, 1993, St. Petersburg), ИТА, St. Petersburg, 1993, p. 94.

248. Ipatov S.I. Migration of bodies to Earth, Abstr. Intern. Conference "Asteroids, comets, meteors 1993" (June 14-18, 1993, Belgirate, Italy), 1993, p. 138. <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1993LPICo.810..138I>

249. Ipatov S.I. Interactions of two bodies moving around the Sun, Abstr. of the Conference with international participation "Theoretical, applied, and computer celestial mechanics" (12-14 October 1993, St. Petersburg, Russia), 1993, pp. 48-49.

250. Ipatov S.I. Dynamics of two interacting objects orbiting the Sun, Abstracts of 25th Lunar and Planetary Science Conference (March 14-18, 1994, Houston, USA), 1994, pp. 593-594. <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1994LPI....25..593I>. <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYSCAAAAAABByBknNYFwjYu6tn8DX0JKtg?e=dNki9M>

251. Ipatov S.I. Migration of bodies in the accumulation of planets, Abstracts of the Intern. Conference on comparative planetology (June 6-8, 1994, Pasadena, USA), 1994. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00613304>

252. Ипатов С.И. Миграция тел в формирующейся Солнечной системе. Тезисы докладов на Международной конференции "Современные проблемы теоретической астрономии" (20-24 июня, 1994, С.-Петербург) / Ред. А.Г. Сокольский. 1994. С. 33-35.

253. Ipatov S.I. Migration of small bodies in the Solar system, Abstracts of the Intern. Conference "Small bodies in the Solar system and their interactions with the planets" (August 8-12, 1994, Mariehamn, Finland), 1994, p. 69.

254. Ipatov S.I. Migration of celestial bodies and formation of planets, Abstracts of the 20th Intern. Meeting on comparative planetology (October 10-12, 1994, Moscow), 1994, pp. 31-32.

255. Ipatov S.I. Migration of small bodies to the Earth, Abstracts of 26th Lunar and Planetary Science Conference (March 13-17, 1995, Houston, USA), 1995, pp. 655-656. <http://adsabs.harvard.edu/full/1995LPI....26..655I>, <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYTCAAAAAABTaFWEv6QULhXVvi8W2vyhA?e=hDgcB7>

256. Ipatov S.I. Migration of icy bodies in the Solar System, Abstr. of the Symposium "Solar System Ices" (March 27-30, 1995, Toulouse, France), 1995, p. 58.

257. Ipatov S.I., Migration of small bodies to the Earth, Abstracts of the XX General Assembly of the European Geophysical Society (April 3-7, 1995, Hamburg, Germany). *Annales Geophysicae*, Supplement of vol. 13. 1995.

258. Ипатов С.И., Ивашкин В.В. Возможные источники и механизмы пополнения семейства небесных тел, сближающихся с Землей. Тезисы докладов на Комплексной конференции с международным участием "Астероидная опасность-95" (23-25 мая, 1995, Санкт-Петербург). 1995. Т. 2. С. 55-56.

259. Ipatov S.I. Migration of celestial bodies in the Solar System, Abstr. of IAU Symposium 172

- "Dynamics, ephemerides and astrometry in the Solar System" (July 3-8, 1995, Paris, France), 1995, p. 21-22. [ftp://ftp.imcce.fr/pub/colloquia/IAU95/abstracts/Ipatov.tex](http://ftp.imcce.fr/pub/colloquia/IAU95/abstracts/Ipatov.tex).
http://www.imcce.fr/fr/publications/colloque_sympo/SYMP172/abs.php.
260. Ipatov S.I. Sources of near-Earth objects, Abstracts of the conference "Tunguska-95" (July 18-24, 1995, Moscow-Tomsk-Vanavara, USSR), 1995.
261. Ipatov S.I. Migration of small bodies to Earth from the beyond-Neptune and asteroid belts, Abstr. of Intern. Conference "Asteroids, comets, meteors 1996" (July 8-12, 1996, Versailles, France), 1996, p. 19.
262. Ipatov S.I., Henrard J. Orbital evolution at the 2:3 resonance with Neptune, Abstr. of Intern. Conference "Asteroids, comets, meteors 1996" (July 8-12, 1996, Versailles, France), 1996, p. 88.
263. Ipatov S.I. Migration of small bodies to Earth from the Kuiper belt, Abstr. of Intern. Workshop "Tunguska96" (July 15-17, 1996, Bologna, Italy), 1996, p. 30.
264. Ipatov S.I. Migration of small bodies to Earth from the beyond-Neptune belt, Abstr. of Intern. Conference "Asteroid hazard-96" (July 15-19, 1996, St. Petersburg, Russia), 1996, pp. 59-61.
265. Ипатов С.И. Миграция небесных тел в Солнечной системе. Тезисы докладов на *Втором симпозиуме по классической и небесной механике* (23-27 августа 1996 г., Великие Луки). 1996. С. 35-37.
266. Ipatov S.I. Migration of small bodies to the Earth's orbit from the Kuiper belt, Abstracts of *28th Lunar and Planetary Science Conference* (March 17-21, 1997, Houston, USA), 1997, pp. 615-616. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc97/pdf/1106.PDF>.
267. Ipatov S.I. Mutual gravitational influence of beyond-Neptune bodies, Abstracts of *28th Lunar and Planetary Science Conference* (March 17-21, 1997, Houston, USA), 1997, pp. 617-618. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc97/pdf/1588.PDF>.
268. Ipatov S.I., Hahn G.J. Evolution of the orbits of the objects P/1996 R2 (Lagerkvist) and P/1996 N2 (Elst-Pizarro), Abstracts of *28th Lunar and Planetary Science Conference* (March 17-21, 1997, Houston, USA), 1997, pp. 619-620. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc97/pdf/1590.PDF>. (Here: .PDF not .pdf).
269. Ipatov S.I., Henrard J. Evolution of orbits at the 2:3 resonance with Neptune, Abstracts of *28th Lunar and Planetary Science Conference* (March 17-21, 1997, Houston, USA), 1997, p. 621. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc97/pdf/1186.PDF>.
270. Ипатов С.И., Хан Г.Д. Эволюция орбит объектов P/1996 R2 и P/1996 N2. Тезисы всероссийской конференции (с международным участием) "Проблемы небесной механики" (С.-Петербург, 3-6 июня 1997). ИТА РАН. С.-Петербург. 1997. С. 92-95.
271. Ipatov S.I., Hahn G.J. Migration of Kuiper-belt objects inside the solar system, Abstracts of *9th Rencontres de Blois* (June 22-28, 1997) "Planetary systems: the long view", 1997, pp. 35-36.
272. Ipatov S.I. Migration of celestial bodies in the forming solar system, Abstracts of *9th Rencontres de Blois* (June 22-28, 1997) "Planetary systems: the long view", 1997, p. 50.
273. Ipatov S.I., Hahn G.J. Orbital evolution of the objects P/1996 R2 (Lagerkvist) and P/1996 N2 (Elst-Pizarro), Abstracts of *9th Rencontres de Blois* (June 22-28, 1997) "Planetary systems: the long view", 1997, pp. 53-54.
274. Ipatov S.I. Migration of objects to the Earth from the Edgeworth-Kuiper belt, Abstracts of *Joint European and National Astronomical Meeting for 1997 JENAM-97* (2-5 July 1997, Thessaloniki, Greece), 1997, p. 10. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997jena.confE..10I/abstract>.
275. Ipatov S.I. Migration of small bodies from the Kuiper belt, Abstracts of the *23th General Assembly of the IAU*, Joint Discussion 6 (Interaction between planets and small bodies), 22-23 August 1997, Kyoto, Japan, 1997. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997IAUJD...6E..15I/abstract> (only in electronic form).
276. Ipatov S.I. Migration of small bodies to Earth, Abstracts of *Joint discussion on comets and minor planets with Japanese amateur astronomers* (August 29-31, 1997, Lake Biwa-Ko, Japan), 1997.
277. Ипатов С.И. Эволюция орбит планет. Тезисы межд. конференции "Результаты и перспективы исследования планет" (Ульяновск, 10-14 ноября 1997). 1997. С. 15-17. Ipatov S.I. Orbital evolution of planets, Abstracts of the international conference "Results and perspectives of investigations of planets: new models and informational technologies" (November 10-14, 1997, Ulyanovsk, Russia), pp. 16-17.
278. Ипатов С.И. Взаимное гравитационное влияние тел занептунного пояса. Тезисы Всероссийской научной конференции "Новые теоретические результаты и практические задачи небесной механики" (Москва, 2-4 декабря 1997 г.). 1997. С. 45-46.

279. Ipatov S.I. Migration of bodies to the Earth from the asteroid and Edgeworth-Kuiper belts, Abstracts of the *XXIII General Assembly of European Geophysical Society* (April 20-24, 1998, Nice, France), *Annales Geophysicae*, Part 3. Space and Planetary Sciences. 1998, Supplement 3 to vol. 16. p. 1043.
280. Ипатов С.И. Миграция малых тел к Земле из транснептунового пояса. Тезисы международной научной конференции "90 лет тунгусской проблеме" (30 июня - 2 июля 1998, Красноярск-Ванавара). 1998. С. 25. Ipatov S.I. Migration of small bodies to the Earth from the trans-Neptunian belt. Abstr. of the Third international conference "90 years of Tunguska problem" (June 30 - July 2, 1998, Krasnoyarsk-Vanavara), p. 25 (1998). <http://omzg.sssc.ru/TUNGUSKA/en/newse/abstracts/ipat.htm>.
281. Ipatov S.I. Dynamics of trans-Neptunian objects. Abstracts of the IAU colloquium N 172 "The impact of modern dynamics in astronomy" (July 6-11, 1998, Namur, Belgium), 1998, pp. 56-57. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999imda.coll..107I/abstract>.
282. Ипатов С.И. Формирование и эволюция транснептунового пояса. Тезисы третьего международного симпозиума по классической и небесной механике (23-28 августа 1998, Великие Луки). 1998. С. 75-77.
283. Ipatov S.I. Migration of Edgeworth-Kuiper belt objects to the Earth. Abstracts of *ESO workshop on minor bodies in the outer Solar System* (November 2-5, 1998, Garching, Germany), www.eso.org/gen-fac/meetings/mboss98/abstract.ps. 1998, p. 21.
284. Ipatov S.I., Mardon A.A. Delivery of meteorites to the Earth from the Edgeworth-Kuiper belt. Abstracts of *30th Lunar and Planetary Science Conference* (March 15-19, 1999, Houston, USA), CD-ROM. 1999. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/LPSC99/pdf/1147.pdf>.
285. Ipatov S.I. Formation of the Edgeworth-Kuiper belt and migration of trans-Neptunian objects to the Earth. Abstracts of the conference "Asteroids, Comets, Meteors" (July 26-30, 1999, Cornell University, USA), 1999, pp. 132-133.
286. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian objects and their migration to the Earth. Abstracts of the international conference "Comets, asteroids, meteors, meteorites, astroblems, craters" "CAMMAC-99" (September 26 - October 1, 1999, Vinnitsa, Ukraine), ed. Churuymov, 1999, p. 21.
287. Elst E.W., **Ipatov S.**, Ticha J., Tichy M., Blythe M., Shelly F., Bezpalko M., Elowitz M., Huber R., Stuart J., Viggh H., Sayer R., Durig D.T., Marsden B.G. Comet C/1999 T3 (LINEAR). *Minor Planet Electronic Circ.*, 1999, 1999-U27. October 1999. <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpec/J99/J99U27.html>.
288. Elst E.W., **Ipatov S.**, Ticha J., Tichy M., Durig D. Comet C/1999 T3 (LINEAR). *IAU Circ.*, 1999, 7289, 1. <http://cfa-www.harvard.edu/iauc/07200/07289.html#Item1>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999IAUC.7289....1E/abstract>.
289. Ипатов С.И. Миграция транснептуновых тел к Земле. Тезисы конф. "Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы" (25-29 октября 1999, Обнинск), 1999, с. 27. Ipatov S.I. Migration of trans-Neptunian objects to the Earth. Abstr. of the conference "Near-Earth astronomy and problems of investigations of small bodies in the Solar System" (October 25-29, 1999, Obninsk), p. 27.
290. Ipatov S.I. Migration of matter from the Edgeworth-Kuiper belt to the Earth. Abstracts of IAU Colloquium No 181 and COSPAR Colloquium No. 11 "Dust in the solar system and other planetary systems" (April 10-14, 2000, Canterbury, UK), 2000, p. 68.
291. Ipatov S.I. Migration of trans-Neptunian bodies to Earth. Abstracts of the *XXV General Assembly of European Geophysical Society* (April 25-29, 2000, Nice, France), CD-ROM, 2000.
292. Ipatov S.I. Safronov's mass of a protoplanet cloud. Abstracts of the *XXV General Assembly of European Geophysical Society* (April 25-29, 2000, Nice, France), CD-ROM, 2000.
293. Ipatov S.I. Migration of small bodies from the main asteroid and Edgeworth-Kuiper belts, Abstracts of *JENAM-2000* (May 29-June 3, 2000, Moscow), 2000, p. 162.
294. Ипатов С.И. Миграция небесных тел к Земле из транснептунового и астероидного поясов. Тезисы конференции "Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге века" (19-24 июня 2000, Санкт-Петербург), 2000. С. 292-293.
295. Ipatov S.I. Migration of trans-Neptunian bodies to Earth, Abstr. of *US-European celestial mechanics workshop* (July 3-7, 2000, Poznan, Poland), http://www.astro.amu.edu.pl/Science/Conference/pdf/ipatov_r.pdf, 2000.
296. Ipatov S.I. Comet hazard to the Earth, Abstracts of *33rd COSPAR Scientific Assembly* (July 16-23, 2000, Warsaw, Poland), CD-ROM, 2000.

297. Ipatov S.I. Evolution of the Edgeworth-Kuiper belt, Abstracts of the 24th General Assembly of the IAU (August 7-18, 2000, Manchester, UK), <http://www.jb.man.ac.uk/~abstract/abstracts/JD4P.html#abstract8p>, 2000, p. 156. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000IAUJD...4E..28I/abstract>.
298. Ipatov S.I. Migration of bodies during planet formation, Abstracts of the 24th General Assembly of the IAU (August 7-18, 2000, Manchester, UK), <http://ast.star.rl.ac.uk/symp202/posters/ipatov.html>, 2000, p. 45.
299. Ипатов С.И. Миграция объектов Тунгусского типа из транснептунового пояса к Земле. Тезисы Третьего международного аэрокосмического конгресса (23-27 августа 2000 г., Москва), 2000, с. 299-300. Ipatov S.I., Migration of Tunguska-type objects from the trans-Neptunian belt to the Earth, Abstracts of the Symposium on small satellites (August 23-27, 2000, Third International Aerospace Congress, Moscow), floppy disk (pp. 299-300 for Russian text).
300. Ipatov S.I. Evolution of the Edgeworth-Kuiper belt and migration of its bodies inside the Solar System, Abstracts of the international conference "The Forth Vsekhsvyatsky Readings. Modern problems of physics and dynamics of the Solar System" (October 5-9, 2000, Kyiv, Ukraine), ed. K.I. Churyumov, 2000, pp. 20-21.
301. Ипатов С.И. Миграция транснептуновых тел к Земле. Тезисы конференции "Новые результаты аналитической и качественной небесной механики" (5-6 декабря 2000, ГАИШ, Москва), 2000, С. 42. <http://www.sai.msu.ru/neb/rw/confer/ipatov.htm>.
302. Ipatov S.I., Mardon A.A. Delivery of trans-Neptunian objects to the Earth. Abstracts of Near-Earth asteroid sample return workshop (December 11-12, 2000, LPI, Houston, USA), 2000, p. 21, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/asteroid2000/pdf/8004.pdf>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000neas.work...21I/abstract>.
303. Mardon A.A., **Ipatov S.I.** Impact threat from the source of Edgeworth-Kuiper belt, *Teaching of Astronomy in Asian-Pacific Region*. Bulletin No. 17. Mitaka Tokyo Japan, 2001, 2001.01.30, pp. 61-62.
304. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian objects. Abstracts of 32th Lunar and Planetary Science Conference (March 12-16, 2001, Houston, USA), 2001, #1165, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2001/pdf/1165.pdf>.
305. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian objects. Abstracts of the XXVI General Assembly of European Geophysical Society (March 25-30, 2001, Nice, France), CD-ROM, <http://www.copernicus.org/EGS/egsga/nice01/programme/abstracts/aai4551.pdf>, 2001.
306. Ипатов С.И. Миграция транснептуновых тел к Земле, Тезисы конференции "Околоземная астрономия XXI века" (научные и практические аспекты). (21-25 мая 2001 г., Звенигород), 2001. С. 79-80.
307. Marov M.Ya., Ipatov S.I. Asteroids migration: Role in the inner planets evolution. Abstracts of the conference "Asteroids 2001: From Piazzini to the 3rd Millennium" (June 11-16, 2001, Santa Flavia, Palermo, Italy), 2001, p. 215. (IV.13). www.astropa.unipa.it/Asteroids2001/Abstracts/Posters/marov.doc.
308. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian objects and asteroids. Abstracts of the conference "Asteroids 2001: From Piazzini to the 3rd Millennium" (June 11-16, 2001, Santa Flavia, Palermo, Italy), 2001, pp. 307-308 (VIII.7). www.astropa.unipa.it/Asteroids2001/Abstracts/Posters/ipatov.doc.
309. Ипатов С.И. Формирование и эволюция транснептунового пояса. Тезисы Всероссийской астрономической конференции, Санкт-Петербург, 6-12 августа 2001 г. 2001. С. 77-78.
310. Ipatov S.I. Migration of bodies from the trans-Neptunian belt. Abstr. of the Forth international conference on classical and celestial mechanics (August 15-20, 2001, V. Luki, Russia), 2001, p. 75 (English text), pp. 73-74 (Russian text). Ипатов С.И. Миграция небесных тел из транснептунового пояса. Тезисы Четвертого международного симпозиума по классической и небесной механике (15-20 августа 2001 г., Великие Луки), 2001.
311. Ипатов С.И. Миграция небесных тел к Земле из транснептунового и астероидного поясов, Тезисы VIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике (23-29 августа 2001 г., Пермь), Екатеринбург. УрО. РАН, 2001. С. 296.
312. Ozernoy L.M., **Ipatov S.I.** Evolution of the Edgeworth-Kuiper belt and kuiperoidal dust, Abstracts of JENAM-2001 (September 10-15, 2001, Munich, Germany), Astronomische Gesellschaft, Abstract Series 18, 2001, abstract #P40, p. 155. www.ari.uni-heidelberg.de/AG/aga18.ps. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001AGM....18..P40O/abstract>.
313. Ipatov S.I., Mardon A.A. Delivery of material from a trans-Neptunian region to the Earth, abstracts of 64th Annual meeting of meteoritical society (Vatican, September 10-14, 2001), *Meteoritics &*

