

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ-ЛУНА

© 2005 г. Э. М. Галимов\*, А. М. Кривцов\*\*, А. В. Забродин\*\*\*, М. С. Легкоступов\*\*\*,  
Т. М. Энеев\*\*\*, Ю. И. Сидоров\*

\* *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН*  
119991 Москва, ул. Косыгина, 19

\*\* *Институт проблем машиноведения РАН*  
199178 Санкт-Петербург, Большой просп. В.О., 61

\*\*\* *Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*  
125047 Москва, Миусская пл., 4

Поступила в редакцию 10.03.2005 г.

Некоторые геохимические характеристики Луны плохо согласуются с гипотезой ее образования из мантии Земли. Мы предлагаем концепцию, альтернативную принятой в настоящее время гипотезе мегаимпакта. Показано, что 40% испарение материала хондритового состава дает материал, имеющий состав, близкий к лунному, включая низкое содержание железа. Как известно, испарение сопровождается изотопным фракционированием, в то время как в пределах точности измерений изотопный эффект в лунном грунте не обнаружен. Однако изотопное фракционирование может отсутствовать, если испарение осуществляется в равновесных условиях. Такие условия реализуются в облаке нагретых частиц. Для подтверждения этой концепции предлагается компьютерная модель образования Земли и Луны из общего облака примитивного (хондритового) состава. Модель основана на модифицированном методе динамики частиц. Мы вводим следующие дополнения к взаимодействию частиц: дальнедействующее гравитационное притяжение, короткодействующее вязко-упругое взаимодействие при столкновениях и газодинамическое отталкивание, связанное с испарением вещества с поверхности частиц. Показано, что газодинамическое отталкивание приводит к уменьшению энергии взаимодействия, допуская фрагментацию облака при значении кинетического момента, соответствующем системе Земля-Луна. Компьютерное моделирование показывает, что в результате аккумуляции рассеянного пылевого материала из двух образовавшихся тел тело большей массы растет быстрее. Поэтому Луна сохранила относительно низкое содержание железа, в то время как Земля аккумулировала большую часть оставшегося пылевого облака, приобретая при этом высокое содержание железа. Если предлагаемая модель справедлива, то это приводит к необходимости пересмотра современной концепции образования планетно-спутниковых систем.

## ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЛУНЫ

Исследование проблемы происхождения Луны имеет достаточно давнюю историю. Еще в конце 19-го века Джорджем Дарвиным [1] была выдвинута гипотеза отрыва Луны от Земли. Разные варианты этой гипотезы разрабатывались А. Ринг-вудом [2], А. Камероном [3], Дж. О'Кифом [4] и другими исследователями почти до 60-ых годов прошлого столетия. Однако в конечном счете, эта гипотеза была оставлена, так как для достижения необходимой ротационной неустойчивости требовался неправдоподобно большой вращательный момент исходного тела - значительно больший, чем тот, который характеризует систему Земля-Луна. Другая гипотеза - захват Луны в сферу притяжения Земли - была отвергнута как динамически маловероятная. Третья гипотеза - гипотеза коаккреции. Согласно этой гипотезе, которая была предложена Е.А. Рускол [5] и развивалась А. Харрисом и В. Каулой [6], Земля и Луна

сформировались из общего резервуара твердых планетезималей. Последние сталкивались и дробились в окрестности Земли. При этом легкие силикатные фрагменты преимущественно задерживались на орбите, а железо-содержащие попадали на Землю. Поэтому Луна приобрела меньшую плотность, чем Земля. Анализ этой гипотезы, однако, показал, что предполагаемый процесс фракционирования по плотности оказывается недостаточно эффективным, чтобы объяснить наблюдаемое различие содержаний железа на Луне и Земле [7]. Это относится и к варианту гипотезы коаккреции, рассматривавшейся в работах С. Вайденшиллинга с соавторами [напр., 8]. Позже, когда стали известны более детальные данные о химическом составе Луны, стало ясно, что гипотеза коаккреции не обеспечивает также правдоподобное объяснение обедненности Луны летучими и обогащенности тугоплавкими элементами.

В середине семидесятых годов двумя группами американских ученых [9, 10] была предложена

гипотеза ударного происхождения Луны. Согласно этой гипотезе Земля на заключительной стадии аккумуляции столкнулась с телом планетарных размеров (с массой Марса или больше). В результате столкновения расплавленная масса вещества земной мантии была выброшена на околоземную орбиту, где она быстро аккумулятировалась в виде земного спутника - Луны.

Компьютерный расчет показал, что подобный столкновительный сценарий вполне возможен [11, 12]. К этому времени Везерил [13], развивая гипотезу В.С. Сафронова [14], показал, что на заключительной стадии аккумуляции планетных тел, в околосолнечном пространстве могли находиться сотни тел, превосходящих массу Луны и Марса, так что столкновение между собой крупных тел нельзя рассматривать как нечто уникальное. Катастрофическое столкновение объясняло приобретение Землей наблюдаемого высокого значения момента количества движения и наклонение оси Земли к плоскости эклиптики. Легко объяснялся дефицит железа на Луне, так как гипотеза предполагала, что столкновение произошло после того, как у Земли образовалось ядро. Железо оказалось сконцентрированным в ядре, а Луна сформировалась преимущественно из вещества мантии Земли.

#### КРИТИКА ГИПОТЕЗЫ МЕГАИМПАКТА. ПРЕДЛАГАЕМАЯ АЛЬТЕРНАТИВА

До 70-ых годов проблема происхождения Луны была предметом исследования, главным образом, астрономов и специалистов в области небесной механики. Сведения о вещественном составе Луны фактически отсутствовали. Известно было лишь, что Луна обладает меньшей средней плотностью ( $3.3 \text{ г/см}^3$ ), чем Земля ( $4.45 \text{ г/см}^3$  - плотность, приведенная к нормальному давлению). Очевидно, что это связано с дефицитом железа на Луне. Земля имеет железо-никелевое ядро, составляющее 32% массы Земли (10% массы ядра образуют входящие в его состав легкие элементы, например, O, S, возможно, некоторые другие элементы). Луна с учетом ограничения, налагаемого величиной момента инерции и плотности, не может иметь ядро, превосходящее 5% ее массы.

Анализ образцов, доставленных с Луны космическими аппаратами, показал, что химический состав Луны действительно обладает определенными чертами сходства с составом вещества мантии Земли [15-17]. Были получены обширные, хотя и неполные и оставляющие место для дискуссий, геолого-геофизические данные о Луне, которые позволили более основательно исследовать проблему происхождения вещества Луны.

Изотопный состав кислорода  $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$  Луны и Земли оказался идентичен. На диаграмме в

координатах  $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  образцы пород Луны и Земли образуют совпадающую линию фракционирования, в то время как другие космические тела, в том числе метеориты разных классов, имеют отличающиеся линии фракционирования [18]. Такой же характерной космической зональностью обладает изотопное отношение хрома, и в этом случае в отличие от других космических объектов  $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$  оказывается одинаковым для Луны и Земли [19]. Это сильный признак общности вещества Луны и Земли.

