

УДК 523.44

Образование Луны и двойных астероидов

Н.Н. Горькавый

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный.

Аннотация. Предлагаемая мульти-импактная модель объясняет образование Луны, Харона и двойных астероидов без космических катастроф. Основные положения новой модели: 1. Вокруг прото-Земли существовал начальный маломассивный протоспутниковый диск с прямым вращением. 2. Большинство лунного материала было выброшено из земной мантии с помощью многочисленных ударов крупных астероидов. Это объясняет дефицит железа на Луне. 3. Столкновения земной эжекты с частицами прямого протоспутникового диска стабилизируют обломки на спутниковых орбитах. Мы показали высокую эффективность мульти-импактного механизма: земная эжекта, обладающая прямыми орбитами, легко присоединяется к прямому протоспутниковому диску, а обратная эжекта возвращается на Землю.

THE ORIGIN OF THE MOON AND BINARY ASTEROIDS by *Gorkavyi N.N.* Proposed multi-impact model explains the origin of the Moon, the Charon and binary asteroids without space catastrophes. Basic statements of the new model: 1. Initial low-mass prograde protosatellite disk existed around the proto-Earth. 2. Most of Moon' material was ejected from the Earth's mantle under the influence of large asteroids. This explains deficit of iron on the Moon. 3. Collisions of Earth' eject with particles of prograde protosatellite disk stabilize debris on satellite orbits. We showed high efficiency of multi-impact mechanism: Earth's eject on prograde orbits easy joins prograde protosatellite disk, but retrograde eject returns to the Earth.

Ключевые слова: Луна, спутники астероидов, солнечная система.

1 Введение

Проблема возникновения Луны висит над головой мыслителей с незапамятных времен. Описание первых научных моделей лунной космогонии можно найти в книгах Рускол и Рингвуда (Рускол, 1975; Рингвуд, 1982). Рускол развила аккреционную теорию образования Луны из околоземного протоспутникового диска, накопленного из частиц, захваченных с гелиоцентрических орбит (Рускол, 1975). Такая модель применима к формированию ряда спутников Солнечной системы, но для Луны она встречается с двумя серьезными проблемами: а) неэффективность аккреционного механизма для объяснения большой относительной массы Луны (1/81 массы планеты, что в 1975 году было рекордом для Солнечной системы); б) непонятность химического состава Луны, например, низкой плотности (3.3 г/куб.см) и дефицита железа (13%

FeO). Большинство полагает, что, согласно аккреционной теории, Луна должна быть подобна Земле, имеющей плотность 5.5 г/куб. см и среднее содержание железа 31% FeO.

Хартманн и Дэвис в 1975 году предложили для объяснения уникальной массивной Луны уникальный способ её образования: с помощью мегаимпакта, в ходе которого планета размером с Марс налетела на Землю по квази-касательной траектории (сейчас рассматривают даже более крупные ударники: в современных расчетах масса налетающей планеты достигает ~ 1/2 от массы прото-Земли (Камерон, 2000)). Одним из результатов этой катастрофы стало возникновение массивного протолунного диска с большим угловым моментом. Таким образом, диск, а потом и спутник, сформировался из земной мантии, имеющей ту же плотность, что и Луна. Полагают, что это решает проблему обеднённости Луны железом, так как кора и мантия Земли имеют пониженное содержание железа (8% FeO) из-за его концентрации в расплавленном земном ядре, где FeO составляет 85%.

За прошедшие 30 лет модель “мегаимпакта” получила широкое распространение и одобрение, хотя одновременно стали накапливаться факты, противоречащие этой модели (см. сборник “Образование Земли и Луны”, 2000).

Во-первых, спутник Плутона – Харон, открытый в 1978 году и оказавшийся по массе в 1/8 от планеты, показал, что ничего уникального в массивной Луне нет. Неужели катастрофический – и довольно маловероятный – механизм образования спутника реализовался сразу для двух планет Солнечной системы? Даже если ответить утвердительно на такой вопрос (Кануп, 2004), то остается проблема совершенно не уникальной, а вполне массовой (порядка 10%) двойственности малых планет с твердой поверхностью – астероидов и транснептунов. Существование спутников и даже целых спутниковых систем возле столь маломассивных тел является одним из самых примечательных и загадочных феноменов Солнечной системы, в изучение которого ученые КрАО внесли фундаментальный вклад (Прокофьева и др. 1995, Прокофьева-Михайловская, 2006). В 1994 году был сфотографирован первый спутник астероида (Ида), в 2005 году обнаружен первый тройной астероид (Сильвия), а у Плутона к 2006 году, кроме Харона, найдено ещё два небольших и более удаленных спутника. Отметим, что применение модели мегаимпакта к происхождению Харона требует уже крайне маловероятного (тем более – тщательно подобранного по прицельному расстоянию) соударения равных по массам планет (Кануп, 2004).

Во-вторых, против модели мегаимпакта были выдвинуты динамические возражения, связанные с тем, что удар тела, размером с Марс, должен привести к большому эксцентриситету орбиты Земли (Боярчук и др. 1998). В ответ сторонники мегаимпакта выдвигают лишь качественные аргументы о возможном диссипативном уменьшении эксцентриситета планеты в среде планетезималей.

В-третьих, против теории мегаимпакта выступили геохимики с многочисленными аргументами. Из катастрофической модели мегаимпакта можно сделать следующие геохимические выводы (Джоунс и Пальм, 2000):

- а) Луна должна иметь примерно такой же химический состав, как и мантия Земли;
- б) Луна не должна иметь ядра;
- в) Луна, полученная из Земли, должна быть моложе Земли;
- г) следствием мегаимпакта должно быть расплавление Луны и Земли. Тем самым, на Земле и Луне должен был существовать океан жидкой магмы;
- д) обеднение Луны летучими элементами является следствием разогрева земного вещества при мегаимпакте.