- Planetary Science*, 2001, vol. 36, Supplement, p. A86.
<http://adsabs.harvard.edu/full/2001M%26PSA..36S..86I>.
<https://www.lpi.usra.edu/meetings/metsoc2001/pdf/5209.pdf>
314. Ozernoy L.M., **Ipatov S.I.** Origins of water on Mars, Earth, and Venus: Evaluating the supply from the outer Solar system, Abstracts of the 199th Meeting of the American Astronomical Society (6-10 January 2002, Washington, DC, USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2001, v. 33, N 4, pp. 1352-1353. <http://www.aas.org/publications/baas/v33n4/aas199/261.htm>.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001AAS...199.2806O/abstract>.
315. Ipatov S.I., Ozernoy L.M. Characteristic times elapsed up to collisions of minor bodies with planets, Abstracts of the 199th Meeting of the American Astronomical Society (6-10 January 2002, Washington, DC, USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2001, v. 33, N 4, p. 1352. <http://www.aas.org/publications/baas/v33n4/aas199/262.htm>.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001AAS...199.2803I/abstract>.
316. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of trans-Neptunian objects to a near-Earth space. Abstracts of workshop "From here to Pluto-Charon: The new horizons Pluto-Kuiper Belt mission" (20-21 May, 2002, Boulder, Colorado, USA), 2002.
317. Емельяненко В.В., **Ипатов С.И.** Миграция небесных тел из различных областей Солнечной системы в околоземное пространство. Тезисы конференции «Международное сотрудничество в области астрономии» в рамках VI съезда АстрО (25 мая – 2 июня 2002, Москва), 2002. С. 26-27.
318. Ipatov S.I., Mather J.C. Orbital evolution of Jupiter-family comets. Abstracts of the 200th Meeting of the American Astronomical Society (2-6 June 2002, Albuquerque, NM, USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2002, v. 34, n 2, p. 783. <http://www.aas.org/publications/baas/v34n2/aas200/296.htm>.
319. Ipatov S.I. Formation and migration of trans-Neptunian objects. Abstracts of international conference "Scientific Frontiers in Research of Extrasolar Planets" (18-21 June 2002, Washington D.C., USA), 2002, p. 44.
320. Ipatov S.I. Formation and migration of trans-Neptunian objects and asteroids. Abstracts of the conference "Asteroids, comets, meteors, 2002" (July 29 - August 2, 2002, Berlin), 2002, p. 58, #05-26p, <http://berlinadmin.dlr.de/SGF/acm2002>.
321. Ipatov S.I. Orbital evolution of Jupiter-crossers and asteroids, Abstracts of the conference "Current status and perspectives of international researches in observational astronomy, ecology, and extreme physiology in the Elbrus region (ASTROECO-2002)" (12-16 August, 2002, Terskol, Russia), 2002.
322. Ipatov S.I., Mather J.C. Decoupling comets from Jupiter, Abstracts of JENAM 2002 "The Unsolved Universe: Challenges for the Future" (2-7 September 2002, Porto, Portugal), 2002.
323. Ipatov S.I. Formation and migration of trans-Neptunian objects. IAA Transactions. No 8. Celestial Mechanics. – St. Petersburg: Inst. Appl. Astron. of Russian Acad. of Sciences, Abstracts of the Conference "Celestial Mechanics -2002: Results and Prospects" (10-14 September 2002, St. Petersburg, Russia, Institute of Applied Astronomy of Russian Academy of Sciences), 2002, pp. 86-87, <http://arXiv.org/format/astro-ph/0205307>. <http://iaaras.ru/library/paper/332>.
324. Ipatov S.I. Migration of asteroids from the 3/1 and 5/2 resonances with Jupiter to the Earth. IAA Transactions. No 8. Celestial Mechanics. – St. Petersburg: Inst. Appl. Astron. of Russian Acad. of Sciences, Abstracts of the Conference "Celestial Mechanics -2002: Results and Prospects" (10-14 September 2002, St. Petersburg, Russia, Institute of Applied Astronomy of Russian Academy of Sciences), 2002, pp. 88-89, <http://arXiv.org/format/astro-ph/0205309>. <http://iaaras.ru/library/paper/333>.
325. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of comets to near-Earth orbits, Abstracts of the 34th annual meeting of the Division of Planetary Sciences of AAS (6-11 October 2002, Birmingham, USA). ID 188. *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2002, v. 34, N 3, pp. 887-888, #27.10, <http://www.aas.org/publications/baas/v34n3/dps2002/188.htm>.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002DPS....34.2710I/abstract>.
326. Marov M.Ya., Ipatov S.I. Volatiles inventory from planetesimals and trans-Neptunian objects: An Estimate, Abstracts of the 34th annual meeting of the Division of Planetary Sciences of AAS (6-11 October 2002, Birmingham, USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2002, v. 34, N 3, p. 891, #28.12, <http://www.aas.org/publications/baas/v34n3/dps2002/164.htm>.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002DPS....34.2812M/abstract>.
327. Ipatov S.I., Mather J.C. Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets. Abstracts of 34th

Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR) at the 2nd World Space Congress (10-19 October 2002, Houston, Texas, USA) (ID Nr: COSPAR02-A-00845), CD-ROM, <http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR02/00845/COSPAR02-A-00845.pdf>. 2002.

328. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets, Abstracts of the international scientific workshop on the "*First Decadal Review of the Edgeworth-Kuiper Belt - Towards New Frontiers*" (11-14 March 2003, Antofagasta, Chile, 2003).

329. Ipatov S.I. and Mather J.C. Decoupling of Jupiter-family comets, Abstracts of AAS Division on Dynamical Astronomy (4-7 May 2003, Cornell University, Ithaca, NY, USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, v. 35, N 4, p. 1034, #2.05, 2003. <http://www.aas.org/publications/baas/v35n4/dda2003/27.htm>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003DDA....34.0205I/abstract>.

330. Ipatov S.I., Mather J.C., Taylor P. Migration of asteroidal dust particles, Abstracts of AAS Division on Dynamical Astronomy (4-7 May 2003, Cornell University, Ithaca, NY, USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2003, v. 35, N 4, p. 1037, #6.06. (<http://www.aas.org/publications/baas/v35n4/dda2003/38.htm>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003DDA....34.0606I/abstract>.

331. Ipatov S.I., Mather J.C., Taylor P. Migration of dust in the solar system, Abstracts of the *Astrophysics of Dust Symposium* (26-30 May 2003, Estes Park, Colorado, USA), 2003, P.2.23. id 101. <http://www.physics.utoledo.edu/~aod03/abs.html>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003asdu.confE.101I/abstract>.

332. Ipatov S.I. Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets, Abstracts of the *Fourth International Aerospace Congress* (18-23 August, 2003, Moscow), Symposium on small satellites, Russia. Moscow: SIP RIA, 2003, 473-474 (in English), 471-472 (in Russian).

333. Ipatov S.I., Mather J.C. Extinct comets in near-Earth object orbits, Abstracts of the *35th annual meeting of the Division of Planetary Sciences of AAS* (2-6 September 2003, Monterey, CA, USA). *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2003, v. 35, N 4, p. 974-975, #33.04. <http://www.aas.org/publications/baas/v35n4/dps2003/54.htm>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003DPS....35.3304I/abstract>.

334. Ipatov S.I. Former comets in near-Earth object orbits, Abstracts of the Conference "*Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds*" (September 22-25, 2003, Institute of applied astronomy, Saint-Petersburg, Russia), 2003, p. 31.

335. Ipatov S.I. Migration of interplanetary dust, Abstracts of the Conference "*Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds*" (September 22-25, 2003, Institute of applied astronomy, Saint-Petersburg, Russia), 2003, p. 32.

336. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian objects, Abstracts of the *203th Meeting of the American Astronomical Society* (4-8 January 2004, Atlanta, USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2003, v. 35, N 5, #15.06. <http://www.aas.org/publications/baas/v35n5/aas203/818.htm>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003AAS...203.1506I/abstract>.

337. Marov M.Ya., **Ipatov S.I.** Volatiles inventory to the inner planets due to small bodies migration, Abstracts of *34th Lunar and Planetary Science Conference* (March 17-21, 2003, League City, TX, USA), CD-ROM, 2003, #1099, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2003/pdf/1099.pdf>.

338. Ipatov S.I., Mather J.C., Taylor P. Migration of asteroidal dust, Abstracts of *34th Lunar and Planetary Science Conference* (March 17-21, 2003, League City, TX, USA), CD-ROM, 2003, #1501, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2003/pdf/1501.pdf>.

339. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of dust particles from Comet 2P Encke, Abstracts of *workshop on cometary dust in astrophysics* (Crystal Mountain, Washington, August 10-15, 2003), 2003, N 6039. <https://www.lpi.usra.edu/meetings/stardust2003/pdf/6039.pdf>.

340. Ipatov S.I. Formation and migration of trans-Neptunian objects and asteroids, Abstracts of mini-symposium "*Dynamics of formation, evolution and stability of planetary systems*" at *JENAM-2003* (25-30 August 2003, Budapest, Hungary), 2003.

341. Ipatov S.I. Migration of trans-Neptunian objects to the Earth, Abstracts of the international conference "*Near-Earth Astronomy – 2003*" (NEA-2003) (9-14 September, 2003, Terskol, Russia), 2003, p. 17, http://www.inasan.rssi.ru/rus/conferences/OZA_2003/.

342. Ipatov S.I. Migration of dust to the near-Earth space, Abstracts of the international conference "*Near-Earth Astronomy – 2003*" (NEA-2003) (9-14 September, 2003, Terskol, Russia), 2003, p. 19, http://www.inasan.rssi.ru/rus/conferences/OZA_2003/.

343. Marov M.Ya., **Ipatov S.I.** Migration processes and volatiles inventory to the inner planets, Abstracts of 35th Lunar and Planetary Science Conference (March 15-19, 2004, League City, TX, USA), 2004, #1410, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/1410.pdf>.
344. Ipatov S.I., Mather J.C., Guillory J.U. Migration of dust particles and their collisions with the terrestrial planets, Abstracts of 35th Lunar and Planetary Science Conference (March 15-19, 2004, League City, TX, USA), 2004, #1446, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/1446.pdf>.
345. Ipatov S.I., Mather J.C., Guillory J.U. Migration of interplanetary dust particles, Abstracts of 35th Meeting of the AAS Division on Dynamical Astronomy (April 20-23, 2004, Cannes, France), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2004, v. 36, N 2, #05.06. p. 856. Also pp. 15-16 in the abstracts of the conference. <http://www.aas.org/publications/baas/v36n2/dda04/50.htm>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004DDA....35.0506I/abstract>.
346. Ipatov S.I., Mather J.C. Orbital evolution of Jupiter-family comets, Abstracts of 35th Meeting of the AAS Division on Dynamical Astronomy (April 20-23, 2004, Cannes, France), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2004, v. 36, N 2, #7.07, p. 860. Also p. 25 in the abstracts of the conference. <http://www.aas.org/publications/baas/v36n2/dda04/65.htm>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004DDA....35.0707I/abstract>.
347. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of comets and asteroids to near-Earth space, Abstracts of 1st General Assembly of European Geosciences Union (Nice, France, 25-30 April 2004), 2004, ID-NR: EGU04-A-02392.
348. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of small bodies and dust to near-Earth space, Abstracts of 35th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR) (Paris, France, July 18-25 2004), 2004, Abstract-Nr. COSPAR04-A-01012, CD-ROM, <http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR04/01012/COSPAR04-A-01012.pdf>. http://crd1x1.yerphi.am/CONFERENCES/CONFERENCEPAPERS/documents/data/B0.2_C02.3-0002-04.html. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004cosp...35.1012I/abstract>.
349. Ipatov S.I. Formation and migration of trans-Neptunian objects, Abstracts of the second TPF/Darwin international conference "Dust disks and the formation, evolution and detection of habitable planets" (Mission Bay, San Diego, California, July 26-29, 2004). 2004. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004tpf..conf...45I/abstract>. <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0401279>.
350. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of small bodies and dust to terrestrial planets, Abstracts of the IAU Colloq. N 197 "Dynamics of populations of planetary systems" (Belgrade, Serbia and Montenegro, 31 August – 4 September, 2004), 2004, p. 48.
351. Ipatov S.I., Kutyrev A., Madsen G.J., Mather J.C., Moseley S.H., Reynolds R.J. Dynamical Zodiacal cloud models constrained by high resolution spectroscopy of the Zodiacal light, Abstracts of the 36th annual meeting of the Division of Planetary Sciences of AAS (8-12 November 2004, Louisville, Kentucky, USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2004, v. 36, N 4, #34.14. p. 1150. <http://www.aas.org/publications/baas/v36n4/dps2004/82.htm>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004DPS....36.3414I/abstract>.
352. Ipatov S.I., Kutyrev A., Madsen G.J., Mather J.C., Moseley S.H., Reynolds R.J. Dynamical Zodiacal cloud models constrained by high resolution spectroscopy of the Zodiacal light, Abstracts of 36th Lunar and Planetary Science Conference (March 14-18, 2005, League City, TX, USA), 2005, #1266, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2005/pdf/1266.pdf>.
353. Marov M.Ya., **Ipatov S.I.** Migration of dust particles and volatiles delivery to the inner planets, Abstracts of 36th Lunar and Planetary Science Conference (March 14-18, 2005, League City, TX, USA), 2005, #1268, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2005/pdf/1268.pdf>.
354. Ipatov S.I., Kutyrev A., Madsen G.J., Mather J.C., Moseley S.H., Reynolds R.J. Velocities of zodiacal dust particles, late abstracts of AAS 206 Meeting (29 May - 2 June 2005, Minneapolis, Minnesota USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2005, v. 37, #34.08, p. 791. #449. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005AAS...206.3408I/abstract>.
355. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of interplanetary dust and small bodies, Abstracts of the IAU Symposium 229 "Asteroids, Comets, Meteors – 2005" (7-12 August 2005, Buzios, Rio de Janeiro, Brazil), 2005, p. 25. <http://www.on.br/acm2005/visualiza-abstract.php?acao=Migration+of+interplanetary+dust+and+small+bodies>.
356. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Automatic recognition of cosmic rays at Deep Impact CCDs, Abstracts of the IAU Symposium 229 "Asteroids, Comets, Meteors – 2005" (7-12 August 2005, Buzios, Rio de Janeiro, Brazil), 2005, p. 11-12. <http://www.on.br/acm2005/visualiza-abstract.php?acao=Automatic+recognition+of+cosmic+rays+at+Deep+Impact+CCDs>.