Спорным оказался вопрос о содержании тугоплавких элементов. Интерпретация геохимических и геофизических данных указывала на то, что Луна заметно обогащена тугоплавкими элементами [20, 21]. Однако это плохо согласовывалось с гипотезой мегаимпакта. В этом случае либо приходилось признать чужеродность Луны веществу мантии Земли, либо принять, что Луна потеряла значительную часть Si и Mg, что нельзя объяснить в рамках концепции мегаимпакта. Поэтому сторонники этой гипотезы отстаивали представление о том, что содержание тугоплавких элементов, в том числе порообразующих Al, Ca, Ti, в Луне и Земле практически не отличаются [16, 17].

Содержание сидерофильных элементов на Луне ниже, чем на Земле. Это рассматривалось как веское доказательство происхождения Луны из земной мантии. В самом деле, Земля имеет огромное металлическое ядро. Поэтому уход в ядро сидерофильных элементов и соответствующее обеднение мантии понятно. Луна же имеет относительно небольшое ядро. Поэтому еще более высокая обедненность Луны сидерофильными элементами, казалось бы, возможна лишь в том случае, если исходным для Луны служило уже обедненное сидерофильными элементами вещество земной мантии, а дополнительная обедненность возникла при формировании небольшого лунного ядра. Однако наблюдаемое распределение сидерофильных элементов на Луне может быть достигнуто и в том случае, если Луна образовалась из первичного вещества, но формирование ее ядра происходило в условиях не полного, а частичного плавления [22, 23]. Более того, в этом случае достигается гораздо лучшее соответствие наблюдаемых и расчетных величин содержания сидерофильных элементов, чем в предположении об образовании Луны из земной мантии [23]. Правда, сам механизм сегрегации железа в ядро в условиях невысокой степени плавления (по расчетам -13% [23]) остается дискуссионным.

Первоначально казалось, что гипотеза мегаимпакта непринужденно объясняет утрату Луной летучих элементов, в том числе щелочных элементов K, Na, Rb, которыми Луна заметно обеднена относительно Земли. Действительно, при выбросе расплавленных масс в околоземное пространство

легколетучая часть расплава могла испариться. Однако при этом выявилась другая трудность. Испарение в свободное пространство должно сопровождаться фракционированием изотопов. Остаточный расплав обогащается тяжелыми изотопами. Однако анализ изотопного состава вещества Луны не показывает измеримых отличий его от изотопного состава вещества Земли. Возникает противоречие между обедненностью Луны летучими относительно Земли и отсутствием фракционирования изотопов.

Более подробное рассмотрение в последнее время динамической стороны модели мегаимпакта показало, что здесь также имеются трудности. В частности, приходится допустить, что относительная масса тела (ударника), с которым столкнулась Земля, была больше, чем предполагалось ранее (не 1 : 10, а 3 : 7) [24]. Но тогда, Луна бы унаследовала в большей степени вещество ударника, а не мантии Земли. Поэтому привлекательные в первоначально предложенной концепции мегаимпакта аргументы, основанные на сходстве вещества Луны и мантии Земли, теряют свое значение. Более того, наблюдаемую идентичность изотопного состава кислорода ( $^{18}\text{O}/^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) и хрома ( $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ ) Земли и Луны следует тогда рассматривать как случайность. Фактически, в этом случае сходство геохимических параметров становится скорее контраргументом к гипотезе мегаимпакта.

Может ли Луна при каких-либо условиях образоваться из первичного (хондритового) вещества, а не из дифференцированного вещества земной мантии, т.е. существует ли с геохимической точки зрения альтернатива гипотезе мегаимпакта? Э.М. Галимов [25, 26] показал, что образование Луны из первичного вещества, в принципе возможно, если Луна и Земля возникли как двойная система при коллапсе облака нагретых пылевых частиц первичного состава.

Проблема происхождения вещества Луны была рассмотрена в предшествующей работе [23]. Было показано, что дефицит железа на Луне можно объяснить его относительной летучестью и потерей в ходе испарения. Процесс испарения не только объясняет потерю летучих и железа, но также частично утрату Si и Mg. Это, в свою очередь, объясняет феномен обогащения Луны тугоплавкими окислами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{TiO}_2$ , так как увеличение содержания этих порообразующих окислов возможно лишь при соответствующей потере других порообразующих окислов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ , и  $\text{FeO}$  [25, 23]. Таким образом, наблюдаемый состав Луны согласуется с ее происхождением из вещества первичного состава (типа углистых хондритов), а не из мантийного вещества дифференцированной планеты, как предполагает гипотеза мегаимпакта. При этом ключевую роль играет процесс испарения. Но для того, чтобы ис-

парение не вызывало фракционирования изотопов оно должно осуществляться обратимым образом, в условиях практически закрытой системы, т.е. в условиях, близких к равновесно конденсированной фазы с насыщенным паром. В этом случае изотопное фракционирование определяется термодинамическим изотопным эффектом, который при повышенных температурах пренебрежимо мал для систем жидкость/твердое-пар таких элементов как K, Si, Mg и т.п. Условия испарения в закрытой системе практически выполняются в условиях коллапса облака испаряющихся пылевых частиц [23].

В данной работе нашей целью было исследовать динамическое поведение подобного облака и попытаться ответить на вопрос - возможно ли в процессе его коллапса образование системы двух тел, обладающей динамическими характеристиками системы Земля-Луна (суммарный угловой момент, масса и т.д.).

Как показал нижеследующий анализ, фактор испарения и в динамической модели играет ключевую роль.

#### НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА АККУМУЛЯЦИИ ПЛАНЕТ, НА КОТОРЫХ ОСНОВЫВАЕТСЯ МОДЕЛЬ

Отметим сразу, что мы основываем нашу динамическую модель на нетрадиционном представлении о механизме аккумуляции планет. Принятая модель аккумуляции планет, обоснованная В.С. Сафроновым и его школой [14,27] и развития Дж. Ве-зериллом [13, 28], рассматривает рост планет в результате столкновения твердых тел - планете-зималей. Предполагается, что сначала образуются тела метрового, потом километрового, затем тысяча-километрового размера. Размер планетезима-лей увеличивается в результате взаимных столкновений. Образование Луны в этой концепции рассматривается как результат столкновения крупных тел планетарного размера на завершающей стадии аккумуляции планет.

Мы исходим из того, что изначальное формирование твердых тел не происходило. В околосолнечной газо-пылевой туманности по мере оседания пыли на центральный диск возникала гравитационная неустойчивость, приводившая к формированию отдельных пылевых сгущений. Сталкиваясь, сгущения росли в размерах. Идеи образования планетно-спутниковых систем в процессе аккумуляции сгущений были предложены Л.Е. Гуревичем и А.И. Лебединским [29] и Т.М. Энеевым и Н.Н. Козловым [30]. Хотя и могла происходить агглютинация отдельных частиц и некоторый их рост, существовали факторы, которые препятствовали консолидации и удерживали частицы в рассеянном состоянии. Таковыми могли быть высокая радиация, вызван-

ная распадом короткоживущих изотопов, особенно интенсивная в первые  $10^3$ - $10^4$  лет существования Солнечной системы, электростатическое отталкивание, вызванное ионизацией частиц, наконец, испарение легко летучих соединений (воды, газов) с поверхности частиц.