В реальности же, по данным геохимиков получается следующая картина (Джонс и Пальм, 2000):

- а) химический состав у Луны заметно отличается от земного. В частности, концентрация железа в Луне оказалась в 1.5-2 раза больше, чем в мантии Земли;
- б) у Луны есть значительное ядро (1-3% по весу или 300-400 км радиусом, что составляет около 20% от радиуса Луны – 1738 км) (см. также Худ и Жубер, 2000);

в) Луна оказывается старше Земли, или, точнее, ядро Луны образовалось раньше, чем ядро Земли;

г) Луна была сравнительно холодной и имела лишь частичное затопление магмой (см. также Притчард и Стивенсон, 2000; Снайдер и др. 2000). Геохимические данные отвергают также наличие океана расплавленной мантии на Земле. Например, современная мантия Земли дифференцирована заметно слабее, чем было бы при существовании древнего океана расплавленной магмы;

д) содержание летучих элементов на Луне не свидетельствует в пользу модели мегаимпакта – их содержание нельзя получить из земной мантии при нагреве;

Под давлением геохимических аргументов, ряд ученых (Джонс и Пальм, 2000) высказываются в пользу образования Луны из околоземного протоспутникового диска, созданного аккреционным механизмом, а не мегаимпактом.

Спудис отмечает, что модель мегаимпакта имеет слишком много свободных параметров, что резко снижает её научную и прогностическую ценность (Спудис, 1996). Доводы против мегаимпакта обсуждаются и в обзоре Стюарта (Стюарт, 2000). Тем не менее, модель мегаимпакта продемонстрировала свою успешность или удовлетворительность на ряде проблем образования Луны, обросла последователями и набрала инерцию парадигмы.

2 Мульти-импактная модель

Автор (Горькавый, 2004) рассмотрел новый подход к образованию Луны, Харона и двойных астероидов: мульти-импактную модель, которая сохраняя всё достижения модели мегаимпакта, избавляет её от катастрофичности, маловероятности и геохимических проблем. Модель мультиимпактности во многом близка к классической аккреционной теории образования Луны, решая проблемы недостаточной её эффективности и несоответствия химического состава Луны и Земли. Идея не одного мегаимпакта, а многих “макроимпактов” для образования Луны затронула ранее Рускол (Рускол, 1986).

Главной особенностью предлагаемой модели является отказ от предположения одного мегаудара и переход к концепции множества более мелких соударений, которые, тем не менее, работают сходным образом, выбивая мантийное вещество с планеты на околопланетные орбиты. Естественно, возникает вопрос об удержании этого вещества на орбите – ведь, следуя закону Кеплера и задаче двух тел, эжекта, выброшенная на орбиты с эксцентриситетом >1 улетает насовсем, а при эксцентриситете меньше 1 – должна снова выпасть на планету в течение одного оборота. Именно для решения этой проблемы в теории мегаимпакта потребовалось наличие марсоподобного ударника, который настолько массивен, что нарушает условие задачи двух тел и позволяет удержать на стабильной спутниковой орбите небольшую часть выброшенного вещества. В мульти-импактной модели в решении проблемы орбитальной стабильности помогает второй принципиальный элемент системы – затравочный маломассивный спутниковый протодиск вокруг планеты, образование которого детально рассмотрено в аккреционной модели (Рускол, 1975). Итак, бомбардировка Земли миллионами крупных астероидов, размером 10-1000 км, и выброс огромного количества вещества в космос не может образовать Луны, так как все эжектированные частицы падают назад, на планету, или уходят на гелиоцентрические орбиты. Протоспутниковый диск, формирующийся из частиц с гелиоцентрических орбит, тоже не может образовать наблюдаемую Луну из-за своей малой массы. Рассмотрим суммарную эффективность этих двух факторов, плохо работающих по отдельности, и покажем, что их взаимодействие приводит к новому успешному механизму образования Луны, обладающему позитивными особенностями обеих “родительских” моделей и не имеющему их проблем.

Рассмотрим следующую плоскую задачу для случая Земли:

- Эллиптическая траектория частицы эжекты пересекает круговую орбиту спутниковой частицы в восходящей ветви (точка А) и в нисходящей ветви (точка В) – см. рис. 1.

- Большая полуось и эксцентриситет пересекающихся орбит заданы, поэтому мы легко можем найти в точках А и В азимутальную и радиальную компоненты скорости каждой частицы (радиальная компонента скорости спутниковой частицы равна нулю).

- Соударение двух частиц образует облако обломков, центр масс которых будет двигаться от точки соударения со скоростями, которые определяются из закона сохранения импульса (при заданном отношении массы частицы эжекты и массы спутниковой частицы).

- Зная скорость центра масс обломков, находим большую полуось и эксцентриситет его траектории и анализируем:

1. Выпадают ли обломки на поверхность планеты или остаются на стабильной спутниковой орбите?

2. Как меняется орбита обломков в зависимости от отношения масс? От параметров начальной орбиты эжекты? От радиуса круговой орбиты спутниковой частицы?

3. Каков интегральный эффект взаимодействия постоянного потока эжекты и протолунного диска? Сохраняет ли он свою орбитальную стабильность? Уменьшает или увеличивает диск свою массу под воздействием эжекты с планеты?

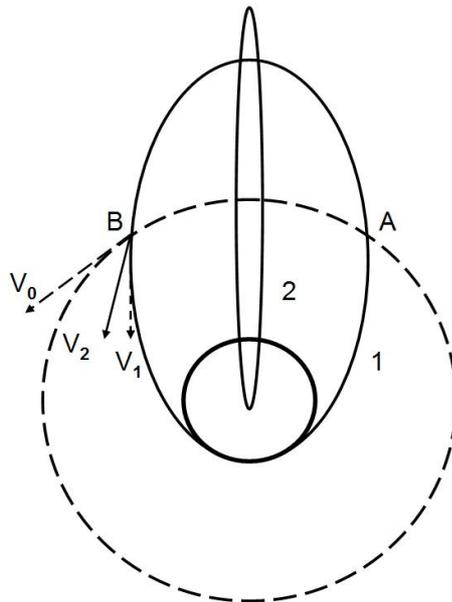


Рис. 1. Две орбиты эжекты (1 и 2), пересекающие круговую орбиту частицы протоспутникового диска (штриховая линия). Орбита 1 - касательная к поверхности, орбита 2 соответствует отрыву эжекты, близкому к вертикальному к поверхности планеты. При соударении частицы эжекты со скоростью V_1 с частицей диска со скоростью V_0 образуется облако обломков со скоростью центра масс V_2

Все уравнения вышеописанных процессов аналитические и легко решаются в рамках задачи двух тел (влиянием Солнца и эффектом вращения Земли пренебрегаем). Как легко получить из уравнений для большой полуоси и эксцентриситета (Рой, 1981), эти параметры орбит обломков зависят только от квадрата скорости частицы, поэтому они будут совершенно одинаковы в точках А и В.