357. Ipatov S.I., Mather J.C. Dynamics and distribution of interplanetary dust, abstracts of 37th DPS Meeting and 31st HAD Meeting (September 4-9, 2005, Cambridge, UK), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2005, v. 37, N 3, #17.04, p. 649. #262. <http://www.aas.org/publications/baas/v37n3/dps2005/262.htm>.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005DPS....37.1704I/abstract>.
358. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of dust particles to the terrestrial planets, Abstracts of the conference “*Dust in Planetary Systems*” (September 26-30, 2005, Kaua'i, Hawaii, USA), 2005, p. 71-72, <http://www.lpi.usra/meetings/dust2005/pdf/4049.pdf>.
359. Madsen G.J., Reynolds R.J., **Ipatov S.I.**, Kutyrev A., Mather J.C., Moseley S.H. New observations of the kinematics of the zodiacal dust cloud, Abstracts of the conference “*Dust in Planetary Systems*” (September 26-30, 2005, Kaua'i, Hawaii, USA), 2005, p. 111-112, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/dust2005/pdf/4072.pdf>.
360. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian objects, Abstracts of the conference “*Protostars and planets V*” (October 24-28, 2005, Hilton Waikoloa Village, The Big Island, Hawaii, USA), CD-ROM, Contribution No. 1286, 2005, p. 8054, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/ppv2005/pdf/8054.pdf>.
361. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Automatic recognition of cosmic rays at Deep Impact CCDs, Abstracts of the AAS 207 Meeting (8-12 January 2006, Washington, DC, USA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, v. 37 (#867), #154.08, 2005, p. 1415. <http://www.aas.org/publications/baas/v37n4/aas207/867.htm>.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005AAS...20715408I/abstract>.
362. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Velocities of material ejected from comet Tempel 1, Abstracts of 37th Lunar and Planetary Science Conference (March 13-17, 2006, League City, TX, USA), 2006, #1462, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2006/pdf/1462.pdf>.
363. Ipatov S.I., Kutyrev A., Madsen G.J., Mather J.C., Moseley S.H., Reynolds R.J. Dynamical zodiacal cloud models, Abstracts of 37th Lunar and Planetary Science Conference (March 13-17, 2006, League City, TX, USA), 2006, #1471, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2006/pdf/1471.pdf>.
364. Ipatov S.I., Marov M.Ya., Mather J.C. Delivery of volatiles to the terrestrial planets, Abstracts of the Astrobiology Science Conference 2006 (March 26-30, 2006, Washington, D.C.), *Astrobiology*, 2006, v. 6, N 1, p. 241; <http://abscicon2006.arc.nasa.gov/abstract/id/421.doc>.
365. Ipatov S.I., Mather J.C. Probabilities of collisions of Jupiter-family comets with the terrestrial planets, *First International Conference on Impact Cratering in the Solar System* (ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, May 08-12, 2006), 2006. http://www.rssd.esa.int/SYS/docs/II_transfers/295234_ipatov.pdf.
366. Ipatov S.I. [misprinted as Sergei, I.I.], Mather J.C., Marov M.Ya. Migration of icy bodies to the terrestrial planets, 2006 Joint Assembly (a partnership between AGU, GS, MAS, MSA, SEG, and UGM; May 23-26, 2006, Baltimore, Maryland, USA), 2006, <http://www.agu.org/meetings/ja06/> [use SERGEI as author] (2006). *Eos Trans. AGU*, 87(36), Jt. Assem. Suppl., Abstract P32A-07.
367. Ipatov S.I., Mather J.C. Dynamic of interplanetary dust and comets, Abstracts of 36th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR) (July 16-23, 2006, Beijing, China), 2006, (ID Nr: COSPAR2006-A-00458) <http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR2006/00458/COSPAR2006-A-00458-1.pdf>.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006cosp...36..458I/abstract>.
368. Ipatov S.I. A'Hearn M.F., Klaasen K.P., Desnoyer M., Lindler D. Automatic recognition and removal of cosmic rays at Deep Impact CCDs, Abstracts of 36th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR) (July 16-23, 2006, Beijing, China) 2006, (ID Nr: COSPAR2006-A-00459) <http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR2006/00459/COSPAR2006-A-00459-3.pdf>.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006cosp...36..459I/abstract>.
369. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Velocities of material ejected from comet Temple 1, Abstracts of 36th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR) (July 16-23, 2006, Beijing, China), 2006, (ID Nr: COSPAR2006-A-00460) <http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR2006/00460/COSPAR2006-A-00460-1.pdf>.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006cosp...36..460I/abstract>.
370. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of comets into NEO orbits and probabilities of their collisions with the terrestrial planets, Abstracts of 26th IAU General Assembly (August 14-25, 2006, Prague, Czech Republic; session S236), 2006, #0361; Abstract No.: S236-56, p. 90.
371. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Velocities of dust particles ejected from comet Tempel 1, Abstracts of 26th IAU General Assembly (August 14-25, 2006, Prague, Czech Republic; JD10) #0362; 2006,

- Abstract No.: JD10-19, p. 348. <http://www.astronomy2006.com/list-of-registered-abstracts.php?event=jd10>.
372. Ipatov S.I., A'Hearn M.F., Klaasen K.P., Desnoyer M., Lindler D. Automatic Removal of Cosmic Rays on Deep Impact CCDs, Abstracts of 26th IAU General Assembly (August 14-25, 2006, Prague, Czech Republic; JD10) #0364; 2006, Abstract No.: JD10-16, p. 348. <http://www.astronomy2006.com/list-of-registered-abstracts.php?event=jd10>, <http://www.ppt2txt.com/r/1dc4448b/>.
373. Marov M.Ya., Ipatov S.I. Volatiles Delivery to the Terrestrial Planets, Abstracts of 26th IAU General Assembly (August 14-25, 2006, Prague, Czech Republic; JD11) #0365, 2006, Abstract No.: JD11-24, p. 359. <http://www.astronomy2006.com/list-of-registered-abstracts.php?event=jd11>.
374. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of Interplanetary Dust and Comets, Abstracts of the European Planetary Science Congress 2006 (Berlin, Germany, September 18–22, 2006), 2006, p. 197, CD-ROM, EPSC2006-A-00197, <http://www.cosis.net/abstracts/EPSC2006/00197/EPSC2006-A-00197-1.pdf> or start from <http://meetings.copernicus.org/epsc2006/>.
375. Ipatov S.I., Kutyrev A., Madsen G.J., Mather J.C., Moseley S.H., Reynolds R.J., Computer simulations of spectrum of the zodiacal light. Abstracts of 38th DPS Meeting (October 8-13, 2006, Pasadena, CA), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2006, v. 38, N 3, p. 558. #41.02. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006DPS....38.4102I/abstract> . <https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMarDAAAAABG6PujDfoItrGWjZv9Nn62Q?e=kZ72qt>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006DPS....38.4102I/abstract>.
376. Ipatov S.I. Growth of eccentricities and inclinations of planetesimals due to their mutual gravitational influence, Abstracts of 38th Lunar and Planetary Science Conference (March 12-16, 2007, League City, TX, USA), 2007, #1260, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2007/pdf/1260.pdf>.
377. Ipatov S.I., Boss A.P., Myhill E.A. Triggering presolar cloud collapse and injection of short-lived radioisotopes by a supernova shock wave: adaptive mesh refinement calculations with the FLASH code, Abstracts of 38th Lunar and Planetary Science Conference (March 12-16, 2007, League City, TX, USA), 2007, #1018, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2007/pdf/1018.pdf>.
378. Ipatov S.I., Mather J.C. Sources of zodiacal dust particles, Abstracts of the European Planetary Science Congress 2007 (Potsdam, Germany, 19-24 August 2007), 2007, ID-NR: EPSC2007-A-00209. <http://www.cosis.net/abstracts/EPSC2007/00209/EPSC2007-J-00209.pdf>.
379. Ipatov S.I. Sources of zodiacal dust, Abstracts of the conference “Near-Earth astronomy-2007” (Terskol, Russia, 3-7 September 2007), 2007, p. 20. http://www.inasan.rssi.ru/rus/conferences/OZA_2007/Abstracts_sections.pdf.
380. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Velocities and relative amount of material ejected after the Deep Impact collision, abstracts of 39th DPS Meeting (October 7-12, 2007, Orlando, FL), 2007, id.21.01; *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 39, p. 449. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007DPS....39.2101I/abstract>
381. Marov M.Ya., **Ipatov S.I.** Volatiles and biogenic matter delivered by small bodies and dust particles, Abstracts of the II International Conference “Biosphere origin and evolution” (October 28 – November 2, 2007, Loutraki, Greece). 2007, KN-4. CD-ROM, P. 31-32. http://catalysis.ru/resources/institute/Publishing/Report/2007/015-2007-abstracts-BOE-2_Greece.pdf.
382. Boss A.P., **Ipatov S.I.**, Myhill E.A. Triggering presolar cloud collapse and injection of short-lived radioisotopes with an outflow from a massive star, Abstracts of *Workshop on The Chronology of Meteorites and the Early Solar System* (November 5-7, 2007, Kauai, HI, USA), LPI Contribution No. 1374, 2007, pp. 34-35, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/metchron2007/pdf/4004.pdf>.
383. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Velocities of material ejected after the Deep Impact collision, Abstracts of 39th Lunar and Planetary Science Conference (March 10-14, 2008, League City, Texas), 2008, #1024, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2008/pdf/1024.pdf>.
384. Ipatov S.I., Cho J.Y.-K. Synthetic spectra from a GCM simulation of a model exo-Earth, Abstracts of 39th Lunar and Planetary Science Conference (March 10-14, 2008, League City, Texas), 2008, # 2554, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2008/pdf/2554.pdf>.
385. Cho J., **Ipatov S.** Circulation, cloud, and spectra: a first look at a 3-D model exo-Earth, Abstracts of the General Assembly of European Geosciences Union (April 13-18, 2008, Vienna, Austria), session PS9: Extrasolar planets and planet formation session, Geophysical Research Abstracts, 2008, v. 10, ID-No.: EGU2008-A-11813. <http://www.cosis.net/abstracts/EGU2008/11813/EGU2008-A-11813.pdf>.

386. Ipatov S.I. Migration of comets into NEO orbits and probabilities of their collisions with the Earth, Abstracts of the international conference “100 years since Tunguska phenomenon: Past, present and future” (Moscow, Russia, June 26-28, 2008), 2008, p. 125 (English), p. 124 (Russian), http://smerdyachee.ucoz.ru/_ld/0/8_abstract_all.pdf. http://tunguska.sai.msu.ru/content/abstract_all.pdf.
387. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Velocities of material ejected from a comet at its collision with a celestial body, Abstracts of the conference “100 years since Tunguska phenomenon: Past, present and future” (Moscow, Russia, June 26-28, 2008), 2008, p. 127 (English), p. 126 (Russian). http://smerdyachee.ucoz.ru/_ld/0/8_abstract_all.pdf. http://tunguska.sai.msu.ru/content/abstract_all.pdf.
388. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Velocities and relative amounts of material ejected after the collision of DI impactor with comet 9P/Tempel 1, Abstracts of 10th conference “Asteroids, Comets, Meteors” (Baltimore, USA, July 14-18, 2008), 2008, paper id. 8102. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/acm2008/pdf/8102.pdf>.
389. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of migrating small bodies and dust particles with planets, Abstracts of 10th conference “Asteroids, Comets, Meteors” (Baltimore, USA, July 14-18, 2008), 2008, paper id. 8103. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/acm2008/pdf/8103.pdf>.
390. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Velocities and relative amount of material ejected from comet Tempel 1 after the Deep Impact collision, Abstracts of 37th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR) (Montréal, Canada, 13 - 20 July 2008), abstract ID is 2960, Paper number: B04-0052-08, 2008, p. 1323. <http://www.cospar-assembly.org/user/download.php?id=2960&type=abstract>. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008cosp...37.1323I>
391. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Rate of ejection and velocities of material ejected from comet Tempel 1 after the Deep Impact collision, abstracts of 40th DPS Meeting (October 10-15, 2008, Ithaca, NY), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2008, v. 40, #3, p. 388-389. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008DPS....40.0208I/abstract>.
392. Boss A.P., **Ipatov S.I.**, Keiser S.A., Myhill E.A., Vanhala H.A.T. Simultaneous triggered presolar cloud collapse and injection of short-lived radioisotopes by a supernova shock wave. Abstracts of 40th Lunar and Planetary Science Conference (March 23-27, 2009, The Woodlands, Texas), 2009, #1002, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/1002.pdf>.
393. Ipatov S.I. Formation of binaries at the stage of rarefied preplanetesimals, Abstracts of 40th Lunar and Planetary Science Conference (March 23-27, 2009, The Woodlands, Texas), 2009, # 1021, 2 pages. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/1021.pdf>.
394. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Deep Impact ejection from Comet Tempel 1 as a triggered outburst, Abstracts of 40th Lunar and Planetary Science Conference (March 23-27, 2009, The Woodlands, Texas), 2009, #1022, 2 pages. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/1022.pdf>.
395. Ipatov S.I. Formation of binaries at the stage of rarefied preplanetesimals, Abstracts of the General Assembly of European Geosciences Union (April 19-24, 2009, Vienna, Austria), session PS8: Extrasolar planets and planet formation session, *Geophysical Research Abstracts*, 2009, ID-No.: EGU2009-10080. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-10080.pdf>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009EGUGA..1110080I/abstract>, a poster.
396. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Ejection of material after the Deep Impact collision with Comet Tempel 1, abstracts of 40th DDA Meeting (May 2-5, 2009, Virginia Beach, VA, USA). *The Bulletin of the American Astronomical Society*, session 13, 2009, vol. 41, 13.01, p. 906. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009DDA....40.1301I/abstract>, an oral presentation, session 13.
397. Ipatov S.I. Formation of binaries at the stage of rarefied preplanetesimals, abstracts of 40th DDA Meeting (May 2-5, 2009, Virginia Beach, VA, USA). *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2009, vol. 41, 6.01, p. 898. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009DDA....40.0601I/abstract>, a poster.
398. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Deep Impact ejection from Comet 9P/Tempel 1 as a triggered outburst, Abstracts of 27th IAU General Assembly (August 3-14, 2009, Rio de Janeiro, Brazil; Symp. 263), 2009, #0495, p. 52, a poster.
399. Ipatov S.I. Angular momentum of two collided rarefied preplanetesimals and formation of binaries, Abstracts of 27th IAU General Assembly (August 3-14, 2009, Rio de Janeiro, Brazil; Symp. 263), 2009, #0496, p. 52, a poster.
400. Ipatov S.I. Collision probabilities of migrating small bodies and dust particles with planets, Abstracts of 27th IAU General Assembly (August 3-14, 2009, Rio de Janeiro, Brazil; Symp. 263), 2009, #0498, p. 53, a poster.

401. Ipatov S.I. Formation of small-body binaries at the stage of rarefied preplanetesimals, Abstracts of "Near-Earth astronomy 2009" (August 23-27, 2009, Kazan, Russia), 2009, a poster.
402. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Models of the ejection of material from Comet Tempel 1 caused by the Deep Impact experiment, Abstracts of *41st DPS Meeting* (October 4-9, 2009, Fajardo, Puerto Rico), *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2009, vol. 41, No 3, 20.06, p. 1028-1029. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009DPS....41.2006I/abstract>, an oral presentation.
403. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of migrating small bodies and dust particles with planets, Abstracts of *the 215th Meeting of the American Astronomical Society* (January 3-7, 2010, Washington, D.C.), 344.01. *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2010, v. 42, N 1, p. 450. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2010AAS...21534401I/abstract>, an oral presentation.
404. Ipatov S.I. Delivery of dust particles and small bodies to planets, Abstracts of *41th Lunar and Planetary Science Conference* (March 1-5, 2010, The Woodlands, Texas), 2010, #1267, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/1267.pdf>.
405. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian binaries at the stage of rarefied preplanetesimals, Abstracts of the conference "TNO 2010: Dynamical and Physical properties of Trans-Neptunian Objects" (Philadelphia, June 27 - July 1, 2010), 2010, a poster.
406. Ipatov S.I., A'Hearn M.F. Triggered outburst after the collision of the Deep Impact impactor with Comet Tempel 1, Abstracts of *38th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR)* (Bremen, Germany, July 18-25, 2010), 2010, abstract ID is 5702, Paper number: B04-0056-10. <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/COSPAR-10/abstracts/data/pdf/abstracts/B04-0056-10.pdf>, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2010cosp...38..659I/abstract>, a poster.
407. Ipatov S.I. The triggered outburst after the Deep Impact collision with Comet Tempel 1 and the composition of the comet, Abstracts of *42nd DPS Meeting* (October 4-8, 2010, Pasadena, California), 2010, 28.35. *The Bulletin of the American Astronomical Society*, 2010, v. 42, N 4. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2010DPS....42.2835I/abstract>, a poster.
408. Ipatov S.I. The outburst triggered by the collision of the Deep Impact module with Comet Tempel 1, and cavities in comets, Abstracts of *42nd Lunar and Planetary Science Conference* (March 7-11, 2011, The Woodlands, Texas), 2011, #1317, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/1317.pdf>.
409. Ipatov S.I. Location of the upper borders of the cavities excavated after the Deep Impact collision, Abstracts of *43rd Lunar and Planetary Science Conference* (March 19-23, 2012, The Woodlands, Texas), 2012, #1318, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2012/pdf/1318.pdf>.
410. Ipatov S.I. Cavities as a source of outbursts from comets, Abstracts of the conference *JENAM-2011, European week of astronomy and space science* (St. Petersburg, Russia, July 4-8, 2011), 2011, S2-9, a poster.
411. Ipatov S.I. Collision probabilities of small bodies and dust particles with planets, Abstracts of the international conference "Near-Earth astronomy" (Krasnoyarsk, September 5-10, 2011), 2011, session 13.
412. Ipatov S.I. Cavities as a source of outbursts from comets, Abstracts of *DPS-EPSC 2011 joint meeting*, (October 2-7, 2011, Nantes, France), EPSC abstracts, 2011, Vol. 6, EPSC-DPS2011-586. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2011/EPSC-DPS2011-586.pdf>, a poster.
413. Ipatov S.I. Angular momenta of rarefied preplanetesimals and formation of small-body binaries, Abstracts of the conference "Signposts of planets" (NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, October 18-20, 2011), 2011, <http://science.gsfc.nasa.gov/667/conferences/posters/signposts/gsf2011oq-binaries.pdf>, a poster.
414. Ipatov S.I. Sources of the zodiacal dust cloud, Abstracts of the conference "Signposts of planets" (NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, October 18-20, 2011), 2011, <http://science.gsfc.nasa.gov/667/conferences/posters/signposts/gsf2011oq-zodi.pdf>, a poster.
415. Ipatov S.I. Cavities in Comet Tempel 1 excavated after the Deep Impact collision, Abstracts of *39th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR)* (Mysore, India, July 14-22, 2012), 2012, abstract ID is 12188, Paper number: B0.4-0046-12, a poster.
416. Ipatov S.I. Angular momenta of collided rarefied preplanetesimals, Abstracts of *28th IAU General Assembly* (August 20-31, 2012, Beijing, China), IAUS 293. 2012, #5517, p. 547-548.
417. Ipatov S.I., Horne, K., Alsubai K., Bramich D., Dominik M., Hundertmark M., Liebig C., Snodgrass C., Street R., Tsapras Y. Simulator for microlens planet surveys, Abstracts of *28th IAU General Assembly* (August 20-31, 2012, Beijing, China), 2012, #5753, IAUS 293. p. 583-584, a poster.