На определенном этапе аккумуляции масса пылевого сгущения становится достаточной для гравитационного коллапса. Существенным моментом нашей модели является также предположение о том, что аккумуляция сгущений совпадает с фазой Т-Таури, т.е. происходит на фоне развития мощного корпускулярного истечения вещества Солнца (солнечного ветра), выдувающего газ (водород и другие легколетучие соединения) из внутренней зоны солнечной системы [25].

Вопрос о том, на какой стадии роста протопла-нетного сгущения начинается его коллапс и формирование консолидированного тела, остается открытым. Очевидно, конкретная аккреционная история зависит от множества факторов, включая первичный состав частиц, близость от солнца, давление окружающего газа, момент количества движения и др. Поскольку, как будет показано, в нашей модели с коллапсом облака частиц связано формирование Луны и зародыша Земли, мы полагаем, что пылевые сгущения могли расти, по крайней мере, до массы, превышающей несколько лунных масс. Однако в расчетной модели, изложенной ниже, мы исходим из менее вероятного, но более определенного предположения, что начальная для Земли и Луны масса пылевого облака отвечала суммарной массе современной Земли и Луны и обладала моментом количества движения, характеризующим момент количества движения системы Земля-Луна. Это позволяет избежать каких-либо произвольных допущений и налагает на модель вполне определенные количественные ограничения.

#### Динамическая модель

Для исследования процесса коллапса пылевого облака воспользуемся методом динамики частиц [31, 32]. Метод состоит в представлении вещества в виде ансамбля взаимодействующих частиц, описываемого классическими уравнениями динамики Ньютона:

$$m\ddot{r}_k = \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_{kn}^2} f(r_{kn}, \dot{r}_{kn}) \mathbf{e}_{kn}$$

$$\mathbf{e}_{kn} = \mathbf{e}_k - \mathbf{e}_n, \quad r_{kn} = |\mathbf{e}_{kn}|; \quad k = 1, 2, \dots, N$$

где  $r_k$  — радиус-вектор /с-ой частицы,  $m$  - масса частицы,  $N$  - общее число частиц и  $f(r, \dot{r})$  - сила вза-

имодействия между частицами, которую будем описывать согласно выражению

$$f(r, \dot{r}) = \frac{A_1}{r^2} + \frac{A_2}{r^p} + \frac{A_3}{r^q} \dot{r} \quad (2)$$

Первое слагаемое в выражении (2) представляет собой силу гравитационного взаимодействия, следовательно, коэффициент  $A_1$  определяется равенством  $A_1 = -\gamma m^2$ , где  $\gamma$  - гравитационная постоянная. Второе слагаемое представляет собой силу отталкивания, возникающую при столкновениях частиц. Показатель степени  $p$  возьмем равным 13, что позволяет обеспечить соответствие с экспериментальными данными по ударному сжатию твердых тел [33, 34]. Положим, что равновесное расстояние между двумя частицами (равное диаметру частицы) в результате баланса сил притяжения и отталкивания устанавливается равным  $a$ , то есть  $f(a, 0) = 0$ , тогда из формулы (2) получаем  $A_2 = -A_1 a^{p-2}$ .

Третье слагаемое предназначено для описания диссипации - потерь энергии при столкновениях частиц. Полагая, что при изменении расстояния между частицами второе и третье слагаемое должны изменяться пропорционально друг другу, получим  $q = p + 1 = 14$ . С использованием перечисленных предположений формула (2) может быть приведена к виду

$$f(r, \dot{r}) = \gamma \frac{m^2}{a^2} \left[ \left( \frac{a}{r} \right)^{13} \left( 1 - \beta \frac{\dot{r}}{r} \right) - \left( \frac{a}{r} \right)^2 \right]$$

где  $\beta = -A_3/A_2 > 0$  - коэффициент диссипации.

Для полноты постановки задачи требуется задание начальных условий - векторов положений и скоростей для всех частиц. Начальная форма пылевого облака задается в виде двухмерного кругового диска с плотностью распределения частиц, описываемой законом:

$$\xi(r) = \xi(0) \sqrt{1 - (r/R_0)^2} \quad (4)$$

где  $\xi(r)$  - погонная плотность,  $r$  - расстояние до центра,  $R_0$  - радиус диска,  $\xi_0 = \frac{3}{2} \bar{\xi}$  где  $\bar{\xi}$  - средняя плотность облака.

Распределение (4) допускает "твердотельное вращение" [35] с

$$\omega_s = \sqrt{\frac{\pi^2 \gamma \xi(0)}{2 R_0}} \text{ угловой скоростью} \quad (5)$$

В начальный момент времени задается твердотельное вращение облака с угловой скоростью  $\omega_0 < \omega_s$ . Кроме того, к скоростям частиц может добавляться случайный вектор скорости, моделирующий хаотичность в движении частиц.

Будем считать, что энергия, теряющаяся в результате действия диссипативной компоненты силы взаимодействия, переходит во внутреннюю энергию частиц согласно следующему уравнению

$$U_k = \sum_{n=1}^N Q(r_{kn}, \dot{r}_{kn}) - \lambda U_k,$$

$$Q(r, \dot{r}) = -\frac{A_3}{r^{p+1}} \dot{r}^2, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

(6)

где  $U_k$  - внутренняя энергия  $k$ -ой частицы;  $Q(r, \dot{r})$  - количество теплоты, переходящее во внутреннюю энергию в результате действия диссипативных сил;  $X$  - коэффициент, описывающий потери тепловой энергии в результате передачи ее от частицы к окружающему ее газу, излучения, а также испарения газа с поверхности частицы;  $A_3 = \gamma m^2 a^{p-2}$  согласно уравнениям (2) и (3). Кроме того, при расчете учитывается теплообмен между частицами. Температура частицы в первом приближении может считаться пропорциональной ее внутренней энергии, рассчитанной согласно формуле (6). Отметим, что обратное влияние тепловых эффектов на динамику системы в данной работе не учитывается.