Что происходит, когда частица эжекты выбрасывается в окрестность Земли, окруженной протоспутниковым диском прямого вращения? Существует три основных сценария судьбы эжекты с $e < 1$:

1. Эжекта не взаимодействует с частицами диска, поэтому снова падает на Землю;

2. Эжекта обратного орбитального вращения взаимодействует с частицами прямого диска, поэтому наверняка падает на Землю, унося с собой частицу диска, если её масса меньше или сравнима с частицей эжекты;

3. Эжекта прямого орбитального вращения взаимодействует с частицами прямого диска, поэтому с большой вероятностью переходит на стабильную спутниковую орбиту, изменяя плотность диска в этом месте.

Считаем, что эжекта симметрична – то есть на какое-то количество частиц, выброшенных с поверхности планеты на прямые околопланетные орбиты, приходится такое же количество частиц, выброшенных на обратные орбиты. Полагаем, что взаимодействие обратной эжекты с частицей протоспутникового диска, обладающего прямым вращением, приводит к падению обломков на планету, тем самым обратная эжекта приводит к безусловной убыли массы диска. Результат взаимодействия прямой эжекты с частицами диска приводит к уничтожению частицы диска на данной орбите и переносу её вместе с частицей эжекты (в виде облака обломков) на новую орбиту.

Задачами данной работы являются:

- анализ отдельных орбит обломков в зависимости от начальных значений задачи;
- рассмотрение распределения сотен миллионов облаков обломков по большим полуосям и анализ изменения массы диска из-за обстрела частицами эжекты и перемещения облаков обломков.

3 Результаты расчетов

Рассмотрим эжекту со значительным эксцентриситетом $e = 0.97$, большой полуосью 212,600 км и перицентром $a(1-e)$, совпадающим с поверхностью Земли ($R = 6,378$ км), что соответствует касательному выбросу частиц. Пусть эжекта пересекает круговой протоспутниковый диск и сталкивается с его частицами. Получим параметры орбиты получающегося облака обломков, принимая две величины отношения масс спутниковой частицы к частице эжекты: 10 и 100. То есть мы рассматриваем предельный случай очень тяжелых частиц эжекты и легких спутниковых частиц. Очевидно, что облако обломков будет иметь эксцентриситет между 0 и 0.97 и, видимо, перицентр, который будет больше начального из-за своей чувствительности к значению эксцентриситета. Величина перицентра облака обломков есть критическая величина – достаточно увеличить перицентр обломков на несколько процентов от начального и обломки уже не выпадут на Землю, а останутся на стабильной спутниковой орбите. Это позволит им постепенно, при последующих соударениях с частицами диска и друг с другом, присоединиться к круговому диску.

На рис. 2 показаны графики перицентра облака обломков в зависимости от радиуса круговой орбиты спутниковой частицы, участвовавшей в столкновении. Видно, что подавляющее большинство частиц эжекты, даже с массой в 100 раз превосходящей массу спутниковой частицы, поднимают свой перицентр над атмосферой Земли и остаются на стабильной орбите. На рис. 3 и 4 показаны эксцентриситет и большая полуось облака обломков как функция радиуса орбиты спутниковой частицы.

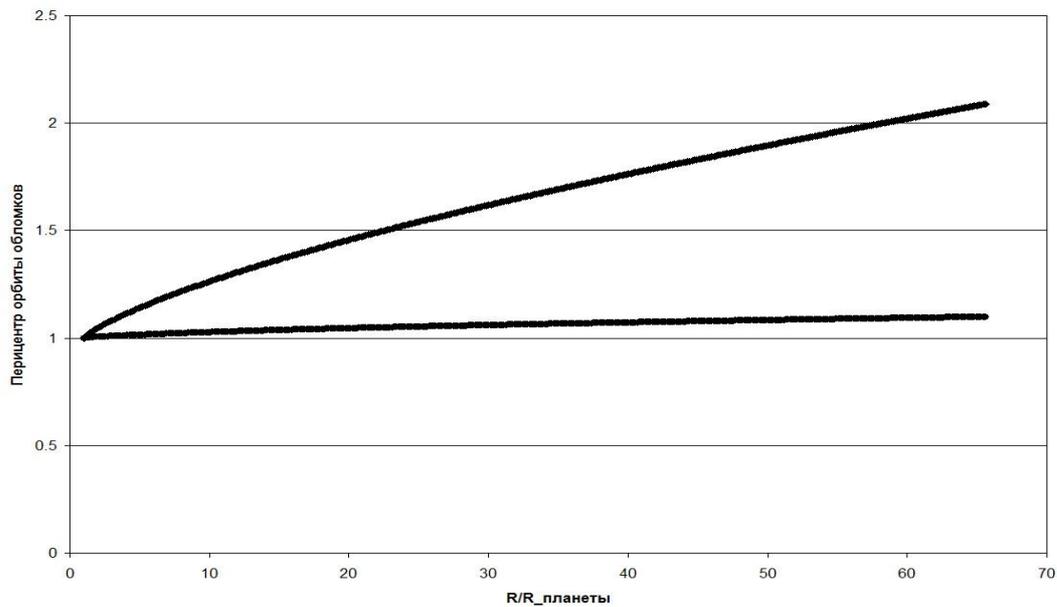


Рис. 2. Перицентр орбиты облака обломков после соударения эжекты с частицей диска как функция радиуса орбиты частицы диска. Эжекта имеет большую полуось орбиты 212,600 км и эксцентриситет 0.97. Верхняя кривая соответствует массе частицы эжекты в 10 раз больше массы частицы диска, нижняя кривая – в 100 раз больше