418. Ipatov S.I. Location of the upper border of the main cavity excavated after the Deep Impact collision, Abstracts of *28th IAU General Assembly* (August 20-31, 2012, Beijing, China), 2012, #5494, JD5, p. 868-869, an oral presentation.

419. Ipatov S.I. Outbursts and cavities in comets, Abstracts of the *Joint Qatar Foundation Annual Research Forum and Arab Expatriate Scientists Network 2012* (21-23 October 2012, Doha, Qatar), *Qatar Foundation Annual Research Forum Proceedings*: 2012, Vol. 2012, EEP15. <http://www.qscience.com/doi/abs/10.5339/qfarf.2012.EEP15>, a poster.

420. Ipatov S.I. Angular momenta of collided rarefied preplanetesimals, Abstracts of *44th Lunar and Planetary Science Conference* (March 18-22, 2013, The Woodlands, Texas), 2013, #1488, 2 pages, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/pdf/1488.pdf>.

421. Ipatov S.I. Angular momenta of collided rarefied preplanetesimals, Abstracts of *European Planetary Science Congress 2013* (September 08 – 13, 2013, London, UK), Session PD3/EX4, 2013. EPSC Abstracts. 2013. V. 8. EPSC2013-290-3. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2013/EPSC2013-290-3.pdf>, 2 pages. Presentation: http://presentations.copernicus.org/EPSC2013-290_presentation.pdf. A poster.

422. Ipatov S.I. Cavities in comets, Abstracts of *European Planetary Science Congress 2013* (September 08 – 13, 2013, London, UK). EPSC Abstracts. 2013. V. 8. EPSC2013-335-1. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2013/EPSC2013-335-1.pdf>. 2 pages. Presentation: http://presentations.copernicus.org/EPSC2013-335_presentation.pdf. An oral presentation.

423. Ipatov S.I., Horne K., Alsubai K., Bramich D., Dominik M., Hundertmark M., Liebig C., Snodgrass C., Street R., Tsapras Y. Exoplanet detection capability of microlensing observations, Abstracts of *European Planetary Science Congress 2013* (September 08 – 13, 2013, London, UK), Program EX5, 2013. EPSC Abstracts. 2013. V. 8. EPSC2013-331-2. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2013/EPSC2013-331-2.pdf>. 2 pages. Presentation: http://presentations.copernicus.org/EPSC2013-331_presentation.pdf. A poster.

424. Ipatov S.I. Cavities in comets, Abstracts of International conference “*Near-Earth astronomy 2013*” (Krasnodar, Russia, October 7-11, 2013). 2013. P. 37-38. An oral presentation. Международная конференция “*Околоземная астрономия-2013*”. Поселок Агой, Краснодарский край.

425. Ipatov S.I. The role of collisions of rarefied preplanetesimals in formation of satellites of small bodies, Abstracts of International conference “*Near-Earth astronomy 2013*” (Krasnodar, Russia, October 7-11, 2013). 2013. P. 87-88, a poster. Международная конференция “*Околоземная астрономия-2013*”. Поселок Агой, Краснодарский край.

426. Ipatov S.I. Outbursts and cavities in comets, Abstracts of “*The Fourth Moscow Solar System Symposium 4M-S3*” (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 14-18, 2013), 2013, 4MS3-PS-38, CD-ROM, http://ms2013.cosmos.ru/sites/ms2013.cosmos.ru/files/4m-s3_abstract_book.pdf. 2013. P. 203.

427. Ipatov S.I. The angular momentum of colliding rarefied preplanetesimals allows the formation of binaries, Abstracts of “*The Fourth Moscow Solar System Symposium 4M-S3*” (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 14-18, 2013), 4MS3-PS-39, CD-ROM, http://ms2013.cosmos.ru/sites/ms2013.cosmos.ru/files/4m-s3_abstract_book.pdf. 2013. P. 204.

428. Ipatov S.I. Delivery of water and volatiles to the terrestrial planets. Abstracts of the 1st COSPAR Symposium “*Planetary systems of our Sun and other stars, and the future of space astronomy*” (Bangkok, Thailand, November 11-15, 2013), session 4, 2013, p. 88, an oral presentation at the session 4.

429. Ipatov S.I., Cho J.Y-K. Synthetic spectra from a general circulation simulation of a model extrasolar Earth, Abstracts of the 1st COSPAR Symposium “*Planetary systems of our Sun and other stars, and the future of space astronomy*” (Bangkok, Thailand, November 11-15, 2013), session 4, 2013, p. 101, a poster at the session 4.

430. Ipatov S.I., Keith H., Alsubai K., Bramich D., Dominik M., Hundertmark M., Liebig C., Snodgrass C., Street R., Tsapras Y. Exoplanet detection capability of microlensing observations, Abstracts of the 1st COSPAR Symposium “*Planetary systems of our Sun and other stars, and the future of space astronomy*” (Bangkok, Thailand, November 11-15, 2013), session 5, 2013, p. 116.

431. Ipatov S.I. Formation and migration of planetesimals, Abstracts of the 1st COSPAR Symposium “*Planetary systems of our Sun and other stars, and the future of space astronomy*” (Bangkok, Thailand, November 11-15, 2013), session 5, 2013, p. 118, an oral presentation at the session 5.

432. Ипатов С.И. Формирование планетезималей из разреженных препланетезималей. Современное понимание Солнечной системы и открытые вопросы: Всероссийская научная Интернет-конференция с международным участием : материалы конф. (Казань, 10 декабря 2013 г.)

- / Сервис виртуальных конференций Pax Grid; сост. Синяев Д. Н. - Казань: ИП Синяев Д. Н. , 2014. ISBN 978-5-906217-39-4, http://www.paxgrid.ru/conference/new_conf_pages.php?p=proceedings&c=solarem2013. С. 43. http://www.paxgrid.ru/proceedings_solarem2013.pdf#page=43. Устный доклад.
433. Ipatov S.I., Horne K. Models of sky brightness, Abstracts of *45th Lunar and Planetary Science Conference* (March 17-21, 2014, The Woodlands, Texas), 2014, #1390, 2 pages, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2014/pdf/1390.pdf>. <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2014/eposter/1390.pdf> – eposter.
434. Ipatov S.I. Outbursts from cavities in comets, Abstracts of the *5th Bredikhin International conference* (Zavolzsk, Russia, 12-16 May, 2014), 2014, p. 17. Ипатов С.И. Выбросы вещества из полостей в кометах. Тезисы 5-ых Бредихинских Чтений (12-16 мая 2014, Заволжск, Россия), 2014, с. 17. http://www.inasan.ru/rus/conferences/bredikhin2014/presentations/2_Comet/Ipatov.pdf. Устный доклад.
435. Ипатов С.И., Cho Y-K. Спектры экзопланет, похожих на Землю, с различными периодами осевых вращений. Тезисы семинара «Исследования экзопланет» (3-4 июня 2014 г., ИКИ РАН, Москва), 2014, стр. 24. <http://exo2014.cosmos.ru/sites/exo2014.cosmos.ru/files/exo2014-program-and-abstracts-4.pdf>. Стендовый доклад.
436. Ипатов С.И., Horne K. Эффективность поиска экзопланет методом микролинзирования при использовании различных телескопов. Тезисы семинара «Исследования экзопланет» (3-4 июня 2014 г., ИКИ РАН, Москва), 2014, стр. 8-9. <http://exo2014.cosmos.ru/sites/exo2014.cosmos.ru/files/exo2014-program-and-abstracts-4.pdf>. Устный доклад.
437. Ипатов С.И., Маров М.Я. Миграция малых тел и пыли к планетам земной группы. Тезисы межд. конференции “Современные проблемы вычислительной математики и математической физики” (16-17 июня 2014 г., Москва), МакС Пресс. 2014, С. 101-103. http://vm.cs.msu.su/samarski2014/Abstracts_Samarskii_2014.pdf. Устный доклад.
438. Ipatov S.I. The Earth-Moon system as a typical binary in the Solar System, Abstracts of the *Asteroids, Comets, Meteors conference* (June 30–July 4, 2014, Helsinki, Finland), Karri Muinonen, Antti Penttilä, Mikael Granvik, Anne Virkki, Grigori Fedorets, Olli Wilkman, and Tomas Kohout (eds.), a USB flash drive and website, <http://www.helsinki.fi/acm2014/pdf-material/ACM2014.pdf>. 2014, p. 248, an oral presentation.
439. Ipatov S.I. Outbursts from cavities in comets, Abstracts of the *Asteroids, Comets, Meteors conference* (June 30–July 4, 2014, Helsinki, Finland), Karri Muinonen, Antti Penttilä, Mikael Granvik, Anne Virkki, Grigori Fedorets, Olli Wilkman, and Tomas Kohout (eds.), a USB flash drive and website, in <http://www.helsinki.fi/acm2014/pdf-material/ACM2014.pdf>, 2014, p. 249, an oral presentation.
440. Ipatov S.I. Outbursts and cavities in comets, Abstracts of *40th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR)* (Moscow, Russia, August 02-10, 2014), a USB flash drive and website, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014cosp...40E1284I>, 2014, abstract ID is 12736, B0.4-0039-14, an oral presentation.
441. Ipatov S.I. Formation of satellites of trans-Neptunian objects at the stage of rarefied preplanetesimals, Abstracts of *40th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR)* (Moscow, Russia, August 02-10, 2014), a USB flash drive and website, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014cosp...40E1283I>, 2014, abstract ID is 12600, B0.3-0029-14, an oral presentation.
442. Ipatov S.I. The role of collisions of rarefied condensations in formation of embryos of the Earth and the Moon, Abstracts of *46th Lunar and Planetary Science Conference* (March 16-20, 2015, The Woodlands, Texas), 2015, #1355, 2 pages, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2015/pdf/1355.pdf>. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2015/eposter/1355.pdf> – eposter.
443. Ipatov S.I. Origin of orbits of secondaries in discovered trans-Neptunian binaries, Abstracts of *46th Lunar and Planetary Science Conference* (March 16-20, 2015, The Woodlands, Texas), 2015, #1512, 2 pages, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2015/pdf/1512.pdf>. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2015/eposter/1512.pdf> – e-poster
444. Ипатов С.И. Формирование спутниковых систем транснептуновых объектов и системы Земля-Луна. Научная конференция «Астрономия от ближнего космоса до космологических далей» (25-30 мая 2015, Москва). http://www.sai.msu.ru/EAAS/rus/confs/abstr_book2.pdf. 2015, С. 57-58. Устный доклад.
445. Ipatov S.I., Marov M.Ya. Migration of small bodies and dust to the terrestrial planets,

Abstracts of *IX international conference "Near-Earth astronomy"* (August 31 – September 5, 2015, Terskol, Russia). <http://www.terskol.com/conferences/abstracts.pdf>.
http://www.inasan.ru/rus/conferences/OZA_2015/Abstract_book.pdf. 2015, pp. 6-7. Ипатов С.И., Маров М.Я. Миграция малых тел и пыли к планетам земной группы. Тезисы 9-ой межд. конференции «Околоземная астрономия-2015» (31 августа – 5 сентября 2015 г., Терскол). 2015, С. 6. Устный доклад.

446. Ipatov S.I. Formation of embryos of the Earth-Moon system at the stage of rarefied condensations, Session EX3, Abstracts of *European Planetary Science Congress 2015* (27 September – 02 October 2015, Nantes, France), EPSC Abstracts, 2015, Vol. 10, EPSC2015-310, 2 pages, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015/EPSC2015-310.pdf>, a poster presentation.

447. Ipatov S.I., Marov M.Ya. Migration of planetesimals to forming terrestrial planets from the feeding zone of Jupiter and Saturn. Abstracts of *47th Lunar and Planetary Science Conference* (March 21-25, 2016, The Woodlands, Texas), 2016, #1458, 2 pages, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/1458.pdf> – abstract, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/eposter/1458.pdf> - e-poster.

448. Ipatov S.I., Marov M.Ya. Migration of icy planetesimals to forming terrestrial planets, Abstracts of *41st Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR)* (Istanbul, Turkey, 30 July - 7 August 2016), 2016, presentation number B0.5-0011-16, selected for an oral presentation. COSPAR-2016 has been cancelled. <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/COSPAR-16/abstracts/B0.5-0011-16.pdf>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016cosp...41E.867I/abstract>.

449. Ipatov S.I. Formation and growth of embryos of the Earth-Moon system, Abstracts of *41st Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR)* (Istanbul, Turkey, 30 July - 7 August 2016), 2016, presentation number B0.5-0017-16, selected for a poster presentation. COSPAR-2016 has been cancelled <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/COSPAR-16/abstracts/B0.5-0017-16.pdf>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016cosp...41E.868I/abstract>.

450. Ipatov S.I. Angular momenta of collided rarefied preplanetesimals needed for formation of trans-neptunian satellite systems. Abstracts of *48th Lunar and Planetary Science Conference* (March 20-24, 2017, The Woodlands, Texas), 2017, #1554, 2 pages, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2017/pdf/1554.pdf> – abstract, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2017/eposter/1554.pdf> - e-poster.

451. Ipatov S.I., Marov M.Ya. Migration of small bodies to the terrestrial planets. Abstracts of the *6th Bredikhin International conference* (Zavolzsk, Russia, September 4-8, 2017), 2017, p. 26, an oral presentation. Website of the conference: <http://agora.guru.ru/display.php?conf=bredikhin2017>. Ипатов С.И., Маров М.Я. Миграция малых тел к планетам земной группы. Тезисы 6-ых Бредихинских Чтений (4-8 сентября 2017, Заволжск, Россия), 2017, с. 26 (тезисы на двух языках). Устный доклад. Ссылка на сайт конференции: <http://agora.guru.ru/display.php?conf=bredikhin2017>.

452. Ipatov S.I. Formation of satellite systems of small bodies and the embryos of the Moon and the Earth. Abstracts of the *6th Bredikhin International conference* (Zavolzsk, Russia, September 4-8, 2017), 2017, p. 27, an oral presentation. Website of the conference: <http://agora.guru.ru/display.php?conf=bredikhin2017>. Ипатов С.И. Формирование спутниковых систем малых тел и зародышей Луны и Земли. Тезисы 6-ых Бредихинских Чтений (4-8 сентября 2017, Заволжск, Россия), 2017, с. 27. Устный доклад. Ссылка на сайт конференции: <http://agora.guru.ru/display.php?conf=bredikhin2017>.

453. Ipatov S.I., Marov M.Ya. Migration of icy objects to forming terrestrial planets. Abstracts of *European Planetary Science Congress 2017* (September 17-22, 2017, Riga, Latvia), 2017, EPSC2017-211, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2017/EPSC2017-211.pdf>, 2 pages, an oral presentation - https://presentations.copernicus.org/EPSC2017-211_presentation.pdf.

454. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian satellite systems at the stage of rarefied condensations, Abstracts of *European Planetary Science Congress 2017* (September 17-22, 2017, Riga, Latvia), 2017, EPSC2017-225, 2 pages, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2017/EPSC2017-225.pdf>, an oral presentation - https://presentations.copernicus.org/EPSC2017-225_presentation.pdf.

455. Ipatov S.I. Formation and growth of embryos of the Earth and the Moon. Abstracts of *European Planetary Science Congress 2017* (September 17-22, 2017, Riga, Latvia), 2017, EPSC2017-355, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2017/EPSC2017-355.pdf>, 2 pages, a poster presentation - https://presentations.copernicus.org/EPSC2017-355_presentation.pdf.