Для численного моделирования необходимо ввести безразмерные параметры подобия компьютерной модели и моделируемой системы. В качестве основного параметра подобия возьмем

$$\alpha = \frac{K^2}{\gamma M^3 R_c} \quad (7)$$

где  $K$  - кинетический момент;  $R_c$  - радиус шара, содержащего полную массу ( $M$ ) всех частиц в системе  $R_c = (3M/4\rho_c)^{1/3}$ ,  $\rho_c$  - средняя плотность вещества. Значения обсуждавшихся выше размерных величин и рассчитанного по ним параметра  $\alpha$  для системы Земля-Луна равны:

$$K = 3.45 \times 10^{34} \text{ кг м}^2 \text{ с}^{-1}; \quad M = 6.05 \times 10^{24} \text{ кг};$$

$$R_c = 6.41 \times 10^6 \text{ м}; \quad \rho_c = 6.67 \times 10^{-10} \text{ кг}^{-1} \text{ м}^3 \text{ с}^{-2};$$

$$\alpha = 0.0126.$$

Можно показать, что введенный формулой (7), безразмерный динамический параметр  $\alpha$  пропорционален отношению кинетической энергии вращения системы к потенциальной энергии гравитационного взаимодействия вещества системы. С другой стороны, коэффициент подобия  $\alpha$  пропорционален квадрату начальной угловой скорости облака  $\omega_0$  (использующейся для задания начальных условий при моделировании):

$$\alpha = \frac{3\pi}{4} \left( \frac{R_c}{R_0} \right)^4 \frac{R_0}{R_c} \left( \frac{\omega_0}{\omega_s} \right)^2, \quad (8)$$

где  $R_j$  - радиус инерции облака. Формула (8) позволяет установить подобие между реальной и модельной системами.

С математической точки зрения задача сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1). Однако, при непосредственном решении уравнений (1) число необходимых операций на каждом шаге интегрирования оказывается пропорциональным  $N^2$ , что ставит серьезные препятствия для расчета больших систем. Гравитационный потенциал является дальнедействующим, что не позволяет использовать радиус обрезания, применяющийся для решения аналогичных уравнений в молекулярной физике. Для решения уравнений (1) используется алгоритм Барнса-Хата [36], состоящий в иерархическом разбиении расчетной области на квадраты с размерами, увеличивающимися в геометрической прогрессии по мере удаления от рассматриваемой частицы. Применение данного алгоритма позволяет обеспечить пропорциональность числа операций величине  $N \log N$ , что существенно увеличивает размер систем, доступных для расчета. Компьютерная реализация алгоритма Барнса-Хата для данных расчетов была осуществлена И.Б. Волковцом.

Предварительные расчеты показали, что характер коллапса различается для различных типов начального распределения плотности в облаке. Рис. 1(1) иллюстрирует эволюцию облака с равномерным начальным распределением плотности. По краю облака образуется горячее сжимающееся кольцо с высокой плотностью вещества, в то время как внутри кольца вещество практически находится в равновесии. Данный случай, однако, представляется нереалистичным с физической точки зрения. Рис. 1(11) демонстрирует эволюцию аналогичного облака, обладающего тем же количеством частиц и начальным кинетическим моментом, но имеющего переменную плотность,

$$\xi(r) = \xi_0 \sqrt{1 - (r/R_0)^2}$$

распределенную по закону

В этом случае облако сжимается равномерно. Кластеры, хорошо заметные на рис. 1(11), появляются в результате джинсовской неустойчивости [33] вещества внутри облака. Третий случай (рис. 1(III)) отличается от второго наличием случайной компоненты скорости частиц. Хаотическое движение частиц в значительной степени подавляет джинсовскую неустойчивость, именно этот случай положен в основу расчетной модели. Из формулы (8) следует, что кинетический момент актуальной системы Земля-Луна соответствует значению  $\alpha_{(0)} = 0.08$ . Рис. 2 показывает в наклонной проекции результаты расчета ротационного коллапса пылевого облака, для числа частиц  $N = 10^4$  и начального радиуса облака  $R_0 = 5.5 R_c$ . Число частиц определяется вычислительной процедурой. Это не значит, что масса каждой части-

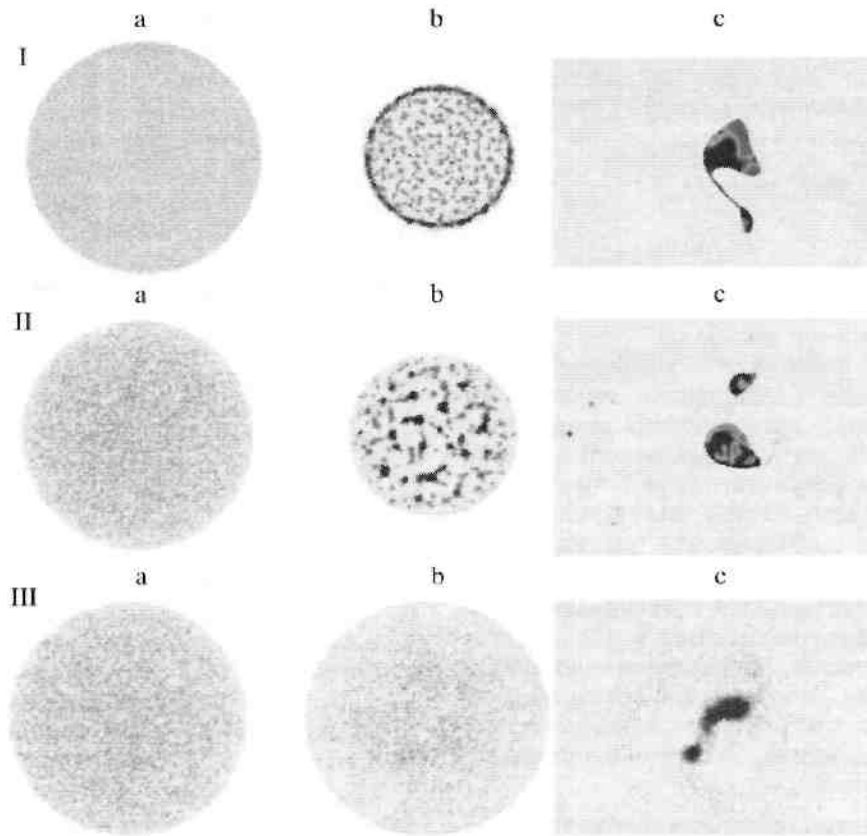


Рис. 1. Компьютерное моделирование коллапса облака частиц: (I) однородное начальное распределение частиц внутри облака; (II) неоднородное распределение (см. текст); (III) неоднородное распределение с учетом хаотического движения частиц. Кадры а), б) и с) отвечают последовательным моментам времени, иллюстрирующим, соответственно, начальное состояние, сжатие облака, и фрагментацию,  $\theta_U/\theta_V$  произвольное, достаточное для проявления фрагментации.