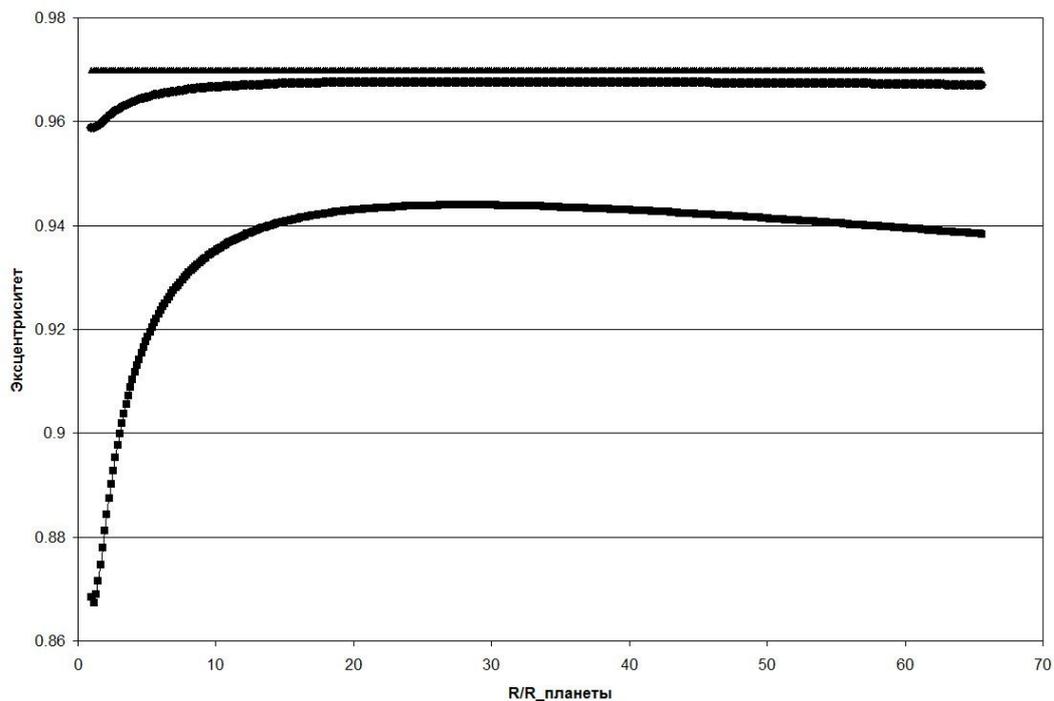


Рис. 3. Эксцентриситет орбиты облака обломков после соударения эжекты с частицей диска как функция радиуса орбиты частицы диска, с которой произошло соударение. Эжекта имеет большую полуось орбиты 212,600 км и эксцентриситет 0.97 (самая верхняя прямая линия). Верхняя кривая соответствует массе частицы эжекты в 100 раз больше массы частицы диска, нижняя кривая – в 10 раз больше

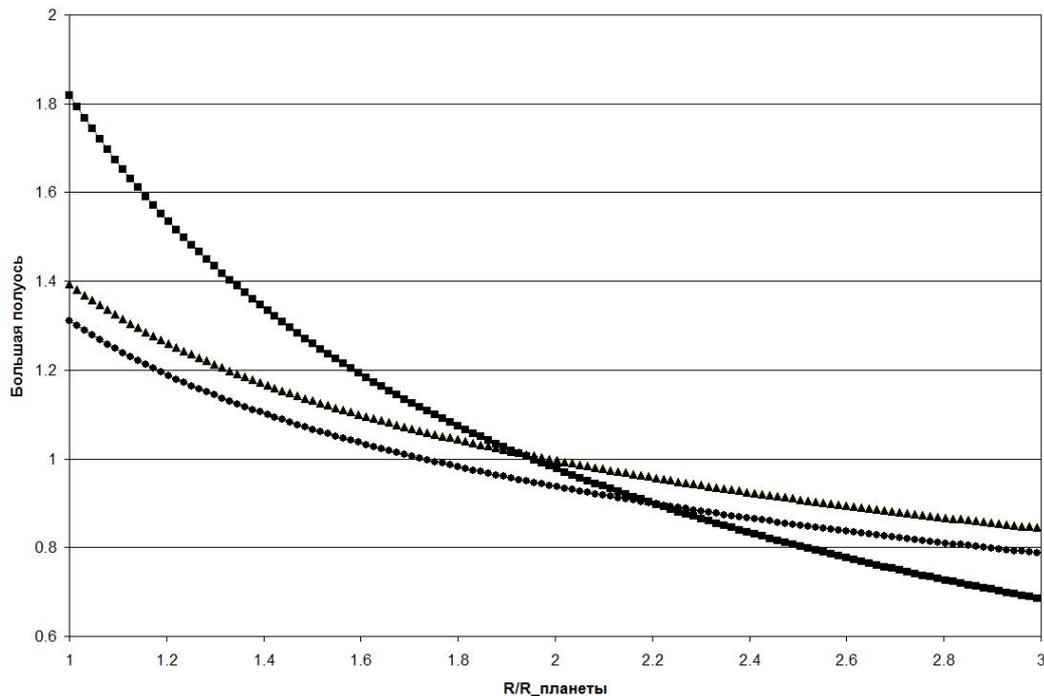


Рис. 4. Изменение большой полуоси орбиты облака обломков относительно большой полуоси орбиты частицы диска как функция орбитального расстояния от планеты. Отсутствие изменений соответствует 1. Кривая с кружками отвечает эжекте с большой полуосью орбиты 12,756 км, эксцентриситетом 0.5 и отношением масс к частице диска равным единице. Кривая с треугольниками соответствует эжекте с большой полуосью орбиты 15,945 км, эксцентриситетом 0.6 и отношением масс равным единице. Кривая с квадратами - эжекта с большой полуосью 12,756 км, эксцентриситетом орбиты 0.5 и отношением масс к частице диска равным 10 (частица эжекты тяжелее)