456. Ipatov S.I. Formation of satellite systems of small bodies and the embryos of the Moon and the Earth, Abstracts of "The X international conference «Near-Earth Astronomy-2017»" (Agoy, Krasnodar

region, Russia, October 2-6, 2017). An oral presentation. Website of the conference: <http://agora.guru.ru/display.php?conf=oza-2017>. Ипатов С.И. Формирование спутниковых систем малых тел и зародышей Земли и Луны. Тезисы X международной конференции «Околоземная астрономия-2017» (Краснодарский край, 2-6 октября 2017). 2017, С. 8. Устный доклад. Ссылка на сайт конференции: <http://agora.guru.ru/display.php?conf=oza-2017>. https://docviewer.yandex.ru/view/0/?*=hA2OT0drleOHLXXG6roDUco%2BLfh7InVybCI6InlhLWRpc2stcHVibGljOi8vU09DMUISVnRrZGZndHBnUEFFNDBORkRtamF6L3pLRXpxbGFMR3dBeVZ1WT0iLJCJ0aXRzZSI6Ik9aQS0yMDE3IEFic3RhY3QgYm9vay5wZGYiLlCJ1aWQiOiIwIiwieXUiOiI4MjY5MzA3MzQxNTE1NTIxMzUwIiwibm9pZnJhbWUiOmZhbnHNILCJ0cyI6MTUxNzYwNzIzNTIwOX0%3D - сборник тезисов в интернете.

457. Ipatov S.I., Elenin L.V. Suggested models of the probabilities of discovery of near-Earth objects in different regions of the sky based on studies of migration of celestial bodies, Abstracts of "The X international conference «Near-Earth Astronomy-2017»" (Agoy, Krasnodar region, Russia, October 2-6, 2017). С. 23. An oral presentation. Website of the conference: <http://agora.guru.ru/display.php?conf=oza-2017>. Ипатов С.И., Еленин Л.В. Предлагаемые модели вероятности обнаружения в различных областях неба объектов, сближающихся с Землей, основанные на изучении миграции небесных тел. Тезисы X международной конференции «Околоземная астрономия-2017» (поселок Агой, Краснодарский край, 2-6 октября 2017). Устный доклад. Ссылка на сайт конференции: <http://agora.guru.ru/display.php?conf=oza-2017>.

https://docviewer.yandex.ru/view/0/?*=hA2OT0drleOHLXXG6roDUco%2BLfh7InVybCI6InlhLWRpc2stcHVibGljOi8vU09DMUISVnRrZGZndHBnUEFFNDBORkRtamF6L3pLRXpxbGFMR3dBeVZ1WT0iLJCJ0aXRzZSI6Ik9aQS0yMDE3IEFic3RhY3QgYm9vay5wZGYiLlCJ1aWQiOiIwIiwieXUiOiI4MjY5MzA3MzQxNTE1NTIxMzUwIiwibm9pZnJhbWUiOmZhbnHNILCJ0cyI6MTUxNzYwNzIzNTIwOX0%3D - сборник тезисов в интернете.

458. Ipatov S.I. Formation and growth of embryos of the Earth and the Moon. Abstracts of 49th Lunar and Planetary Science Conference (March 19-23, 2018, The Woodlands, Texas), (LPI Contrib. No. 2083), 2018, #1602, 2 pages, <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/pdf/1602.pdf> - abstract (2018). <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/eposter/1602.pdf> - e-poster.

459. Ipatov S.I. Formation of satellite systems of small bodies and the embryos of the Moon and the Earth. Abstracts of 42nd COSPAR Scientific Assembly (Pasadena, California, USA, July 14-22, 2018), presentation number B1.3-0049-18, http://cospar2018.org/wp-content/uploads/2018/07/COSPAR-2018-Abstract-Book_July21-2018-UPDATE.pdf, 2018, p. 326. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018cosp...42E1558I>.

460. Ipatov S.I., Marov M.Ya. Migration of bodies from beyond Jupiter's orbit to the Earth and the Moon. Abstracts of 42nd COSPAR Scientific Assembly (Pasadena, California, USA, July 14-22, 2018), 2018, presentation number B1.3-0050-18. http://cospar2018.org/wp-content/uploads/2018/07/COSPAR-2018-Abstract-Book_July21-2018-UPDATE.pdf, 2018, p. 326-327. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018cosp...42E1557I>.

461. Marov M.Ya., **Ipatov S.I.** Water inventory from beyond the Jupiter orbit to the terrestrial planets and the Moon. Abstracts of XXXth General Assembly of the International Astronomical Union (Vienna, Austria, August 20-31, 2018), an oral presentation. <https://astronomy2018.univie.ac.at/abstractsiaus345/#iaus345abstr15> (only the first author is in the web file).

462. Ipatov S.I. Formation of the Earth-Moon system. Abstracts of XXXth General Assembly of the International Astronomical Union (Vienna, Austria, August 20-31, 2018), 2018. <https://astronomy2018.univie.ac.at/abstractsiaus345/#iaus345abstr16>. an oral presentation.

463. Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V. Near-Earth object population and formation of lunar craters during the last billion of years. Abstracts of XXXth General Assembly of the International Astronomical Union (Vienna, Austria, August 20-31, 2018), 2018, <https://astronomy2018.univie.ac.at/PosterAbstracts/posteriaus345> (only the first author is in the web file), a poster.

464. Ipatov S.I. Formation of trans-Neptunian satellite systems at the stage of rarefied condensations. Abstracts of XXXth General Assembly of the International Astronomical Union (Vienna, Austria, August 20-31, 2018), 2018, <https://astronomy2018.univie.ac.at/PosterAbstracts/posterDivF>, a poster.

465. Ipatov S.I. Migration of bodies to the Earth from different distances from the Sun. EPSC Abstracts Vol. 12, EPSC2018-516, 2018. *European Planetary Science Congress 2018* (Technische

Universitat Berlin, September 16–21, 2018, Berlin, Germany), a poster P36 at session: Exo-2, 2 pages. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2018/EPSC2018-516.pdf>.

466. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of bodies from the feeding zone of the terrestrial planets with the planets, the Moon, and their embryos. Abstracts of *50th Lunar and Planetary Science Conference* (March 18-22, 2019, The Woodlands, Texas), 2019. #2289, 2 pages. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/2289.pdf>. e-poster: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/eposter/2289.pdf>.

467. Ipatov S.I. Migration of planetesimals to the Earth and the Moon from different distances from the Sun. Abstracts of *50th Lunar and Planetary Science Conference* (March 18-22, 2019, The Woodlands, Texas), 2019. #2594, 2 pages. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/2594.pdf>. e-poster: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/eposter/2594.pdf>.

468. Feoktistova E.A., **Ipatov S.I.**, Svetsov V.V. Tripples of lunar craters formed by encounters of satellite systems of near-Earth objects with the Moon. Abstracts of *50th Lunar and Planetary Science Conference* (March 18-22, 2019, The Woodlands, Texas), 2019. #1946, 2 pages. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/1946.pdf>. e-poster: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/eposter/1946.pdf>.

697. Ипатов С.И. Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной. Тезисы *Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии*. (ВЕСЭМПГ-2019). 16-17 апреля 2019 г. Москва. <http://intranet.geokhi.ru/rasempg>, 2019. #063. Устный доклад.

470. Ипатов С.И. Вероятности столкновений с Землей и Луной планетезималей, мигрировавших из-за орбиты Марса. Тезисы *Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии*. (ВЕСЭМПГ-2019). 16-17 апреля 2019 г. Москва. <http://intranet.geokhi.ru/rasempg>, 2019. #064. Стендовый доклад.

471. Ипатов С.И., Феоктистова Е.А., Светцов В.В. Численность околоземных объектов и образование лунных кратеров в течение последнего миллиарда лет. Тезисы *Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии*. (ВЕСЭМПГ-2019). 16-17 апреля 2019 г. Москва. <http://intranet.geokhi.ru/rasempg>, 2019. #065. Стендовый доклад.

472. Marov M.Ya., Ipatov S.I. Delivery of water from beyond Jupiter's orbit to the terrestrial planets and the Moon. Abstracts of *EPSC-DPS Joint Meeting 2019* (September 15-20, 2019, Geneva, Switzerland), Vol. 13, EPSC-DPS2019-458-1, 2019. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2019/EPSC-DPS2019-458-1.pdf>, a poster.

473. Ipatov S.I. The Earth-Moon system as a typical satellite system in the Solar System. Abstracts of *EPSC-DPS Joint Meeting 2019* (September 15-20, 2019, Geneva, Switzerland), Vol. 13, EPSC-DPS2019-733, 2019. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2019/EPSC-DPS2019-733-1.pdf>, a poster.

474. Ipatov S.I. Initial distances from the Sun for planetesimals that collided with forming terrestrial planets and the Moon. Abstracts of *EPSC-DPS Joint Meeting 2019* (September 15-20, 2019, Geneva, Switzerland), Vol. 13, EPSC-DPS2019-462-1, 2019. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2019/EPSC-DPS2019-462-1.pdf>, a poster.

475. Ipatov S.I. Angular momenta of colliding rarefied condensations Abstracts of *EPSC-DPS Joint Meeting 2019* (September 15–20, 2019, Geneva, Switzerland), Vol. 13, EPSC-DPS2019-2034, 2019. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2019/EPSC-DPS2019-2034.pdf>, a poster.

476. Маров М.Я., **Ипатов С.И.** Миграция планетезималей из зоны питания планет-гигантов к планетам земной группы и Луне. Тезисы *XI Международной научной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие»* (30 сентября – 4 октября 2019 г., г. Казань). М.Я. Marov, S.I. Ipatov. “Migration of planetesimals from different distances from the feeding zone of the giant planets to the terrestrial planets and the Moon”. Abstracts of the XI International scientific conference “*Near-Earth astronomy and space heritage*” (September 30 – October 4, 2019, Kazan, Russia). <http://agora.guru.ru/display.php?conf=oza2019>, <https://yadi.sk/i/ifmloGZ-X-w8cg>, с. 65-66. Устный доклад. An oral presentation.

477. Ипатов С.И. Вероятности столкновений планетезималей из разных частей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами, Луной и их зародышами. Тезисы *XI Международной научной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие»* (30 сентября – 4 октября 2019 г., г. Казань). S.I. Ipatov. “Probabilities of collisions of planetesimals from different parts of the feeding zone of the terrestrial planets with the forming planets, the Moon, and their embryos”, Abstracts of the XI International scientific conference “*Near-Earth astronomy and space*

heritage” (September 30 – October 4, 2019, Kazan, Russia). <http://agora.guru.ru/display.php?conf=oza2019>, <https://yadi.sk/i/ifmloGZ-X-w8cg>, с. 60-61. Стендовый доклад. A poster.

478. Ипатов С.И., Феоктистова Е.А., Светцов В.В. Оценки изменения численности околоземных объектов на основе возрастов лунных кратеров в течение последнего миллиарда лет. Тезисы *XI Международной научной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие»* (30 сентября – 4 октября 2019 г., г. Казань). Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V. Estimates of variations in the number of near-Earth objects based on the ages of lunar craters over the past billion years. Abstracts of the XI International scientific conference “Near-Earth astronomy and space heritage” (September 30 – October 4, 2019, Kazan, Russia), <http://agora.guru.ru/display.php?conf=oza2019>, <https://yadi.sk/i/ifmloGZ-X-w8cg>, с. 46-47. Устный доклад. An oral presentation.

479. Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V. Variations in the number of near-Earth objects and lunar craters during the last billion years. Abstracts of *51st Lunar and Planetary Science Conference* (The Woodlands, Texas - March 16-20, 2020), LPI Contribution No. 2326, 2020, id.1910, 2 pages. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/1910.pdf>, <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/eposter/1910.pdf> - e-poster.

480. Ипатов С.И. Вероятности столкновений околоземных объектов с Землей. Тезисы *Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии*. (БЕСЭМПГ-2020). 14-15 апреля 2020 г. Москва. <http://www.geokhi.ru/rasempg/Shared%20Documents/2020/Тезисы%20БЕСЭМПГ%202020.pdf>, 2020. #047. С. 49. Устный доклад.

481. Ipatov S.I. Formation of the terrestrial planets and the Moon. Abstracts of Virtual American Astronomical Society meeting #236 (1–3 June 2020), id. 113.01. *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 52, No. 3. <https://baas.aas.org/pub/aas236-113p01-ipatov/release/1>, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AAS...23611301I/abstract>. iPoster Plus (poster+oral) – <https://aas236-aas.ipostersessions.com/default.aspx?s=EA-3E-83-9E-0A-34-58-51-1C-4A-6D-28-4B-9E-9D-36> – iPoster; <https://my.aas.org/services/AAS236/AAS236Recordings.aspx> (Presenter Name Contains: Ipatov, - my oral presentation is at the end of session 113).

482. Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V. Estimates of the number of near-Earth objects based on the number of lunar craters formed during the last billion years. *11th Planetary Crater Consortium Meeting* (August 5-7, 2020). #2038. <https://www.hou.usra.edu/meetings/crater2020/pdf/2038.pdf>, 2 pages. An oral presentation.

483. Feoktistova E.A. **Ipatov S.I.** Depths of the lunar Copernicans craters. *11th Planetary Crater Consortium Meeting* (August 5-7, 2020). #2021. <https://www.hou.usra.edu/meetings/crater2020/pdf/2021.pdf>. Print only, 2 pages.

484. Ipatov S.I. Migration of planetesimals from beyond Mars’ orbit to the Earth. *14th Europlanet Science Congress 2020*, online, 21 September – 9 Oct 2020, EPSC2020-71, 2020. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2020/EPSC2020-71.html>, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-71>, 5 pages, https://presentations.copernicus.org/EPSC2020/EPSC2020_71_presentation.mp4 - an oral presentation.

485. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of planetesimals with exoplanets in the Proxima Centauri planetary system. *14th Europlanet Science Congress 2020*, online, 21 September–9 Oct 2020, EPSC2020-416, 2020. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2020/EPSC2020-416.html>, <https://doi.org/10.5194/epsc2020-416>. 2 pages, a poster.

486. Ipatov S.I. Formation of the terrestrial planets from planetesimals originated at different distances from the Sun. Abstracts of *43rd COSPAR Scientific Assembly* (Sydney, Australia, 28 January – 4 February, 2021). B0.1-0036-21. Id. 148. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021cosp...43E.148I/abstract>, <https://www.cospar-assembly.org/user/download.php?id=26592&type=abstract§ion=congressbrowser> - an abstract; <https://assets.entegy.com.au/documents/c85a7e61-cbb7-464a-ba9f-3248c1181880.pdf> - a poster; https://www.youtube.com/watch?v=9W6ZfZHns_w - a video presentation.

487. Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V. Estimates of variations in the number of near-Earth objects based on the ages of lunar craters over the past billion years. Abstracts, *43rd COSPAR Scientific Assembly* (Sydney, Australia, 28 January – 4 February, 2021). B3.1-0027-21. Id. 362. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021cosp...43E.362I/abstract>, <https://www.cospar-assembly.org/user/download.php?id=26645&type=abstract§ion=congressbrowser> - an abstract;

- <https://assets.entegy.com.au/documents/a9244ee6-770d-41ba-bc90-8181a687b100.pdf> - a poster;
<https://www.youtube.com/watch?v=woK-x4R3ZKQ> - a video presentation.
488. Ipatov S.I. Migration of bodies from the zone of the outer asteroid belt to the Earth. Abstracts of 52nd Lunar and Planetary Science Conference (March 15–19, 2021, a virtual conference), #1618, 2 pages, <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/1618.pdf>, <https://lpsc2021.ipostersessions.com/?s=EA-59-31-3B-A2-7B-45-F1-E5-68-07-AA-0B-FC-FC-05> - an iposter
489. Ипатов С.И. Экзокометная бомбардировка планет в зоне обитаемости в системе Проксима Центавра. *Международная конференция "VII Бредихинские чтения"* (24-28 мая 2021 г., г. Заволжск). Ipatov S.I. Exocometary bombardment of planets in the habitable zone in the Proxima Centauri planetary system. Abstracts of international conference "VII Bredikhin conference", May 24-28, 2021, Zavolzsk, Russia), с. 18-19. http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2021/06/Abstracts_2021_V2.pdf. Устный доклад.
490. Ипатов С.И., Маров М.Я. Столкновения малых тел с формирующимися Землей и Луной. *Международная конференция "VII Бредихинские чтения"* (24-28 мая 2021 г., г. Заволжск). Ipatov S.I., Marov M.Ya. Collisions of small bodies with forming Earth and Moon. Abstracts of international conference "VII Bredikhin conference", May 24-28, 2021, Zavolzsk, Russia), с. 20-22. <http://www.agora.guru.ru/display.php?conf=bredikhin2020>, http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2021/06/Abstracts_2021_V2.pdf. Приглашенный доклад.
491. Ипатов С.И. Миграция планетезималей от внешних планет к внутренним планетам в системе Проксима Центавра и в солнечной системе. Тезисы докладов *Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии* (ВЕСЭМПГ-2021, 25-26 мая 2021 г., Москва), ВЕСЭМПГ – 050, с. 52, устный доклад. <http://www.geokhi.ru/rasempg/Shared%20Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2Frasempg%2FShared%20Documents%2F2021>. <http://www.geokhi.ru/rasempg/Shared%20Documents/2021/Краткие%20тезисы%20ВЕСЭМПГ2021-31052021.pdf>.
492. Ипатов С.И. Миграция планетезималей к планетам в зоне обитаемости в Солнечной системе и системе Проксима Центавра. Тезисы. *Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований»* (23-28 августа 2021 года, ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, <http://www.vak2021.ru>), 2021, с. 225. Устный доклад. https://www.vak2021.ru/wp-content/uploads/2021/08/vak2021_abstracts.pdf.
493. Ипатов С.И. Формирование планет земной группы и Луны. Тезисы. *Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований»* (23-28 августа 2021 года, ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, <http://www.vak2021.ru>), 2021, с. 226. Устный доклад. https://www.vak2021.ru/wp-content/uploads/2021/08/vak2021_abstracts.pdf.
494. Ipatov S.I. Formation of the terrestrial planets and the Moon. *Astronomy at the epoch of multimessenger studies*. Proceedings of the VAK-2021 conference (Aug 23–28, 2021). Ed. by A.M. Cherepashchuk et al. - Moscow, Janus-K. 2022. P. 236-237. DOI: 10.51194/VAK2021.2022.1.1.083. <https://www.vak2021.ru/proceedings/>. https://www.vak2021.ru/wp-content/uploads/2022/03/VAK_2021_proceedings.pdf, http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2022/02/VAK_2021_.pdf#page=237. <https://www.academia.edu/99225166>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=67932703>.
495. Ipatov S.I. Migration of planetesimals to planets located in habitable zones in the Solar System and in the Proxima Centauri system. *Astronomy at the epoch of multimessenger studies*. Proceedings of the VAK-2021 conference (Aug 23–28, 2021). Ed. by A.M. Cherepashchuk et al. - Moscow, Janus-K. 2022. P. 238-239. DOI: 10.51194/VAK2021.2022.1.1.084. <https://www.vak2021.ru/proceedings/>. http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2022/02/VAK_2021_.pdf#page=239. <https://elibrary.ru/item.asp?id=67932703>.
496. Ipatov S.I. Migration of planetesimals to the Earth and the Moon from the region of the outer asteroid belt, *European Planetary Science Congress 2021*, online, September 13-24, 2021, EPSC2021-100, <https://doi.org/10.5194/epsc2021-100>. <https://www.researchgate.net/publication/369585726>. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2021/EPSC2021-100.html>, an oral presentation.
497. Ipatov S.I. Migration of planetesimals to forming terrestrial planets, Abstracts of *IAU Symposium 364 "Multi-scale (time and mass) dynamics of space objects"* (October 18-22, 2021, Iași,

Romania), The book of abstracts is available at: https://www.math.uaic.ro/~IAU_S364/adm/IAUS_364_book_of_abstracts.pdf, p. 31, an oral presentation.