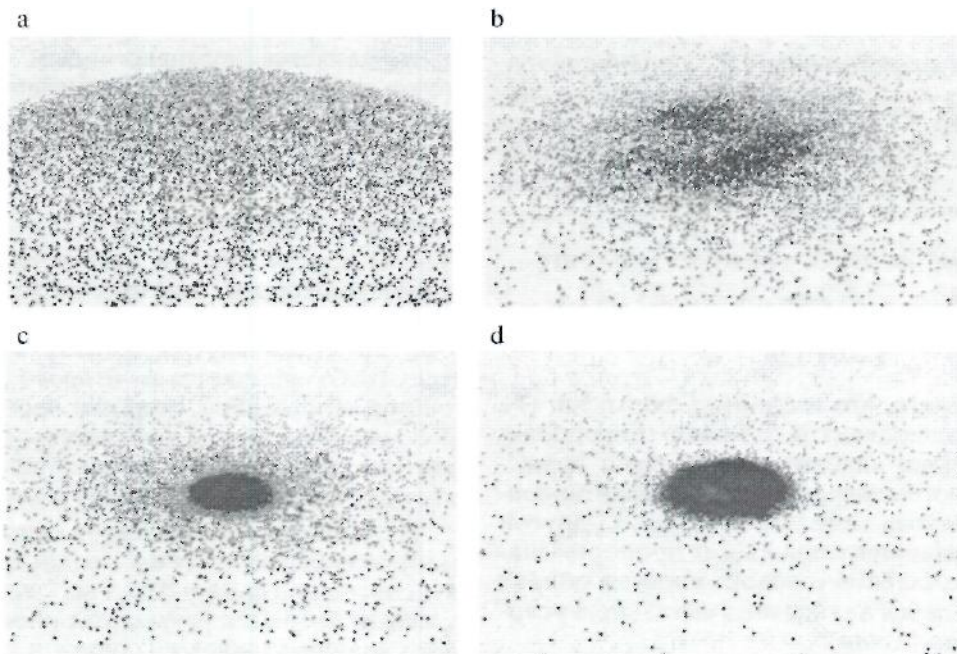


Рис. 2. Компьютерное моделирование ротационного коллапса облака частиц (наклонная проекция), отвечающего параметрам Земля-Луна:  $RQ=5.51RQ''$ ,  $N=10$ ;  $(\theta_U/\theta_V=0.08$  (без учета фактора испарения) в системе, а)  $t=0$ , б)  $t=0.167$ , в)  $t=0.21T_s$ , д)  $t=0.32T_s$ .

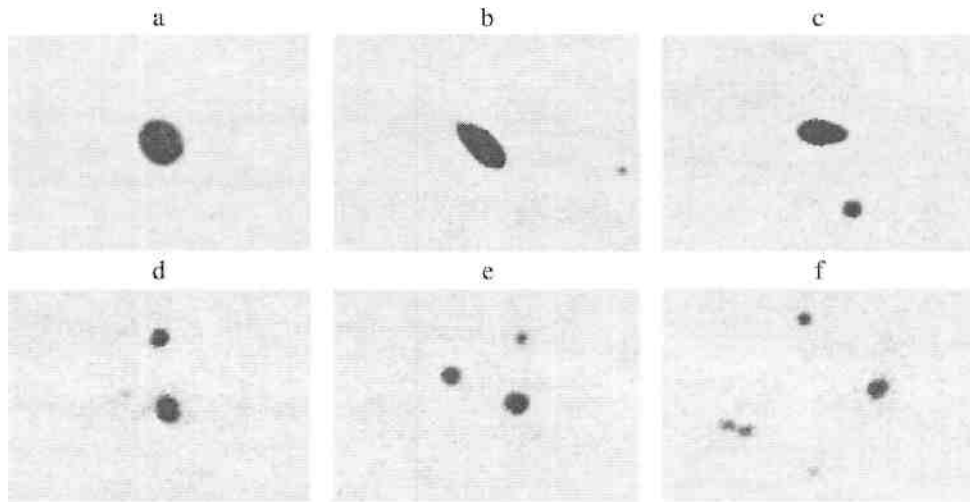


Рис. 3. Результаты расчета ротационного коллапса для различных значений начальной угловой скорости ( $H_0/O_0$ : а) 0.29, б) 0.42, в) 0.54, д) 0.76, е) 0.80, з) 0.85.

цы равна массе облака деленной на  $10^4$ . Физически мы рассматриваем массы частиц миллиметровых размеров. Случайная компонента скоростей частиц в начальной конфигурации берется из равномерного распределения с максимальным значением  $0.68\text{СО}_0/\rho_0$ . Время, соответствующее последовательным кадрам на рис. 2, измеряется в единицах  $T_s = 2\pi/\text{СО}_0$ , представляющих собой период твердотельного вращения начальной конфигурации. Оттенки серого на рисунке иллюстрируют распределение температур в системе (самый темный соответствует наиболее высокой температуре). Из рисунка видно, что коллапс сопровождается образованием конденсированного тела повышенной температуры. Однако фрагментация облака, в частности образование двойной системы типа Земля-Луна не происходит.

Рис. 3 представляет анализ зависимости ротационной неустойчивости от величины параметра  $\theta/\text{СО}_0$ . Видно, что фрагментация при коллапсе не происходит, если относительная угловая скорость  $\text{СО}_0/\text{СО}_0$  меньше критического значения, примерно равного 0.42 (рис. 3а). При значениях отношения  $\theta/\text{СО}_0$  больше критического формируются два тела различных размеров (рис. 3б, 3в). При значении  $\theta/\text{СО}_0 = 0.76$  размеры тел становятся близкими друг к другу (рис. 3д), а при дальнейшем увеличении отношения  $\theta/\text{СО}_0$  происходит образование трех и более фрагментов (рис. 3е, 3ф). Кинетический момент системы Земля-Луна,  $(\text{СО}_0/\text{СО}_0 = 0.08)$  значительно ниже критического значения  $\text{СО}_0/\text{СО}_0 = 0.42$ , требуемого для возникновения ротационной неустойчивости.

Этот результат не является неожиданным. Известно много попыток объяснения образования Луны в результате ее отделения от Земли, однако все они не могли преодолеть противоречия, свя-

занного с недостатком кинетического момента для разделения Земли и Луны. Таким образом, мы, как будто бы, получили еще одно подтверждение невозможности образования Луны в результате ротационной неустойчивости исходной системы.

Однако ситуация коренным образом изменяется, если принять во внимание процесс испарения [23]. Как отмечалось выше, обедненность Луны летучими, при отсутствии изотопного фракционирования согласуется с процессом испарения пылевых частиц в пространство, занимаемое пылевым облаком. Процесс испарения приводит к возникновению еще одной силы, которая должна быть учтена в уравнениях движения (1). При равновесном давлении насыщенного пара увеличение потока вещества, испаряемого с поверхности частицы, порождает отталкивающую силу, которая приближенно может быть описана формулой

$$f_v = \frac{\pi v v a^4}{16 r^2}, \quad \text{где } v \quad (9)$$

дополнительная масса вещества, испаряющегося с единицы поверхности частицы за единицу времени;  $v$  - средняя скорость молекул, отрывающихся от поверхности частицы. Согласно формуле (9) сила газодинамического отталкивания обратно пропорциональна квадрату расстояния между частицами. Следовательно, она может быть объединена с силой гравитационного взаимодействия

$$f = f_\gamma - f_v \approx \left( \gamma - \frac{9 v v}{4 \pi a^2 \rho^2} \right) \frac{m^2}{r^2} \approx \gamma' \frac{m^2}{r^2}. \quad (10)$$

Согласно полученной формуле, для частиц достаточно малого размера силы газодинамического