Большая полуось облака обломков меняется в зависимости от орбитального расстояния до точки соударения и от параметров орбиты эжекты (на рис. 4): эжекта отталкивает, увеличивая большую полуось, близкие частицы диска от планеты и приближает, уменьшая полуось, более далекие частицы, тем самым возникает пик преимущественной концентрации орбит обломков. (Аналогичный эффект аналитически и численно был исследован для пылевой эжекты в кольцах Урана (Фридман и Горькавый, 1999)). Это отталкивание усиливается, если мы увеличиваем эксцентриситет и большую полуось орбиты эжекты (сохраняя касательность орбиты к поверхности Земли), или большую массу частиц эжекты. Этот эффект снимает вопрос о возможном выпадении протоспутникового диска на планету из-за обстрела его эжектой: на самом деле, эжекта с достаточным эксцентриситетом сообщает диску дополнительный угловой момент. Этот эффект сохраняется при широких вариациях начальных параметров и, в частности, наблюдается и при отказе от предположения касательности начальной траектории эжекты.

В рамках предположений, описанных в предыдущем разделе, рассмотрим эволюцию протоспутникового диска однородной поверхностной плотности, с радиусом превосходящим радиус Земли на 100 тыс. км. На рис. 5 показаны кривые роста и деградации этого диска из-за обстрела эжекты (как прямой, так и обратной). Рассмотрено 1000 различных значений масс частиц эжекты от 0.1 до 10 по отношению к массе частиц диска, взятой за 1. Число частиц обратно пропорционально массе. Рассмотрены 1000 орбит диска (с шагом в 100 км) с разными радиусами и 400 орбит эжекты с эксцентриситетами, распределенными равномерно от почти круговой до 1. Все орбиты эжекты – касательные к поверхности Земли, поэтому большие полуоси берутся соответствующие этому условию. Вероятность взаимодействия эжекты с каждой орбитой диска была выбрана условно в 1%. Всего рассмотрено 400 млн. траекторий облаков

обломков. Предполагаем, что облако обломков дает вклад на орбиту диска с радиусом, равным большой полуоси орбиты облака, то есть его среднему расстоянию от планеты.

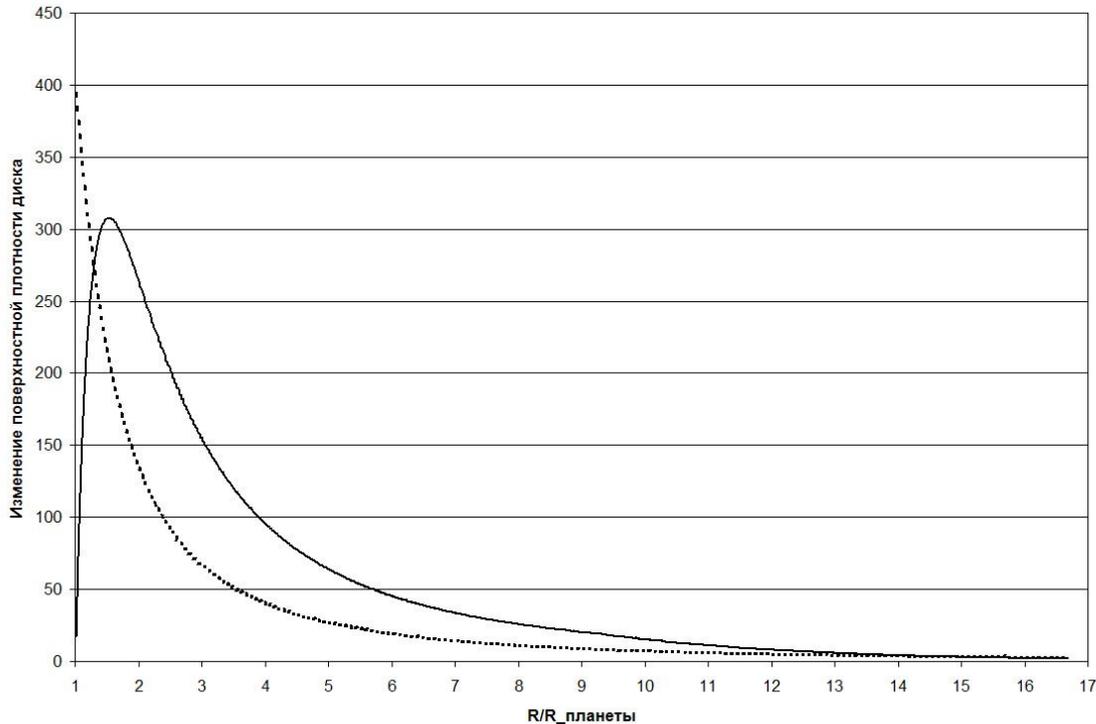


Рис. 5. Изменение поверхностной плотности протоспутникового диска вследствие взаимодействия с эжектой, выброшенной с Земли. Начальный диск с размером в 100 тысяч километров от поверхности Земли предполагается с постоянной поверхностной плотностью. Штрихованная кривая — скорость уменьшения поверхностной плотности диска из-за взаимодействия с эжектой (как прямой, так и обратной), сплошная кривая — скорость увеличения поверхностной плотности диска из-за присоединения прямой эжекты. Почти на всём протяжении диска (за исключением самых внутренних и самых дальних областей) увеличение плотности диска доминирует над уменьшением.