498. Ipatov S.I. Migration of planetesimals in the TRAPPIST-1 exoplanetary system. Abstracts of 53rd Lunar and Planetary Science Conference (The Woodlands, Texas - March 7–11, 2022), #1182, 2 pages, <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2022/pdf/1182.pdf>, <https://lpsc2022.ipostersessions.com/?s=3B-6A-91-5C-9C-63-DE-66-1F-99-E9-7B-E0-7C-B5-CA> - an iposter.

499. Ipatov S.I. Migration of bodies ejected from the Earth and collided with the Earth and the Moon. Abstracts of 53rd Lunar and Planetary Science Conference (The Woodlands, Texas - March 7–11, 2022), #1298, 2 pages, <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2022/pdf/1298.pdf>, <https://lpsc2022.ipostersessions.com/?s=9B-5E-DB-47-82-D4-92-21-8B-2F-D9-53-5D-DF-8A-B3> - an iposter.

500. Ипатов С.И. Вероятности выпадений тел, выброшенных с Земли при выпадениях на нее тел-ударников, на планеты и Луну. Тезисы Всероссийского Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2022, 19-20 апреля 2022 г.). ВЕСЭМПГ 2022. #045. С. 47. 1 стр. - Устный доклад. <http://www.geokhi.ru/rasempg/SitePages/%D0%94%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%BD%D1%8F%D1%8F.aspx?RootFolder=%2Frasempg%2FShared%20Documents%2F2022&FolderCTID=0x01200077A1861A98FF9D4FB359CBBC44A5DE86&View=%7B4A98432A%2DB52E%2D452B%2D95D6%2DACAEC61D655%7D>.

501. Ipatov S.I. Migration of bodies to the Earth from different distances from the Sun. Abstracts of IAU General Assembly (Busan, South Korea, Aug. 2-11, 2022). 2022. No 3066. P. 708. <https://www.youtube.com/watch?v=R1Ao1Tc-5nA> - e-talk.

502. Ipatov S.I. Migration of bodies ejected from the Earth into heliocentric orbits. Abstracts of IAU General Assembly (Busan, South Korea, Aug. 2-11, 2022). 2022. No 3107. P. 1398. e-poster.

503. Ipatov S.I. Motion of planetesimals in the Proxima Centauri planetary system. Abstracts of IAU General Assembly (Busan, South Korea, Aug. 2-11, 2022). 2022. No 3070. P. 1404. e-talk. https://www.iauga2022.org/program/poster_view.asp?A_s_code=gRazgRa2gJqzgZgzGBKpgBczGRc=&pttype=Mj2kmlYV&abs_key=gRazgRa2gReygBgYGBOPGJi1GZa=, <https://www.youtube.com/watch?v=ZsZ645ofdlY>.

504. Ipatov S.I. Motion of planetesimals from the feeding zone of Proxima Centauri c. Abstracts of 54th Lunar and Planetary Science Conference (The Woodlands, Texas - March 13–17, 2023), #1309, 2 pages. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2023/pdf/1309.pdf>, <https://lpsc2023.ipostersessions.com/?s=55-BB-36-8D-89-E0-55-68-EA-39-AF-2A-4C-B8-63-8C> - a poster. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2023/program/> - program.

505. Ipatov S.I. Collisions of bodies ejected from several places on the Earth and the Moon with the terrestrial planets and the Moon. Abstracts of 54th Lunar and Planetary Science Conference (The Woodlands, Texas - March 13–17, 2023), #1508. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2023/pdf/1508.pdf> , <https://lpsc2023.ipostersessions.com/?s=48-B7-96-FD-BD-8D-42-97-9C-5D-C2-4D-89-78-9E-54>. a poster. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2023/program/> - program.

506. Ипатов С.И. Рост экзопланет за счет планетезималей, первоначально находившихся на различных расстояниях от звезды, в системе ТРАППИСТ-1. Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2023, 11-12 апреля 2023 г., Москва), ВЕСЭМПГ 2023. 048, с. 50, <https://new.ras.ru/upload/iblock/fff/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B%20%D0%92%D0%95%D0%A1%D0%AD%D0%9F%D0%9C%D0%932023.pdf>. стендовый доклад. <http://www.geokhi.ru/rasempg>.

507. Ипатов С.И. Размеры зоны питания планеты Проксима Центавра с. Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2023, 11-12 апреля 2023 г., Москва), ВЕСЭМПГ 2023 - 049, с. 51, <https://new.ras.ru/upload/iblock/fff/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B%20%D0%92%D0%95%D0%A1%D0%AD%D0%9F%D0%9C%D0%932023.pdf>. стендовый доклад. <http://www.geokhi.ru/rasempg>

508. Ипатов С.И. Миграция экзокомет в планетных системах Проксима Центавра и Траппист 1. Международная конференция "VII Бредихинские чтения" (4-8 сентября 2023 г., г. Заволжск). http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2023/08/Abstract-book_1.pdf. С. 11-12. Устный доклад.

Ipatov S. I. Migration of exocomets in the Proxima Centauri and Trappist 1 planetary systems. Abstracts of international conference “VIII Bredikhin conference, September 4-8, 2023, Zavolzsk, Russia).

509. Ипатов С.И. Обмен метеоритами между Землей и Луной. *Международная конференция “VII Бредихинские чтения”* (4-8 сентября 2023 г., г. Заволжск). http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2023/08/Abstract-book_1.pdf. С. 32-33. Устный доклад. Ipatov S.I. Exchange of meteorites between the Earth and the Moon. Abstracts of international conference “VIII Bredikhin conference”, September 4-8, 2023, Zavolzsk, Russia). <http://www.agora.guru.ru/bredikhin2023> – сайт конференции. http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2023/08/programma_3.pdf – программа конференции.

510. Ipatov S.I. Migration of planetesimals from the orbit of planet Proxima Centauri c. *DPS-EPSC 2023* (San Antonio, Texas, USA, 1-6 October 2023). <https://aas.org/meetings/dps55>. Program Number: 222.01. <https://baas.aas.org/pub/2023n8i222p01/release/1>, <https://submissions.mirasmart.com/DPS55/ViewSubmissionFile.aspx?sbmID=95&mode=html&validate=false> – abstract. <https://submissions.mirasmart.com/Verify/DPS55/Submission/Temp/radlfz5t4qg.pdf> – a poster.

511. Ipatov S.I. Motion of planetesimals in the Proxima Centauri, Trappist-1 and Gliese 581 planetary systems. Abstracts of *55th Lunar and Planetary Science Conference* (The Woodlands, Texas - March 11–15, 2024), #1054, 2 pages. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2024/pdf/1054.pdf> . <https://lpsc2024.ipostersessions.com/?s=7E-78-4F-7C-57-01-9A-CE-60-A9-E6-04-08-1F-19-00> – iposter. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2024/program> – program. <https://www.academia.edu/126487537>.

512. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of bodies ejected from the Earth with the terrestrial planets. Abstracts of *55th Lunar and Planetary Science Conference* (The Woodlands, Texas - March 11–15, 2024), #1231, 2 pages. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2024/pdf/1231.pdf> . <https://lpsc2024.ipostersessions.com/?s=4A-4B-CD-60-CD-FB-C7-D6-69-03-3B-F2-98-87-34-75> – iposter. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2024/program> – program. <https://www.academia.edu/126487489>.

513. Ипатов С.И. Миграция тел в экзопланетных системах Проксима Центавра и Траппист 1. Тезисы. *Всероссийский ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии ВЕСЭМПГ-2024*. Москва. 16-17 апреля 2024 г. http://portal.geokhi.ru/Newsdata/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B_%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%BE%D0%B2_%D0%92%D0%95%D0%A1%D0%AD%D0%9C%D0%9F%D0%93_2024.pdf. ВЕСЭМПГ 2024 – 049. Стр. 51. Стендовый доклад.

514. Ипатов С.И. Миграция тел, выброшенных с Земли и Луны. Тезисы. *Всероссийский ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии ВЕСЭМПГ-2024*. Москва. 16-17 апреля 2024 г. http://portal.geokhi.ru/Newsdata/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B_%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%BE%D0%B2_%D0%92%D0%95%D0%A1%D0%AD%D0%9C%D0%9F%D0%93_2024.pdf. ВЕСЭМПГ 2024 – 050. Стр. 52. Стендовый доклад.

515. Ipatov S.I. Delivery of material to the terrestrial planets and the Moon at the late stages of their formation. *Earth and Planets Origin and Evolution Workshop 2024*. Paris – May 13-17. 2024. Abstracts. <https://drive.google.com/file/d/1Chmidh88sgUkmH2eft11GWAhfJFXvRfs/view> . A poster.

516. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of bodies ejected from the Earth with the terrestrial planets and the Moon. *45th COSPAR Scientific Assembly*. July 13-21, 2024. A poster no TWT-032. <https://app.cospar-assembly.org/2024/browser/presentation/34076> – abstracts. https://www.cospar-assembly.org/admin/session_cospar.php?session=1184 – the session COSPAR-2024-B0.1: PLANETARY SCIENCE HIGHLIGHTS.

517. Ipatov S.I. Migration of bodies in the Proxima Centauri and Trappist 1 planetary systems. *IAU Symposium 393: Planetary Science and Exoplanets in the Era of the James Webb Space Telescope* (August 13-15, 2024, Cape Town, South Africa). Abstract no 288. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024IAUGA..32P.288I/abstract>. https://astronomy2024.org/wp-content/uploads/2024/07/Abstracts-book_July30.pdf – abstracts book, p. 2378. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024IAUGA..32P.288I/abstract>. <https://astronomy2024.org/wp-content/uploads/posters/288.pdf> – a poster. <https://iaus393.uca.ma/program/>. <https://astronomy2024.org/>. Poster session on Aug 14 from 15:00, screen number 71. <https://iaus393.uca.ma>.

518. Ipatov S.I. Migration of bodies ejected from the Earth and the Moon. *IAU Symposium 393: Planetary Science and Exoplanets in the Era of the James Webb Space Telescope* (August 13-15, 2024,

Cape Town, South Africa). Abstracts. A poster. Abstract no 289. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024IAUGA..32P.289I/abstract>. https://astronomy2024.org/wp-content/uploads/2024/07/Abstracts-book_July30.pdf - abstracts book, p. 2379. <https://astronomy2024.org/wp-content/uploads/posters/289.pdf> - a poster. In <https://astronomy2024.org/poster-schedule/> make a search for Ipatov. Poster session on Aug 15 from 10:00, screen number 73. <https://iaus393.uca.ma>.

519. Ипатов С.И. Обмен метеоритами между планетами земной группы и Луной. Ипатов С.И. Обмен метеоритами между планетами земной группы и Луной. *Всероссийская конференция (с международным участием) "Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр"*. 25-31 августа 2024 года. п. Нижний Архыз Карачаево-Черкесской республики. Устный доклад. <https://vak2024.ru/ru/prog.php>. <https://vak2024.ru/doc/CAO РАН сборник тезисов.pdf> - сборник тезисов. С. 223. <https://vak2024.ru/ru/lk/pdf.php?a1=224> - абстракт. https://vak2024.ru/doc/reportFiles/T9_O224_%D0%98%D0%BF%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%B2_%D0%A1%D0%98.pdf - слайды доклада.

520. Ипатов С.И. Миграция планетезималей и пылевых частиц в экзопланетной системе Проксима Центавра. *Всероссийская конференция (с международным участием) "Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр"*. 25-31 августа 2024 года. п. Нижний Архыз Карачаево-Черкесской республики. Устный доклад. <https://vak2024.ru/ru/prog.php>. <https://vak2024.ru/doc/CAO РАН сборник тезисов.pdf> - сборник тезисов. С. 205. <https://vak2024.ru/ru/lk/pdf.php?a1=225> - абстракт. https://vak2024.ru/doc/reportFiles/T8_O225_%D0%98%D0%BF%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%B2_%D0%A1%D0%98.pdf, слайды доклада.

521. Ипатов С.И. Миграция планетезималей в экзопланетной системе ТРАППИСТ-1. *Всероссийская конференция (с международным участием) "Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр"*. 25-31 августа 2024 года. п. Нижний Архыз Карачаево-Черкесской республики. <https://vak2024.ru/ru/prog.php>. <https://vak2024.ru/doc/CAO РАН сборник тезисов.pdf> - сборник тезисов. С. 206. <https://vak2024.ru/ru/lk/pdf.php?a1=252> - абстракт. https://vak2024.ru/doc/reportFiles/T8_OP252_%D0%98%D0%BF%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%B2_%D0%A1%D0%98.pdf - слайды доклада. https://vak2024.ru/doc/posterFiles/T8_P252_%D0%98%D0%BF%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%B2_%D0%A1%D0%98.pdf, стендовый доклад.

522. Ipatov S.I. Motion of planetesimals and dust particles in the Proxima Centauri planetary system. *Europlanet Science Congress 2024*. Berlin, Germany. 8–13 September 2024. Abstract EPSC2024-68. A poster. Virtual presentation in EXOA4 – Astrobiology and Origins. EPSC Abstracts. Vol. 17, EPSC2024-68, 2024. <https://doi.org/10.5194/epsc2024-68>, 2024. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2024/EPSC2024-68.html> - abstract. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024epsc.conf...68I/abstract>. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2024/sessionprogramme>. Стендовый доклад.

523. Ipatov S.I. Migration of bodies ejected from the terrestrial planets. *Europlanet Science Congress 2024*. Berlin, Germany. 8–13 September 2024. Abstract EPSC2024-51. A poster. Virtual presentation in TP9 – Impact Processes in the Solar System. EPSC Abstracts. Vol. 17, EPSC2024-51, 2024. <https://doi.org/10.5194/epsc2024-51>. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2024/EPSC2024-51.html> - abstract. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024epsc.conf...51I/abstract>. Стендовый доклад.

524. Ипатов С.И. Эволюция орбит тел в экзопланетных системах Proxima Centauri, TRAPPIST-1 и GLISSE 581. *Научно-практический семинар «Исследование планет Солнечной системы и экзопланет»* (16-21 декабря 2024, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика). Устный онлайн доклад. <https://planetaexo.wixsite.com/planets2024> - программа семинара. Аннотации докладов будут размещены на сайте семинара.

525. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of bodies ejected from the terrestrial planets with planets. Abstracts of 56th Lunar and Planetary Science Conference (The Woodlands, Texas - March 10–14, 2025), #1593, 2 pages, <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2025/pdf/1593.pdf>. <https://lpsc2025.ipostersessions.com/Default.aspx?s=62-F1-C5-A2-68-4E-73-52-70-52-16-55-61-AD-68-7B> – iposter. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2025/program/>.

526. Ипатов С.И. Вероятности столкновений с планетами земной группы тел, выброшенных с этих планет // *Тезисы Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии* (ВЕСЭМПГ-2025) (Москва, 15-16 апреля 2025г.). ВЕСЭМПГ 2025 – 044, стр. 24.

<http://www.geokhi.ru/rasempg/Shared%20Documents/2025/Тезисы%20докладов%20ВЕСЭМПГ%2025.pdf> . Устный доклад. на сайте <https://www.youtube.com/playlist?list=PLF5HdevRKsXLgmqCR31AmMDERjFnfo1or> 16.04.2025. мой доклад при записи 1:11:40-1:21:50 (10 минут). <http://www.geokhi.ru/rasempg/Shared%20Documents/2025/Программа%202025.pdf> .