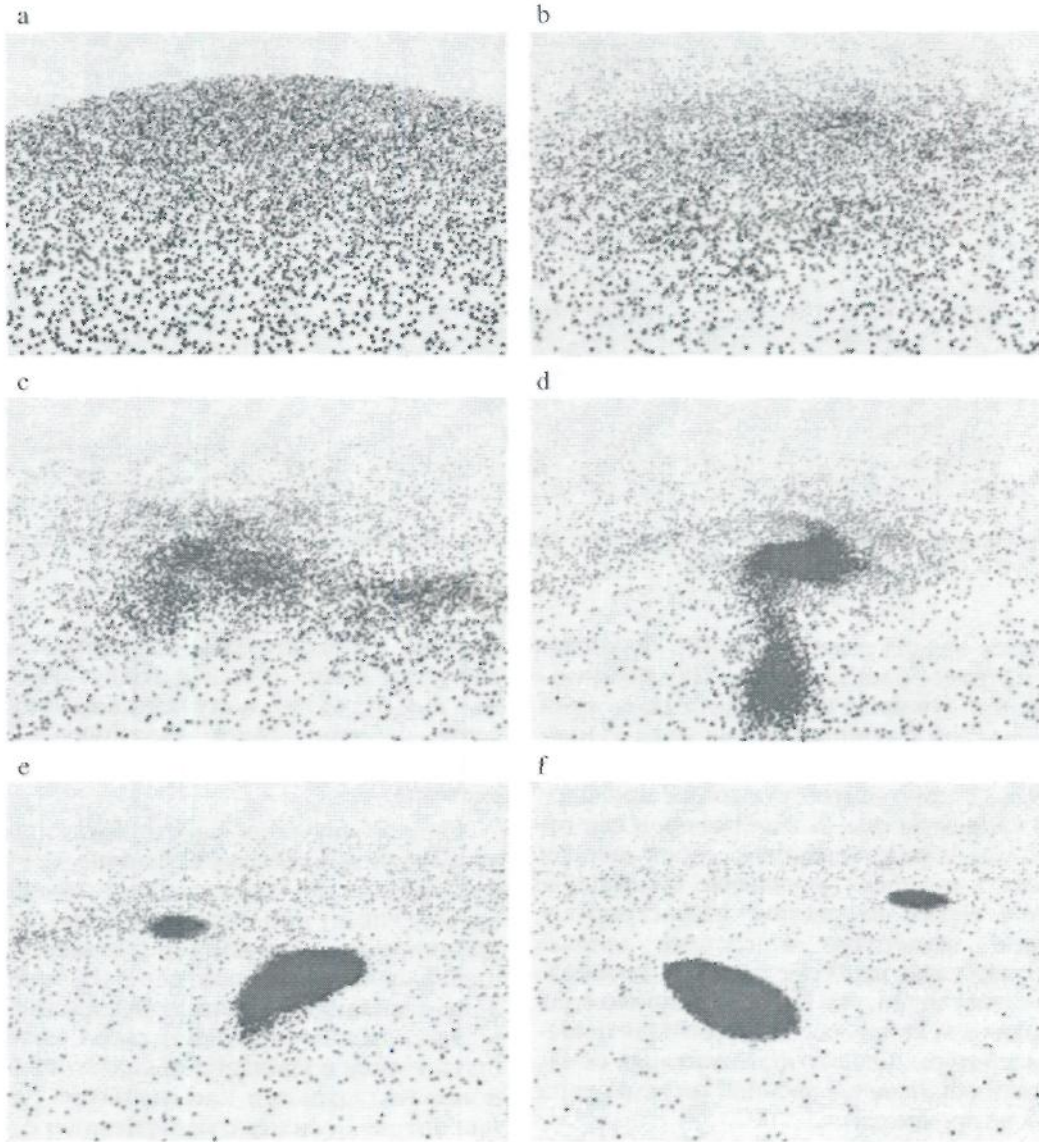


Рис. 4. Компьютерное моделирование ротационного коллапса облака испаряющихся частиц. Условия те же, что на рис. 2, за исключением:  $Co_0/(0_v) = 0.70$ . Последовательные кадры соответствуют моментам времени: а)  $t = 0$ , б)  $t = 0.21 T_s$ , в)  $t = 0.41 T_s$ , д)  $t = 0.58 T_s$ , е)  $t = 0.80 T_s$ , ф)  $t = 1.07 T_s$ .

отталкивания и гравитационного притяжения могут компенсировать друг друга ( $U = 0$ ).

Как было показано выше, проявление ротационной неустойчивости определяется значением безразмерного динамического параметра  $a$ , включающего величину  $u$  или ее эффективное значение  $u$ . Это позволяет определить интенсивность испарения, достаточную для возникновения ротационной неустойчивости при значении кинетического момента, соответствующего актуальной системе Земля-Луна. Ротационная неустойчивость, приводящая к образованию двух отдельных тел проявляется при значениях безразмерной угловой скорости между  $co/co_s = 0.42$  и  $(0_v/o)_v = 0.76$ , т.е. от 5.3 до

9.5 раз превышающих значение  $co/co_{A.}$ , рассчитанное для системы Земля-Луна. Так как  $a$  зависит от квадрата угловой скорости, то значение  $U$  должно быть, по крайней мере, в 28 раз меньше, чем значение  $u$ .

Используя уравнение (10) и формулу  $\lambda = JSRT/n$  [35], несложно получить, что значение  $V$ , требуемое для появления ротационной неустойчивости с  $co/co^* = 0.70$ :

$$(И) v = 0.87 \frac{\gamma p^2 a^2}{\sqrt{RT}}$$

Рис. 4 показывает результаты компьютерного моделирования при тех же параметрах, что и на



рис. 2, но с учетом силы отталкивания, обусловленной испарением. В отличие от картины, демонстрируемой на рис. 3, в данном случае видно, что коллапс сопровождается образованием двух сгущений, которые постепенно трансформируются в конденсированные тела.

Отметим, что определяющим является не собственно интенсивность испарения, а ее увеличение на фоне динамического равновесия между конденсированным веществом и паром. При таком равновесном (обратимом) увеличении интенсивности испарения, изотопное фракционирование характеризуется термодинамическим изотопным эффектом.

Для частиц, имеющих размер метеоритных хондр ( $a \sim 1$  мм), температуры порядка  $10^3$  К и плотности между  $10^3$  и  $2 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> значение  $\nu$  имеет порядок  $10^{-13}$  кг/м<sup>2</sup> с (для  $R = 400$  Дж/кг/К). Следовательно, очень незначительное увеличение интенсивности испарения может поддерживать равновесное состояние газопылевого облака. Можно показать, что для уменьшения массы частицы на  $\Delta m$  потребует время:

$$t = 0.59 \frac{\sqrt{RT}}{\gamma \rho a} \left[ \left(1 - \frac{\Delta m}{m}\right)^{-1/3} - 1 \right] \quad (12)$$

Например, для 40% уменьшения массы частицы при упомянутых выше условиях потребуется от  $3 \times 10^4$  до  $7 \times 10^4$  (г лет. Период порядка  $10^4$ - $10^5$  лет может рассматриваться как характеристическое время образования системы двух тел из пылевого облака, имеющего параметры системы Земля-Луна.