Видно, что самые близкие к планете части протоспутникового диска вымирают (из-за смещения частиц наружу и выпадания на планету), зато во всей остальной части диска мы наблюдаем уверенный рост диска, доминирующий над убыванием (за исключением самой дальней, краевой части диска). Рост диска идет за счет прямой эжекты, компенсирующей убыль диска из-за обстрела обратной эжектой, тем самым, рассмотренный механизм осуществляет эффективный отбор вещества, эжектированного с поверхности планеты на орбиты с прямым обращением, совпадающим с направлением обращения протолунного диска. Результаты качественно не меняются при значительных вариациях закона распределения частиц эжекты по размерам. Скорость аккреции спутников из протоспутникового диска может быть очень большой и не исключен сценарий, что диск быстро теряет свою плотность и способность взаимодействовать с эжектой. В таком случае, вокруг планеты может остаться лишь небольшая внутренняя часть диска, соответствующая планетным кольцам, аккреция которых в спутник ограничена большими столкновительными скоростями частиц в диске (Горькавый и Фридман, 1994). На рис. 6 рассмотрен вариант, когда эжекта взаимодействует лишь с небольшим диском, простирающимся над поверхностью Земли на 10 тыс. км. Мы видим, что принципиальные особенности эволюции диска - вымирание плотности возле планеты и её рост на всех других расстояниях - сохраняется. В отличие от условия расчета, представленного на рис. 5, на рис. 6 шаг между 1000 орбит начального диска был выбран в 10 км, а распределение облаков обломков проводи-

лось на пространстве в два раза большем – в 20 тыс. км над поверхностью Земли (2000 орбит). Всего рассмотрено 400 млн. траекторий облаков обломков.

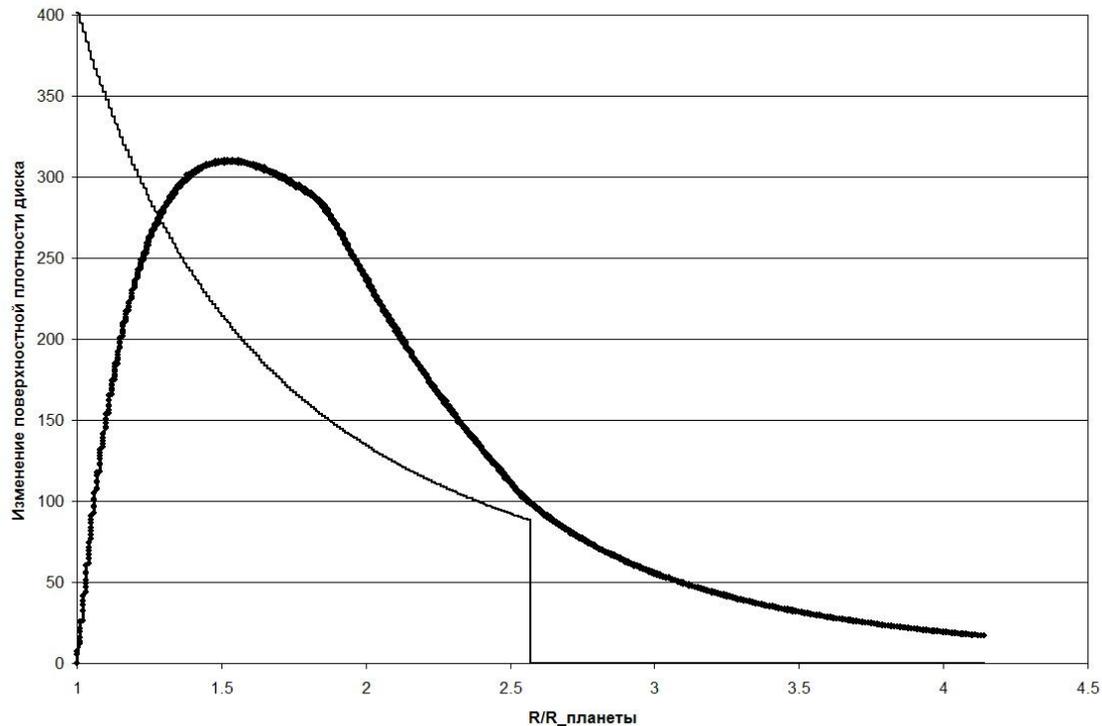


Рис. 6. Изменение поверхностной плотности протоспутникового диска вследствие взаимодействия с эжектой, выброшенной с Земли. Начальный диск с размером в 10 тысяч километров над поверхностью Земли предполагается однородным. Тонкая кривая – скорость уменьшения поверхностной плотности диска из-за взаимодействия с эжектой (как прямой, так и обратной), толстая кривая – скорость увеличения поверхностной плотности диска из-за присоединения прямой эжекты. Наилучшие условия для образования спутника создаются в зоне, расположенной сразу за планетными кольцами: в данном расчете - на расстоянии 2.5-3 радиусов Земли.

Эти расчеты убедительно показывают динамическую эффективность предлагаемого механизма образования Луны.

4 Общий сценарий происхождения спутниковых систем Солнечной системы

С нашей точки зрения, в Солнечной системе существует два основных типа спутниковых систем и два соответствующих механизма образования этих систем. Спутниковые системы разных планет можно поделить на две группы в соответствии с отношением средней орбитальной скорости к скорости убегания с поверхности планеты:

Планеты-гиганты, для которых орбитальная скорость в 3-5 раз меньше скорости убегания:

Юпитер – 0.22, Сатурн – 0.27, Уран – 0.32, Нептун – 0.23

Планеты земной группы, для которых орбитальная скорость в 3-11 раз больше скорости убегания: Меркурий - 11.3, Венера - 3.4, Земля – 2.7, Марс – 4.8, Плутон – 3.7

К этой же группе относятся и все транснептуны, астероиды и кометы.

С точки зрения динамики разделение планет на две группы соответствует разным отношениям типичных скоростей удара тел о планету и необходимой скорости для выброса возмож-

ной эжекты с этой планеты. Скорости движения газа и твердых тел относительно планеты пропорциональны орбитальной планетной скорости и, хотя и меньше, но сравнимы с ней.

4.1 Спутниковые системы планет-гигантов

Всё вещество, падающее с гелиоцентрических орбит на планету-гигант, присоединяется к планете при условии любого контакта с её поверхностью. Приходящее с гелиоцентрических орбит вещество – как газ, так и твердые тела – может не только выпасть на планету, но и способно оставаться на спутниковых орбитах при удачном взаимодействии не с планетой, а само с собой. Этот процесс аккреционного образования детально описан Рускол (Рускол, 1975). Типичная масса спутниковой системы планеты-гиганта составляет 0.0001-0.0002 от массы планеты и содержится в обычно регулярных массивных спутниках, типа галилеевских спутников.