527. Ипатов С.И. Обмен веществом между планетами земной группы при выбросе вещества с планет // *Тезисы конференции «Околоземная астрономия–2025»* (Москва, ИКИ РАН, 2-4 июня 2025 г.). С. 45-47. <https://disk.yandex.ru/i/TnerA0kaOHgGBg> - сборник тезисов. Устный доклад. 2 июня 2025. 15:30-15:45 – по программе. Трансляция конференции на YouTube: <https://www.youtube.com/playlist?app=desktop&list=PLGyFz6xpxOYn1xRIQ518DXr8WfvL-HV0p> . https://oza2025.tilda.ws/full_program - программа.

528. Ipatov S.I. Migration of bodies ejected from Mars, Mercury, and Venus // *Abstracts of 87th Annual Meeting of the Meteoritical Society* (Perth, Western Australia, July 14–18, 2025). ID. 5019. <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2025/pdf/5019.pdf>. A poster. Poster Session 2: Meteorite Delivery to Earth and Recovery. *Meteoritics and Planetary Science*. 2025. V. 60. Supplement S1. #5019. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/maps.70033> - p. 117 in this file. <https://metsoc2025.au/program/> .

529. Ipatov S.I. Exchange of ejected material between the terrestrial planets and the Moon. *Abstracts of EPSC-DPS Joint Meeting 2025*. (Finland, Helsinki, 7-12 September 2025). EPSC-DPS2025-11. SB15 – Computational and experimental astrophysics of small bodies and planets. <https://doi.org/10.5194/epsc-dps2025-11>. Slides of the presentation are in Supplementary materials. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2025/session/55076#Orals> WED-OB6 – program of session SB15. An oral presentation. Wednesday, 10 Sep, 16:30–16:42 (EEST). Room Mercury.

530. Ipatov S.I. Probabilities of collisions of planetesimals with planets in the Proxima Centauri, Trappist-1 and Gliese 581 exoplanetary systems. *Abstracts of EPSC-DPS Joint Meeting 2025*. (Finland, Helsinki, 7-12 September 2025). EPSC-DPS2025-15. EXOA17 – Dynamics and stability of extrasolar systems. doi: <https://doi.org/10.5194/epsc-dps2025-15>. Slides of the presentation are in Supplementary materials. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2025/session/55193#Posters> – program EXOA17, posters. A poster. Thursday, 11 Sep, 18:00–19:30 (EEST), Display time Thursday, 11 Sep, 08:30–19:30| Finlandia Hall foyer, F230.

531. Ipatov S.I. Migration of bodies in the Proxima Centauri and Trappist 1 planetary systems // *Abstracts of the conference “Solar System in Context 2025”* (29 September - 2 October 2025, Tucson, Arizona), <https://noirlab.edu/science/events/websites/solar-system-in-context-2025/schedule> (this website includes also abstracts). p. 30-31. Virtual poster. 29.09.2025.

532. Ipatov S.I. Exchange of ejected material between the Moon and the terrestrial planets // *The Sixteenth Moscow Solar System Symposium (16M-S3)*. Moscow, Russia. October 20- 24, 2025, 16MS3-MN-PS-11. https://ms2025.cosmos.ru/sites/default/files/2025/abstracts/pdf/16M-S3-Ipatov-from-Moon_0.pdf - abstracts, DOI: 10.21046/16MS3-2025. https://ms2025.cosmos.ru/docs/2025/16-MS3_ABSTRACT-BOOK_1.pdf, p. 146-148. https://ms2025.cosmos.ru/docs/2025/16-MS3_PROGRAM_25.09.25.pdf - program. A poster. 21.10.2025.

533. Ipatov S.I. Migration of bodies ejected from Mercury and Venus // *The Sixteenth Moscow Solar System Symposium (16M-S3)*. Moscow, Russia. October 20- 24, 2025, 16MS3-SB-25. https://ms2025.cosmos.ru/sites/default/files/2025/abstracts/pdf/16M-S3-Ipatov-from-Mercury-and-Venus_1.pdf - abstracts, DOI: 10.21046/16MS3-2025. https://ms2025.cosmos.ru/docs/2025/16-MS3_ABSTRACT-BOOK_1.pdf, p. 243-245. https://ms2025.cosmos.ru/docs/2025/16-MS3_PROGRAM_25.09.25.pdf - program. An oral presentation. 23.10.2025

Статьи и книга, представленные в 2025 году. Papers and a book submitted in 2025

534. Ипатов С.И., Cho Y-K. Спектры экзопланет, похожих на Землю, с различными периодами осевых вращений // *Астрономический вестник*. 2025. Т. 59, N 6, в печати. Ipatov S.I., Cho Y-K. Spectra of Earth-like exoplanets with different rotation periods // *Solar System Research*, 2025. V. 59, N 7. id. 83 (12 p.), DOI: 10.1134/S0038094625600234, <https://doi.org/10.1134/S0038094625600234>. <https://rdcu.be/eEdC7>.

<https://www.academia.edu/143801710>.
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full->

<https://www.academia.edu/143801624>.
<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full->

537. Ипатов С.И. *Некоторые заметки об истории СССР и России*. 2025. <https://www.litres.ru/book/sergey-ivanovich-ipatov/nekotorye-zametki-ob-istorii-sssr-i-rossii-72597838/> - <https://www.litres.ru/author/sergeyivanovich-ipatov/> - ISBN 978-5-532-89332-0, or https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/EYqt02TO9zNBn4S_4ZKJhL8Bf6yi6ZZLPUDFF2tfAjhmJA?e=p0HE76 - ISBN 978-5-6055159-0-6. (pdf file on my website). <https://1drv.ms/w/c/c67d93a65f0a2a17/EYATE3DUbPZDnIXGziD2PmQBhUzyQbtzGrixZofpvTrtOw?e=gXow8u> – это файл docx. <https://www.academia.edu/145085402>

Ipatov S.I., Horne K., Alsubai K., Bramich D., Dominik M., Hundertmark M., Liebig C., Snodgrass C., Street R., Tsapras Y., Simulator for Microlens Planet Surveys, a **poster** at “*Gravitational microlensing. 101 years from theory to practice*” (10-13 February 2013, Doha, Qatar, <http://www.astrodoha2013.org/>).

Ipatov S.I., Horne K., Alsubai K., Bramich D., Dominik M., Hundertmark M., Liebig C., Snodgrass C., Street R., Tsapras Y., Exoplanet detection capability of microlensing observations, a poster at *18th International Conference on Microlensing* (January 19-24, 2014, Santa Barbara, USA, <http://lcogt.net/microlensing18>).

Ipatov S.I., Formation and growth of embryos of the Earth-Moon system. *The 1st IUGG Symposium on Planetary Sciences* (IUGG-PS 2017) (July 3-5, 2017, Berlin, Germany), <http://www.dlr.de/iugg-ps2017>, a **poster** presentation.

Ipatov S.I., Formation of trans-Neptunian satellite systems at the stage of rarefied condensations. *The 1st IUGG Symposium on Planetary Sciences (IUGG-PS 2017)* (July 3-5, 2017, Berlin, Germany), <http://www.dlr.de/iugg-ps2017>, a **poster** presentation.

Ipatov S.I., Marov M.Ya. Migration of icy planetesimals from the feeding zones of Jupiter and Saturn to forming terrestrial planets. *The 1st IUGG Symposium on Planetary Sciences* (IUGG-PS 2017) (July 3-5, 2017, Berlin, Germany), <http://www.dlr.de/iugg-ps2017>, an **oral** presentation.

Маров М.Я., Ипатов С.И. Океаны Земли и планет земной группы: гипотезы происхождения. XXII Международная Научная конференция (Школа) по морской геологии (Москва, 20-24 ноября 2017 года). Пленарный доклад. Сайт конференции - <http://geoschool.ocean.ru/>.

Ипатов С.И., Формирование планет земной группы, Луны и спутниковых систем малых тел. Конференция “Звездообразование и планетообразование” (12–13 ноября 2019 г., Москва АКЦ ФИАН). Устный доклад.

Ипатов С.И. Миграция планетезималей в экзопланетных системах Проксима Центавра и ТРАПИСТ-1. *Всероссийская конференция "Исследования звезд с экзопланетами-2021"* Симеизская обсерватория Института астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) 24-29 октября 2021 г. Устный доклад без тезисов.
http://www.inasan.ru/scientific_activities/conferences/simeiz-2021/.

Ипатов С.И. Доклад ГЕОХИ РАН по гранту № 075-15-2020-780. *Всероссийская конференция «Исследования звезд с экзопланетами»* (23-27 ноября 2022, г. Суздаль). http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2023/01/program_2022_exo.pdf. Устный доклад.

Ипатов С.И. «Процессы миграции в Солнечной системе и в некоторых экзопланетных системах и их роль в эволюции планет». *Совещание-дискуссия «Астрономические проблемы происхождения и развития жизни. Молодое Солнце и Земля»* (ГАИШ МГУ, Москва. 19-20 марта, 2024). <http://www.sai.msu.ru/EAAS/images/marov.pdf> - программа Совещания. Устный 30 минутный

приглашенный доклад (без тезисов). <https://www.youtube.com/watch?v=7i9YFPma0U> – запись первого дня совещания-дискуссии.

Ипатов С.И. Обмен выброшенными телами между планетами земной группы и Луной. // *Современная астрономия: наука и образование 2025*. К 270-летию Московского Университета. Москва. ГАИШ. 23-27 июня 2025 г. <https://modast2025.sai.msu.ru>. Устный секционный доклад 27 июня 2025 г.

Отчеты по грантам. Grant reports

Ипатов С.И. Численное моделирование процессов формирования и эволюции солнечной системы. НИР: грант № 93-02-17035. Российский фонд фундаментальных исследований. 1993. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50542320>.

Ипатов С.И. Симпозиум п 172 международного астрономического союза "Динамика, эфемериды и астрометрия в солнечной системе. НИР: грант № 95-02-87020. Российский фонд фундаментальных исследований. 1995. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50568449>.

Ипатов С.И. Участие в Шестой международной конференции по астероидам, кометам, метеорам (asteroids, comets, meteors, АСМ96. НИР: грант № 96-02-26747. Российский фонд фундаментальных исследований. 1996. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50569204>.

Ипатов С.И. Миграция небесных тел к Земле из занептунного и астероидного поясов. НИР: грант № 96-02-17892. Российский фонд фундаментальных исследований. 1996. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50545230>.

Ипатов С.И. Миграция небесных тел к Земле из занептунного и астероидного поясов. Отчет о НИР № 96-02-17892. Российский фонд фундаментальных исследований. 1996. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=227105>.

Ипатов С.И. Участие в объединенной дискуссии по кометам и малым планетам с японскими астрономами-любителями. Эта "дискуссия" является объединением 27-ой японской кометной конференции и 13-го совещания по малым планетам. Участие в 23-ей генеральной ассамблее международного астрономического союза. Участие в международном семинаре "формирование планет". НИР: грант № 97-02-27124. Российский фонд фундаментальных исследований. 1997. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50571647>.

Ипатов С.И. Участие в конференции "The impact of modern dynamics in astronomy" ("применения современной динамики в астрономии"). НИР: грант № 98-02-26832. Российский фонд фундаментальных исследований. 1998. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50574106>.

Ипатов С.И. Миграция небесных тел в солнечной системе. НИР: грант № 98-02-30069. Российский фонд фундаментальных исследований. 2000. Издание монографии. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50530335>.

Ипатов С.И. Участие в коллоквиуме МАС п 181 и КОСПАР п 11 'Dust in the solar system and other planetary systems' ('Пыль в Солнечной системе и других планетных системах'). НИР: грант № 00-02-26614. Российский фонд фундаментальных исследований. 2000. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50576439>.

Ипатов С.И. Построение компьютерной модели происхождения и эволюции транснептунного и астероидного поясов и миграции составлявших их тел к Земле. НИР: грант № 01-02-17540. Российский фонд фундаментальных исследований. 2001. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50580936>.

Final (January 23, 2008 – January 22, 2010) report on NASA grant NNX08AG25G "Velocities and amount of material ejected at different times after the Deep Impact collision" (PI – Sergei Ipatov). https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMasDAAAAABV2Zu7RS8vVQdwtRL9jfE_Q?e=6lMlOL.

Отчет на <https://rosrid.ru>. Регистрационный номер (номер государственного учета НИОКТР) 122113000124-9. Исследования формирования экзопланетных дисков и внесолнечных планетных систем в 2022 году. Участники: М.Я. Маров, С.И. Ипатов, А.В. Русол и др.

Ипатов был руководителем московской группы ученых в гранте ИНТАС (INTAS) в 2001-2004 гг. Он был участником грантов в США в 2001-2007 гг. и National Research Council/National Academy of Sciences Senior Research Associate (May 2002 – April 2003), а также был участником катарского гранта по поиску экзопланет методом микролинзирования (Qatar National Research Fund proposal NPRP 09-476-1-078) в 2011-2013. С 2014 г. Ипатов был исполнителем в различных отчетах в ГЕОХИ РАН (годовые отчеты и отчеты по грантам).

Отчеты ИПМ и диссертации: Reports and theses

Ипатов С.И. Эволюция орбит гравитирующих частиц и проблема аккумуляции планет солнечной системы. Рук. Кандидатская диссертация, ИПМ АН СССР, 264 с., 1981, Автореферат, 18 с., 1982. <https://search.rsl.ru/ru/record/01008805386> ,

https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_1105979/.

https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008805386/ - диссертация.

Ипатов С.И. Алгоритм моделирования на многопроцессорной ЭВМ ПС-2000 эволюции диска гравитирующих тел, движущихся вокруг массивного центрального тела. Рук. Отчет ИПМ АН О-1211, 1985, 182 стр.

Ипатов С.И. и Гонсалес-Менендес Е.А. Вычислительные эксперименты на ПС-2000 для задач планетной космогонии. Рук. Отчет ИПМ АН СССР и ИПУ О-3385, 1985, 109 стр.

Ипатов С.И. Образование люка Кирквуда 5:2. Рук. Отчет ИПМ АН СССР, N 181-90, 1990, 47 стр.

Энеев Т.М., Ипатов С.И., Торопцева В.Н. Численные исследования процесса формирования и эволюции солнечной системы. Рук. Отчет ИПМ АН СССР, N 256-90, 1990, 8 стр.

Энеев Т.М., Ипатов С.И., Торопцева В.Н. Численные исследования процесса формирования и эволюции солнечной системы. Рук. Отчет ИПМ РАН, N 5-6-92, 1992, 4 стр.

Энеев Т.М., Ипатов С.И., Торопцева В.Н. Численные исследования процесса формирования и эволюции солнечной системы. Рук. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, N 5-16-93, 1993, 9 с.

Энеев Т.М., Ипатов С.И., Торопцева В.Н. Численные исследования процесса формирования и эволюции солнечной системы. Рук. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, N 5-2-94, 1994, 7 с.

Ипатов С.И. Моделирование миграции небесных тел в Солнечной системе. Рук. Докторская диссертация, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 1996, 387 с., автореферат 48 с <http://www.dissercat.com/content/modelirovanie-migratsii-nebesnykh-tel-v-solnechnoi-sisteme>.

<http://fizmathim.com/modelirovanie-migratsii-nebesnykh-tel-v-solnechnoy-sisteme>.

<http://search.rsl.ru/ru/record/01000293573>,

<https://dlib.rsl.ru/viewer/01000293573#?page=1>.

[https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-](https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYZDwAAAAAB5cPSkV4aIDOT_NdWXRWsQQ?e=3gt2C4)

[mk30ggMYZDwAAAAAB5cPSkV4aIDOT_NdWXRWsQQ?e=3gt2C4](https://1drv.ms/b/c/c67d93a65f0a2a17/ERcqCl-mk30ggMYZDwAAAAAB5cPSkV4aIDOT_NdWXRWsQQ?e=3gt2C4).

<https://elibrary.ru/item.asp?id=30198870>. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000293573/ .

https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000167189/ - диссертация.

Слайды докладов на сайтах (кроме сайтов конференций). Slides of presentations on websites

<https://ppt-online.org/659923> и <https://theslide.ru/uncategorized/nekotorye-voprosy-formirovaniya-evolyutsii-i-poiska> - Некоторые вопросы формирования, эволюции и поиска планетных систем. С.И. Ипатов. 71 слайд. Доклад в ГЕОХИ в марте 2014 года.

<https://astronomer.ru/data/0238/7-ipatov-elenin-ppt.ppt> и <https://present5.com/predlagaemye-modeli-veroyatnosti-obnaruzheniya-v-razlichnykh-oblastyakh-neba-obektyov-sblizhajushchix-s-zemlej-osnovannye-na-izuchении-migratsii-nebesnykh-tel> - Предлагаемые модели вероятности обнаружения в различных областях неба объектов, сближающихся с Землей, основанные на изучении миграции небесных тел. С.И. Ипатов, Л.В. Еленин. 21 слайд. Устный доклад на X международной конференции «Околоземная астрономия-2017» (поселок Агой, Краснодарский край, 2-6 октября 2017).