Мы намеренно взяли пример с 40% испарением массы частицы. В работе [23] было показано, что при испарении приблизительно 40% массы хондритового расплава остаток приобретает химический состав, в том числе содержание железа и тугоплавких элементов, отвечающий составу Луны.

Таким образом, удастся получить модель, согласованную с физико-химической и динамической точек зрения. Ключевым процессом, связывающим модель, является процесс испарения.

#### *Асимметричная аккреция неравных фрагментов*

Первоначально оба образующихся фрагмента, один из которых должен был стать Луной, а второй - Землей, должны быть обеднены железом (в результате испарения) в равной степени. Возникает вопрос, почему Луна сохранила дефицит железа, в то время как Земля железом не обеднена по сравнению с первичным составом. В действительности Земля содержит даже больше железа, чем углистые хондриты, которые мы рассматриваем как эталон первичного вещества. Обсуждение этого феномена не входит в цели настоящей работы. Мы хотим объяснить дефицит железа в Луне при отсутствии такового в Земле. Предлага-

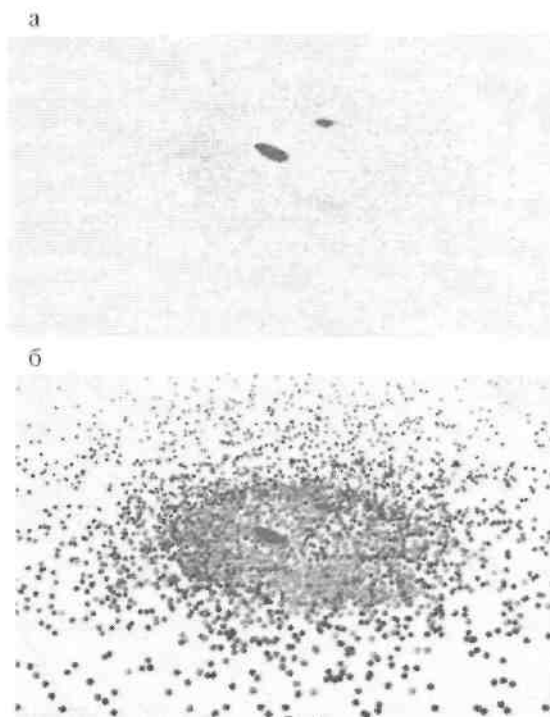


Рис. 5. Облако частиц, окружающих образовавшиеся тела ( $t = 1.07 T_d$ ): а) обычный вид, б) радиусы частиц увеличены для лучшей визуализации облака.

емое объяснение заключается в особенностях последующей эволюции облака частиц после его фрагментации на консолидированные тела.

Важной особенностью коллапса при хаотическом движении частиц является то, что после формирования конденсированных тел значительная часть частиц остается рассеянной в пространстве рис. 5, причем температура этих рассеянных частиц значительно ниже, чем температура конденсированных тел.

Этот материал постепенно оседает на образовавшиеся зародыши. Очевидно, что при рассмотрении не изолированного облака, а облака, вращающегося по круговой орбите вокруг Солнца, пылевой шлейф будет еще более растянут в пространстве, а процесс - во времени.

При моделировании роста зародышей планет в результате аккумуляции холодного вещества облака можно пренебречь взаимодействием частиц и ограничиться динамикой их движения в гравитационном поле двух массивных тел. Возникает вопрос - как эти тела будут увеличивать свою массу, аккумулируя частицы из окружающего пространства. Для ответа на этот вопрос был поставлен следующий компьютерный эксперимент.

Частица массы  $m$  помещается в систему двух тел с массами  $M_1$  и  $M_2$  (движущихся по круговым орбитам вокруг общего центра масс). Начальное положение частицы выбирается случайным обра-

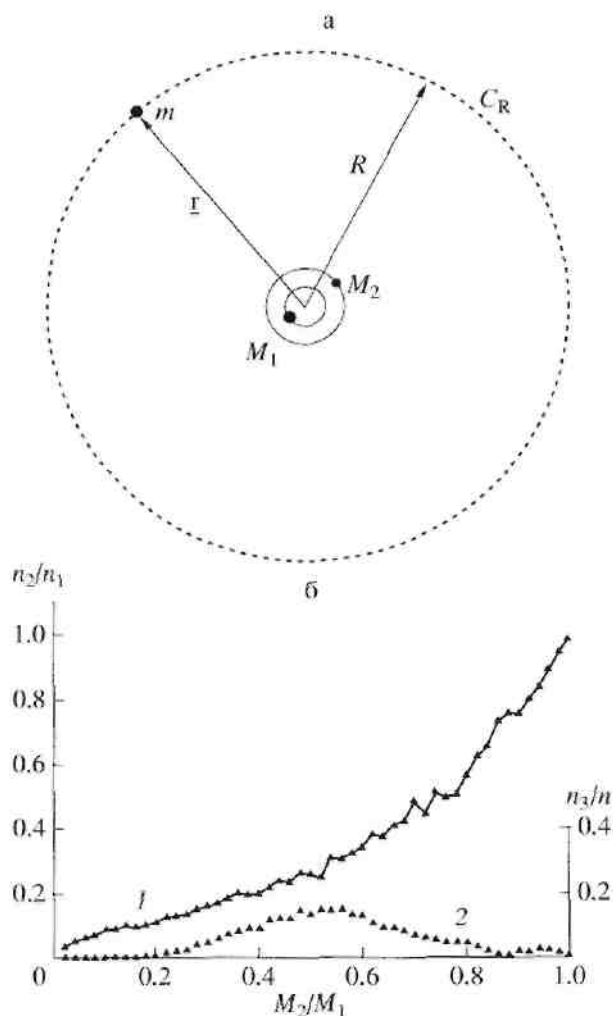


Рис. 6. Моделирование роста зародышей планет: а) модель: два тела  $M_1$  и  $M_2$  вращаются вокруг общего центра масс; частица  $m$  стартует с расстояния  $R$  и движется в гравитационном поле тел  $M_1$  и  $M_2$ ; б) результаты компьютерного моделирования ( $n = 5000$ ).

зом на окружности  $C_R$  с радиусом  $R$  и центром, совпадающим с центром тяжести системы двух тел, как показано на рис. 6а. Движение частицы рассчитывается в гравитационном поле указанных тел. В ходе моделирования вычисляется число частиц, упавших на первое ( $n_1$ ) и второе ( $n_2$ ) тело, кроме того, регистрируются частицы, покидающие систему ( $n_3$ )-

Компьютерное моделирование [37] показывает, что более массивное тело аккумулирует большее количество частиц (рис. 6б). Зависимость между отношением масс тел и отношением количества аккумулированных ими частиц может быть приближенно аппроксимирована квадратичной функцией. Следовательно, случайное начальное различие в массах тел должно привести к ситуации, когда меньшее тело относительно мало меняет свою массу, в то время когда большее тело акку-

мулирует большую часть рассеянных в окружающем пространстве частиц.