Малые и нерегулярные внешние спутники планет-гигантов выглядят весьма отличными от внутренних спутников-тяжеловесов, но их появление тоже связано с квази-аккреционным захватом частиц и астероидов с гелиоцентрических орбит. Горькавым и Тайдаковой в серии статей 1993-1995 (см. Горькавый и Тайдакова, 1995) показано, что взаимодействие налетающих с гелиоцентрических орбит твердых тел с протоспутниковым диском может объяснить образование групп нерегулярных спутников – как прямых: группы Гималии, Нереиды, так и обратных: группы Пасифэ, Фебы и даже массивного обратного Тритона. В статье 1995 года сделано предсказание о наличии у Сатурна еще неоткрытой, самой внешней группы обратных спутников. Расчеты 256 тысяч облаков обломков в задаче трех тел (обломки-Сатурн-Солнце) показывали, что радиус зоны обратных спутников начинается от 19 млн. км с пиком накопления около 25-26 млн. км. В 1997-1998 году автор вместе с японскими астрономами предпринял попытку включить в программу нового телескопа “Субару” поиск внешних спутников Сатурна. Попытка не удалась, но в 2000 году предсказанная группа внешних обратных спутников Сатурна была открыта Гладманом и др. с помощью заметно меньших телескопов. К 2006 году в зоне от 18.4 до 23 млн. км обнаружено 16 обратных спутников; для наблюдения этих спутников используется и телескоп “Субару”. По модельным расчетам (Горькавый и Тайдакова, 1995) обратная Феба (12.9 млн. км) должна быть, наоборот, окружена прямыми спутниками. К 2006 году, в зоне вокруг Фебы - от 11.1 до 18 млн. км – открыто 8 прямых спутников и всего один обратный. Горькавый и Тайдакова (2002) в январе 2002 года обсудили совпадение теоретических и наблюдательных результатов по нерегулярным спутникам Сатурна и на основании модели 1995 года сделали дополнительный вывод о том, что возле Нептуна существует группа многочисленных неоткрытых спутников за орбитой Тритона (>0.5 млн. км). Было указано, что в этой зоне спутники с прямым обращением должны быть смешаны с более многочисленными обратными спутниками. Об открытии такой группы спутников Нептуна астрономами под руководством Хольмана-Кавелаарса была объявлено несколькими месяцами позже в 2002 году. К 2006 году в зоне 15.7-48.4 млн. км были обнаружены 2 прямых спутника Нептуна и 3 обратных.

Таким образом, ход образования спутниковых систем планет-гигантов в общих чертах понятен и хорошо описывается аккреционной моделью в различных вариантах.

4.2 Спутниковые системы планет земной группы и астероидов

Для небольших планет с твердой поверхностью реализуется иной механизм образования спутников, в котором, кроме классической аккреции, рост диска во многом определяется потоком вещества, выброшенного с поверхности планет. Действительно, представим себе предельный случай небольшого астероида. Скорость его орбитального движения и относительные скорости метеоритов в окрестности астероида составляют многие километры в секунду, что значительно превосходит скорости пуль и снарядов. Скорости же движения спутников на орбитах вокруг астероида – всего считанные метры в секунду. Для того, чтобы захватить прилетающее из космоса вещество на свою спутниковую орбиту, астероид должен уменьшить скорость дви-

жения частицы-гостя в тысячи раз. Он может сделать это только одним способом – подставив для разрушения свою поверхность. Тогда микрометеорит, врезавшись в рыхлый реголит на поверхности астероида, погасит свою скорость и отдаст всю энергию окружающему веществу, гораздо большему по объему, чем сам налетевший метеорит. Часть реголита безвозвратно улетит в пространство, но часть эжекты будет обладать вполне умеренными скоростями и, после взаимодействия с облаком или диском протоспутниковых частиц вокруг астероида, останется на стабильной спутниковой орбите, тем самым увеличив массу протоспутникового облака. Астероид даже может разрушаться в ходе такой бомбардировки, но, жертвуя собственным веществом, он выращивает спутниковый диск настолько, что тот сможет образовать квазисферический спутник на круговой орбите, близкой к экватору астероида, – в соответствии с канонами аккреционной теории.

Последующий микрометеоритный обстрел астероида уже приводит к росту массы не диска, а уже сформировавшегося спутника и, благодаря симметрии прямой и обратной эжекты, к торможению орбитального движения компонентов астероида. При определенных условиях спутник может затормозиться и соединиться с главным телом, образовав гантелеобразное тело. Обмен веществом между компонентами двойного астероида может привести и к сравнимости их масс. Образование ещё одного спутника на внешней орбите вокруг такого двойника вполне логично. Третье тело может вырасти и, испытав аналогичную эволюцию, затормозиться и присоединиться к уже слипшейся паре тел. Так, видимо, образовалось тройное тело астероида 9969 Braille (см. Прокофьева-Михайловская, 2006). При сильных ударах извне возможен и рост эксцентриситета спутника, что наблюдается у некоторых транснептунов. Быстрое вращение центрального тела должно способствовать росту прямого спутникового диска и успешному формированию спутника. Наблюдения подтверждают корреляцию скорости вращения центрального тела и наличия у него спутника, а также регулярный характер спутниковых систем у астероидов, в частности, прямое вращение спутников (Гафтонюк и Горькавый, 2005).

Полагаем, что спутниковая система Марса - Фобос и Деймос - образовалась аналогично спутникам астероидов. Фобос расположен на расстоянии 2.76 радиуса Марса – практически очень близко к зоне планетных колец и области самого эффективного накопления эжекты (см. рис. 6). Отметим, что при плотности Марса в 3.94 г/куб. см плотность Фобоса – 1.9 г/куб. см и более далекого Деймоса – 1.75 г/куб. см. Как правило, спутники планет-гигантов должны быть более плотны, чем их газовые хозяева, в то время как спутники планет земной группы, достаточно крупных, чтобы пройти дифференциацию мантии, менее плотны именно из-за притока мантийного вещества планет.