Пресс-релизы. Press releases

2023

по статье в УФН (Маров, Ипатов, 2023): Происхождение воды на Земле. <https://www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/main/65417/> (сайт МинОбрНауки), (<https://nauka.tass.ru/nauka/17261341> (ТАСС) и <https://new.ras.ru/activities/news/kommentariy-akademika-ran-mikhaila-marova-i-vedushchego-nauchnogo-sotrudnika-geokhi-ran-sergeya-ipat/> (РАН). Происхождение воды на Земле <http://portal.geokhi.ru/SitePages/News082.aspx/> Эта статья упоминалась также на <https://t.me/geokhi/897> , <http://portal.geokhi.ru/SitePages/News107.aspx> , <https://t.me/geokhi/771>, <https://t.me/geokhi/729> . <https://t.me/geokhi/734>.

Правдоподобность существующих научных теорий происхождения Луны. <http://portal.geokhi.ru/SitePages/News107.aspx>. <https://www.kommersant.ru/doc/5900105> (газета Коммерсант).

Лонгрид РИА Новости по экзопланетам: <https://ria.ru/20231030/ekzoplanety-1905699613.html>.

По статье в Астрономическом вестнике. № 3. Устойчивые орбиты в зоне питания планеты Проксима Центавра с. http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_200.aspx .
<https://new.ras.ru/activities/news/ustoychivye-orbity-v-zone-pitaniya-planety-proksima-tsentsavra-s/> .

По статье в Meteoritics and Planetary Science: http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_206.aspx - Доставка ледяных тел к внутренним планетам системы Проксима Центавра. <https://nauka.tass.ru/nauka/19184129> Ученые считают, что одна из планет системы Проксима Центавра может быть пригодна для жизни.

По разделу 2 в статье в сборнике ГЕОХИ-75: на сайте РАН - <https://new.ras.ru/activities/news/issledovaniya-v-oblasti-zvyezdno-planetnoy-kosmogonii-metodami-matematicheskogo-modelirovaniya/> на сайте ГЕОХИ - http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_226.aspx в ТГ - <https://t.me/geokhi/1514> .

По статье в № 6 Астрономического вестника 2023: <https://t.me/geokhi/1630> , http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_260.aspx, <https://new.ras.ru/activities/news/dvizhenie-planetezimalej-v-sfere-khilla-zvezdy-proksima-tsentsavra/> .

2024

<https://www.mk.ru/science/2024/05/08/uchenyy-sergey-ipatov-predlozhil-svoyu-versiyu-rosta-luny.html> - Московский Комсомолец.

<https://russian.rt.com/science/article/1268428-luna-mars-voda-intervyu-kolonizaciya>.

«Присутствие воды обязательно»: научный сотрудник ГЕОХИ РАН — о шансах на колонизацию человеком Луны и Марса.

Интервью изданию Russia Today. 7 февраля 2024. http://xn--c1aejx9a.xn--p1ai/SitePages/News_265.aspx. <https://t.me/geokhi/1935>
http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_338.aspx .

<https://www.mk.ru/science/2024/05/08/uchenyy-sergey-ipatov-predlozhil-svoyu-versiyu-rosta-luny.html> - интервью газете Московский Комсомолец. <https://t.me/geokhi/1936>.
<https://t.me/geokhi/1938> .

<https://www.kommersant.ru/doc/6743452> 02.06.2024, 12:00. «Земля и Луна погибнут вместе». Коммерсант. Интервью с математиком Сергеем Ипатовым о новой модели образования нашего спутника.

<https://poisknews.ru/astronomiya/evolyucziya-orbit-i-vodnye-resursy-zahvatyvayushhee-issledovanie-o-planetah/> 04.12.2024. Эволюция орбит и водные ресурсы: захватывающее исследование о планетах. Это заметка в газете Поиск о моей статье в журнале Solar System Research. В заметке приведена ссылка на платный журнал. Этот же текст можно бесплатно скачать с одного из нижеприведенных сайтов: <https://rdcu.be/d04Q0> , <http://arxiv.org/abs/2411.05436>, <https://www.researchgate.net/publication/385627526> или <https://www.academia.edu/125363162/>.
<https://t.me/geokhi/2411> .

<https://poisknews.ru/astronomiya/evolyucziya-orbit-i-vodnye-resursy-zahvatyvayushhee-issledovanie-o-planetah/>, <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/92482/>, <https://t.me/geokhi/2411> - Новость о моей статье опубликована 4 декабря в газете Поиск и 9 декабря 2024 на сайте Минобрнауки России.

2025

<https://www.mk.ru/science/2025/01/04/zemlya-atakovala-mars-podschitano-vozmozhnoe-chislo-zemnykh-meteoritov-na-krasnoy-planete.html> - Земля атаковала Марс: подсчитано возможное число земных метеоритов на красной планете. - интервью в газете «Московский комсомолец» 4 января 2025 г. по статье в журнале Icarus. <https://t.me/geokhi/2455> - Пресс-релиз по статье в журнале "Icarus". <https://t.me/frnved/2745> .

<https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/93451/> Ученые рассчитали вероятность столкновений фрагментов Земли с другими планетами Солнечной системы. 10.01.2025

<https://www.kommersant.ru/doc/8159218> - Спектр далекой Земли. Что можно узнать о планете по ее излучению. 28.10.2025.

<https://ria.ru/20251030/earth-2051544273.html> - Находка в недрах Земли раскрывает тайну нашей планеты. РИА Новости, 30.10.2025.

<https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/98938/> - Ученые исследовали спектры планет земного типа. Материал на сайте Минобрнауки. 31.10.2025.

Информация о С.И. Ипатове на сайте и телеграмм-канале ГЕОХИ в 2024-2025

http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_251.aspx Кроме того, на этом же сайте среди выдающихся результатов Секции №15 «Планетные исследования» на первом месте отмечены результаты М.Я. Марова и С.И. Ипатова.

<https://t.me/geokhi/1613> - Важнейшие достижения по астрономии в 2023.

http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_259.aspx - Именные астероиды ГЕОХИ РАН. - <https://t.me/geokhi/1627>.

http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_260.aspx - Движение планетезималей в сфере Хилла звезды Проксима Центавра.

http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_265.aspx - Интервью в.н.с. ГЕОХИ РАН С.И. Ипатова о возможной колонизации Луны и Марса (Russia Today).

http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_338.aspx - Рост Луны за счет тел, выброшенных с Земли.

http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_351.aspx - "Земля и Луна погибнут вместе": интервью в.н.с. ГЕОХИ РАН Сергея Ипатова "Коммерсанту".

http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_455.aspx - Миграция небесных тел в Солнечной системе и в экзопланетных системах. 10.12.2024.

http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_474.aspx - Вероятности столкновений тел, выброшенных с Земли, с планетами. 6.01.2025.

<https://t.me/geokhi/2563> - информация о моих статьях о Т.М. Эннееве на телеграмм-канале ГЕОХИ. 4.03.2025.

<https://t.me/geokhi/2815>, <https://t.me/geokhi/2818> - информации о конференции «Современная астрономия: наука и образование» (23-27 июня 2025 г., ГАИШ МГУ) <https://modast2025.sai.msu.ru>), в которой участвовал С.И. Ипатов.

<https://t.me/geokhi/3062> - информация о международной конференции EPSC-DPS2025 (8-12 сентября 2025, г. Хельсинки, Финляндия, <https://www.epsc-dps2025.eu>), в которой участвовал С.И. Ипатов. 21.09.2025.

<https://t.me/geokhi/3109> - информация о международной конференции «Solar System in Context» (29 сентября по 2 октября 2025г, Tucson, USA, <https://noirlab.edu/science/events/websites/solar-system-in-context-2025/schedule>), посвященной Солнечной системе и экзопланетным системам, в которой участвовал С.И. Ипатов. 30.09.2025.

<https://t.me/geokhi/3134>, http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_631.aspx. - эффективность поиска экзопланет методом микролинзирования (пресс-релиз по статье Ипатова в «Solar System Research»). 10.10.2025.

<https://t.me/geokhi/3183> - информация о докладах на Шестнадцатом Московском международном симпозиуме по исследованиям Солнечной системы (16M-S3). <https://t.me/geokhi/3182>. 19.10.2025.

<https://t.me/geokhi/3212>, http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_644.aspx - 31.10.2025. <https://www.kommersant.ru/doc/8159218>. - Спектры земноподобных планет с различными периодами осевых вращений. (пресс-релиз по статье Ипатова в «Solar System Research»). 30.10.2025.

<https://t.me/geokhi/3235> - комментарий к статье (<https://www.nature.com/articles/s41561-025-01811-3>) в журнале "Nature Geosciences", 01.11.2025. http://portal.geokhi.ru/SitePages/News_648.aspx - аналогичный комментарий на сайте ГЕОХИ 31.10.2025.

Информация об авторе

Сергей Иванович Ипатов - ведущий научный сотрудник Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, доктор физико-математических наук, лауреат премии РАН по астрономии им. Ф.А. Бредихина, академик Российской Академии Естественных Наук, специалист в области динамической астрономии, автор более 500 научных публикаций (среди них около 80 статей в рецензируемых научных журналах, более 100 других статей, монография и более 300 тезисов конференций). Индекс Хирша по WoS и Scopus равен 19. Более 1500 цитирований в Scopus. Основные научные интересы Ипатова С.И. связаны с изучением проблем происхождения и эволюции Солнечной системы и некоторых экзопланетных систем. Ипатов является сооткрывателем 8 астероидов. Астероид 14360 назван Ipatov в честь С.И. Ипатова. Подробнее информацию об авторе можно посмотреть на сайтах <http://siipatov.webnode.ru>, https://ru.wikipedia.org/wiki/Ипатов,_Сергей_Иванович и https://en.wikipedia.org/wiki/Sergei_Ipatov. В частности, на сайте <https://siipatov.webnode.ru/publications/> можно найти список публикаций С.И.

Ипатова (с указанием сайтов, где эти публикации лежат), а на сайте <https://siipatov.webnode.ru/link-to-albums-with-photos/> приведены интернетовские ссылки на большое число альбомов фотографий астрономов и мест, где проходили конференции, в которых участвовал Ипатов.

Sergei Ipatov

SUMMARY: A scientist with more than 50 years of experience in modeling and interpreting various physical processes. The laureate of the F.A. Bredikhin prize in astronomy of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Asteroid 14360 was named Ipatov in his honor. Analyzed images made by telescopes. Author of more than 180 refereed papers in journals and proceedings, and more than 300 other publications. The first or single author of most of these publications.

RESEARCH EXPERIENCE (excluding payment from grants via some institutions):

- V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), Leading scientist, December 2013 – present.
- Space Research Institute (Moscow, Russia), Leading scientist (part time), May 2011 – March 2017.
- Alsubai Establishment for Scientific Studies (Doha, Qatar), Researcher, August 2011 – August 2013.
- Studies of astronomical problems, February 2010 – July 2011.
- Catholic University of America (Washington, DC), Research associate, April 2008 – January 2010.
- Department of Terrestrial Magnetism of Carnegie Institution for Science (Washington, DC, USA), Research scientist, September 2006 – March 2008.
- University of Maryland (College Park, MD, USA), Research associate, January 2005 – August 2006.
- Catholic University of America (Washington, DC), Research associate, May 2004 – October 2004.
- George Mason University (VA, USA), Visiting senior research associate, May 2003 – April 2004.
- NASA/Goddard Space Flight Center (MD, USA), National Research Council/National Academy of Sciences Senior Research Associate, May 2002 – April 2003.
- George Mason University (VA, USA), Visiting researcher, July 2001 – April 2002.
- Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), Leading scientist, 1997-2001 (formally until December 2003). Senior scientist, 1990-1997. Scientist, 1987-1990. Junior scientist, 1977-1987. Probationer-investigator, 1975-1977.

Visits to scientific institutions: For one or two months, Ipatov visited Institute for Theoretical Physics of the University of California in Santa Barbara (USA) in 1992, Notre-Dame University in Namur (Belgium) in 1995, Berlin Institute of Planetary Exploration in 1996, Royal Observatory of Belgium (Brussels) in 1998, Dresden Technical University in 2001, Inst. d'Astrophysique de Paris in 2007, St-Andrews University (UK) in 2011. During 5 months' visit to the Royal observatory of Belgium in 1999, he found (with E. Elst and T. Pauwels) several new asteroids. Eight of the asteroids have gotten numbers. He made shorter trips to the Department of Terrestrial Magnetism (1990), University of London (1995), Armagh Observatory (Northern Ireland, 1995, 2000), Nice Observatory (1999), etc.

Web sites: <https://siipatov.webnode.ru/>, https://en.wikipedia.org/wiki/Sergei_Ipatov.

<https://siipatov.webnode.ru/publications/> - links to publications,

<https://siipatov.webnode.ru/link-to-albums-with-photos/> - links to albums with photos.

English annotation of this book

Formation and evolution of planetary systems / Sergei Ipatov, 2025, 132 p.

Various problems of the formation and evolution of planetary systems are studied. Most of the studies are devoted to the Solar System. The collapse of the presolar cloud and the accumulation of planets are studied. The author considers the formation of the Earth-Moon system, binary trans-Neptunian objects, and the axial rotations of planets. He discusses the formation of asteroid and trans-Neptunian belts, including the evolution of resonant asteroid orbits and the formation of the Kirkwood gaps in the asteroid belt. The book discusses the migration of bodies during the formation of the Solar System and at present, including a discussion of the delivery of icy bodies from beyond the ice line to the terrestrial planets and the formation of craters on the Moon. The Deep Impact mission is discussed; during this mission the impact module of the spacecraft collided with the comet Tempel 1. The book studies the migration of dust in the Solar System and the formation of the zodiacal belt, as well as the migration of bodies and dust particles ejected from the terrestrial planets and the Moon. The author considers the migration of bodies in some exoplanetary systems (Proxima Centauri, Trappist 1, and Gliese 581), the spectra of Earth-like exoplanets with different rotation periods, as well as the efficiency of exoplanet searches using microlensing observations with various telescopes. English text is only in the list of publications and in the contents. An English reader can look the contents to find an interesting section. In this section he can find the numbers for relative publications. Using these numbers and the list of

publications, he can find the websites where he can upload free files with these publications, and then he can read relevant papers in English and can get more detailed information than in this book.

Отзыв рецензента о книге С.И. Ипатова «Формирование и эволюция планетных систем»

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/



Кусков Олег Львович
Колмыковой Людмила Игоревна
Евстигирев Н.Б.
К.г.-м.н. 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 космическим аппаратом Дип Импакт (Deer Impact)	51
17. Выброс вещества с кометы 9P/Темпеля 1 после столкновения ударного модуля космического аппарата Дип Импакт с этой кометой	52
18. Наблюдения астероидов и комет	55
19. Модели для определения вероятности обнаружения в различных областях неба объектов, сближающихся с Землей	56
ЭКЗОПЛАНЕТЫ	
20. Спектры экзопланет, похожих на Землю, с различными периодами осевых вращений	57
21. Эффективность поиска экзопланет методом микролинзирования при использовании различных телескопов	60
22. Миграция тел и пыли в экзопланетной системе Проксима Центавра	63
23. Миграция тел в экзопланетной системе ТРАППИСТ-1	70
24. Миграция тел в экзопланетной системе Глизе 581	72
НЕАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ	
25. Минимизация числа переходов при трассировке двухслойных микросхем	76
26. Исследования генерации акустических волн под воздействием флюидов на стенки пор и их распространения в пористой среде с флюидами и газом	76
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ С.И. ИПАТОВА (LIST OF PUBLICATIONS BY S.I. IPATOV)	
Статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в WoS и Scopus. Papers in the journals indexed in WoS and/or Scopus	77
Статьи в рецензируемых журналах, индексируемых только в РИНЦ. Papers in the journals which are not indexed in WoS or Scopus	84
Монография (monograph in Russian)	85
Разделы в монографиях (Sections in monographs)	85
Нежурнальные публикации в научных сборниках и периодических научных изданиях, индексируемые в WoS и/или Scopus. Non-journal publications indexed in WoS and/or Scopus.	86
Публикации в научных сборниках и периодических научных изданиях, неиндексируемые в WoS или Scopus. Non-journal publications non-indexed in WoS or Scopus	91
Публикации в материалах научных мероприятий (не менее трех страниц). Publications in materials of scientific meetings (not less than 3 pages).	91
Препринты Института Прикладной Математики. Preprints of Institute of Applied Mathematics.	99

Тезисы конференций и другие небольшие публикации (1-2 страницы). Abstracts of conferences and other small publications (1-2 pages)	101
Статьи и книга, представленные в 2025 году. Papers and a book submitted in 2025	123
Стендовые и устные доклады без тезисов. Posters and oral presentations without abstracts.	124
Отчеты по грантам. Grant reports.	124
Отчеты ИПМ и диссертации: Reports of Keldysh Institute and theses	125
Слайды докладов на сайтах (кроме сайтов конференций). Slides of presentations on websites	126
Пресс-релизы. Press releases	126
Информация о С.И. Ипатове на сайте и телеграмм-канале ГЕОХИ в 2024-2025. Information about S.I. Ipatov on the website and telegram chanel of GEOKHI	127
Информация об авторе. Information about the author	128
English annotation of this book	129
Отзыв рецензента о книге. Reviewer's review about the book	130