Образование Луны и Харона отличается от образования Фобоса-Деймоса и двойных астероидов только тем, что эти крупные спутники значительно отодвинулись от своих планет из-за приливного воздействия. При этом, по-видимому, более быстрая – по скорости радиального дрейфа - и более долгоживущая Луна успела «съесть» мелкие внешние спутники Земли, а более медленный и молодой Харон – не успел. Возможно, что широко обсуждаемая непонятная активная бомбардировка Луны 3.9 миллиарда лет назад, следы которой отсутствуют на Земле (см. Райдер и др. 2000) была результатом соударения внешних и более мелких спутников с дрейфующей наружу крупной Луной. Ряд авторов (Рускол, 1975; Спудис, 1996) обсуждают проблему асимметрии кратеров и морей на видимой и обратной стороне Луны. Возможно, большее количество морей на видимой стороне Луны (и, особенно, на лидирующей и видимой четверти лунного диска) указывает на обстрел нашего спутника эжектой, рожденной на Земле. Тем самым, «морская» асимметрия указывает на множественность и распределенность по времени сильных астероидных ударов, переносящих вещество Земли на Луну.

5 Заключение

В задачу данной работы входило не построение детальной количественной модели образования Луны и двойных астероидов, но демонстрация эффективности механизма накопления

массивных спутниковых дисков из мантийного вещества планет земной группы и малых планет. Данная цель достигнута: мы показали, что:

- эжекта, выбитая с поверхности планеты, легко переходит на стабильные спутниковые орбиты, даже при взаимодействии с небольшими частицами протоспутникового диска – в 10-100 раз менее массивными, чем частицы эжекты;
- протоспутниковый диск с прямым вращением эффективно отбирает и присоединяет к себе эжектору с прямым вращением, дестабилизируя и возвращая на планету эжектору с обратным вращением;
- начальный протоспутниковый диск или планетные кольца не только не разрушаются под действием разнонаправленной эжекты, но и, оставаясь стабильными, активно растут за счет прямой эжекты, несущей в диск массу и дополнительный угловой момент.

Рассмотренная модель является естественным расширением идеи мегаимпакта и соединением её с классической аккреционной моделью. Концепция мегаимпакта внесла свой исключительный вклад в понимание образования Луны, выдвинув принципиальный тезис о важности потока мантийного вещества, вызванного соударениями крупных планетезималей с планетой. Аккреционная модель рассмотрела формирование и эволюцию второго важнейшего элемента космогонии Луны – протоспутникового диска вокруг Земли.

Настало время объединить эти две модели – аккреционную и мегаимпактную – в общую эффективную мульти-импактную теорию, применимую к расчету образования широкого спектра спутниковых систем – от крупных планет, как Земля, до мелких астероидов размером в несколько сот метров. Финансируемый всплеск интереса к лунным исследованиям в начале нового тысячелетия позволяет надеяться, что, – учитывая растущую информацию о Луне и практические нужды космонавтов, которым придется осваивать земной спутник, – ученые разных школ смогут найти общий язык в древней проблеме формирования нашего ночного светила.

Литература

- Боярчук А.А., Рускол Е.Л., Сафронов В.С., Фридман А.М. // Докл. РАН. 1998. Т. 361. С. 481.
- Гафтонюк и Горькавый (Gaftonyuk N. M., Gorkavyi N.N.) // *Kinematika and Fizika Nebesnyh Tel ("KFNT")*. 2005. Suppl. ser. (in press).
- Горькавый (Gorkavyi N.) // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2004. V.36. N2.
- Горькавый Н.Н., Тайдакова Т.А. // *Письма в Астрон. Журнал*. 1995. Т.21, С. 939.
- Горькавый и Тайдакова (Gorkavyi N., Taidakova T.) // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2002. V.33. N4.
- Горькавый Н.Н., Фридман А.М. // *Физика планетных колец. Небесная механика сплошных сред*. М.: Наука, 1994.
- Джоунс и Пальм (Jones J.H., Palme H.) // *Origin of the Earth and Moon/Ed. Canup R.M., Righter K. University of Arizona Press. 2000. P.197.*
- Камерон (Cameron A.G.W.) // *Origin of the Earth and Moon/Ed. Canup R.M., Righter K. University of Arizona Press. 2000. P.133.*
- Кануп (Canup, R.M.) // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2004. V. 36. N2.
- Образование Земли и Луны. *Origin of the Earth and Moon // Ed. Canup R.M., Righter K. University of Arizona Press. 2000.*
- Притчард и Стивенсон (Pritchard M.E., Stevenson D.J.) // *Origin of the Earth and Moon/Ed. Canup R.M., Righter K. University of Arizona Press. 2000. P.179.*
- Прокофьева и др. (Прокофьева В.В., Тарашук В.П., Горькавый Н.Н.) // *Успехи физ. наук*. 1995. Т.165, С.661.
- Прокофьева-Михайловская В.В. // *Изв. Крымской Астрофизической обс.* 2006.
- Райдер и др. (Ryder G., Koeberl Ch., Mojzsis S.J.) // *Origin of the Earth and Moon/Ed. Canup R.M., Righter K. University of Arizona Press. 2000. P.475.*
- Рингвуд А.Е. // *Происхождение Земли и Луны*. М.: Недра. 1982.

- Рой А. // Движение по орбитам. М.: Мир. 1981.
- Рускол Е.Л. // Происхождение Луны. М.: Наука. 1975.
- Рускол Е.Л. // Естественные спутники планет. М.: ВИНТИ. 1986.
- Снайдер и др. (Snyder G.A., Borg L.E., Nyquist L.E., Taylor L.A.) // Origin of the Earth and Moon/Ed. Canup R.M., Righter K. University of Arizona Press. 2000. P.361.
- Спудис (Spudis P.D.) // The Once and Future Moon. Smithsonian Inst. Press. 1996.
- Стюарт (Stewart G.R.) // Origin of the Earth and Moon/Ed. Canup R.M., Righter K. University of Arizona Press. 2000. P.217.
- Фридман и Горькавый (Fridman A.M., Gorkavyi N.N.) Physics of Planetary Rings (Celestial Mechanics of a Continuous Media). Springer-Verlag. 1999.
- Худ и Жубер, (Hood L.L., Zuber M.T.) // Origin of the Earth and Moon/Ed. Canup R.M., Righter K. University of Arizona Press. 2000. P.397.