Иными словами, высокотемпературные зародыши Земли и Луны были изначально в равной степени обеднены железом. В дальнейшем, меньший фрагмент (будущая Луна) сохранил относительно низкое содержание железа, в то время как больший фрагмент (будущая Земля) аккумулировал практически все рассеянное вещество газопылевого облака, получив тем самым относительно высокое содержание железа, характерное для облака в целом.

#### Заключительные замечания

Таким образом, обедненность Луны летучими при отсутствии изотопного фракционирования, также как и дефицит железа в Луне, могут быть объяснены в рамках рассматриваемой модели. В настоящей работе мы не рассматриваем другие геохимические параметры. Проблемы распределения сидерофильных элементов в веществе Луны, также как и интерпретация Hf-W систематики в свете предлагаемой концепции рассмотрены в работе [23]. Что касается тугоплавких элементов, следует отметить, что предлагаемая модель находится в согласии с теми оценками, которые предполагают повышенную концентрацию тугоплавких элементов в Луне по сравнению с Землей (напр. [15]).

Наша модель оставляет открытым для дальнейших исследований вопрос о специфическом этапе развития протопланетного облака, на котором произошло его разделение на зародыши Земли и Луны. Для того, чтобы избежать произвольных эмпирических оценок, мы использовали реальные параметры системы Земля-Луна. Другими словами мы предположили, что процесс коллапса развивался в облаке, масса которого соответствует массе системы Земля-Луна. Однако, весьма вероятно, что процесс разделения мог произойти в облаке меньшей массы, и сопровождаться потом ростом зародышей Земли и Луны за счет материала, рассеянного по гелиоцентрической орбите. Возможно, также, что аккумуляция планет, или, более точно, планетно-спутниковых систем, происходила в два этапа. На первом этапе были образованы газопылевые сгущения. Радиация препятствовала их предварительной консолидации. После периода порядка  $10^6$  лет, начался коллапс первичных сгущений, и крупнейшие из них стали зародышами планет. На конечном этапе, рост планетарных тел мог происходить в результате их столкновения с твердыми телами, именуемыми, вероятно, астероидальными размерами.

Наша модель требует, чтобы в течение ранней стадии развития протопланетного диска в нем возникали и росли крупные сгущения пыли, а не ансамбль твердых тел.

Если это действительно так, то речь идет не только о модели происхождения системы Земля-Луна, но и о необходимости под новым углом зрения рассмотреть теории аккумуляции планет в целом.

Вопросы, которые остаются, касаются следующих аспектов гипотезы.

- Необходимо более детальный расчет температурного профиля в коллапсирующей облаке, совмещенный с термодинамическим анализом распределения элементов в системе частица-пар на разных уровнях этого профиля. Пока это не сделано модель остается скорее качественной гипотезой.

- Следует получить более строгое выражение для газодинамического отталкивания с учетом локального характера действия этой силы в отличие от гравитационного взаимодействия.

- В модели оставлен в стороне вопрос о влиянии Солнца, произвольно выбран радиус диска и не рассмотрено деформирующее влияние столкновения сгущений при формировании диска.

- Для получения более строгого решения важно было бы перейти к трехмерной постановке задачи и увеличить число модельных частиц  $N$ .

- Необходимо рассмотреть случаи формирования двойной системы из протодиска меньшей массы, чем суммарная масса Земли и Луны, так как вполне вероятно, что процесс аккумуляции происходил в две стадии - на ранней стадии - коллапс пылевого сгущения с образованием двойной системы, а на поздней стадии - дополнительный рост за счет соударения образовавшихся к тому времени в солнечной системе твердых тел.

- В динамической части нашей модели не рассматриваются причины повышенного момента системы Земля-Луна и заметного наклона оси Земли к плоскости эклиптики, в то время как гипотеза мегаимпакта соответствующие объяснения предлагает.

Ответы на эти вопросы, в значительной мере, зависят от общего решения упомянутой выше проблемы эволюции сгущений в протопланетном вокруг солнечном газопылевом диске.

Наконец, следует иметь в виду, что наша гипотеза предполагает некоторые элементы гетерогенной аккреции, правда, в смысле, противоположном принятому. Сторонники гетерогенной аккреции предполагали, что у планет в начале тем или иным способом образуется железное ядро, а затем уже нарастает преимущественно силикатная оболочка мантии. В нашей модели первоначально возникает зародыш, обедненный железом и лишь последующая аккумуляция приносит обогащенный железом материал. Понятно, это существенным образом видоизменяет процесс формирования ядра и связанные с ним условия фракционирования сидерофильных элементов, Hf-W систематику и

другие геохимические параметры. Таким образом, предложенная концепция открывает новые аспекты исследования, как в динамике формирования солнечной системы, так и в геохимии.

*Авторы благодарят И.Б. Волковца за разработку компьютерных программ и С.В. Васильева за расчеты по моделированию роста зародышей планет.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-1873.2003.5, а также Программы Президиума РАН №25 "Проблемы зарождения биосферы Земли и ее эволюции".*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Darwin G.H.* On the secular changes in the orbit of a satellite revolving around a tidely disturbed planet // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* 1880. V. 171. P. 713-891.
2. *Ringwood A.E.* Some aspects of the thermal evolution of the earth // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1960. V. 20. P. 241-259.
3. *Cameron A.G.W.* The origin of the atmospheres of Venus and the Earth // *Icarus.* 1963. V. 2. P. 249-257.
4. *O'Keefe J.A.* Origin of the Moon // *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74. P. 2758-2767.
5. *Рускол Е.А.* Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188 с.
6. *Harris A.W., Kaula W.M.* A co-accretion model of satellite formation // *Icarus.* 1975. V. 24. P. 516-524.
7. *Рингвуд А.Е.* Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 294 с.
8. *Weidenschilling S.J., Greenberg R., Chapman C.R. et al.* Origin of the Moon from a circum terrestrial disk // In: *Origin of the Moon* (eds.: W.K. Hartman et al.). Lunar Planet. Inst., Houston, 1986. P. 731-762.
9. *Hartmann W.K., Davis D.R.* Satellite-sized planets and lunar origin // *Icarus.* 1975. V. 24. P. 504-515.
10. *Cameron A.G.W., Ward W.* The origin of the Moon // In *Proceedings of 7th Lunar Science Conference.* 1976. P. 120-122.
11. *Metosh H.J., Sonett C.R.* When worlds collide: jetted vapor plumes and the Moon's origin, in *Origin of the Moon*, edited, by W.K. Hartmann, R.J. Phillips and G.J. Taylor (Lunar Planet. Inst. Houston), 1986. 621-642.
12. *Benz W. and Cameron A.G.W.* Terrestrial effects of the giant impact. In: *Origin of the Earth*, edited by H.E. Newsom and J.H. Jones, 1990, Oxford Univ. Press. New-York. 61-67.
13. *Wetherill G.W.* Occurrence of giant impacts during the growth of the terrestrial planets // *Science.* 1985. V. 228. P. 877-879.
14. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
15. *Taylor S.R.* The origin of the Moon: geochemical consideration // In: "Origin of Moon" (Eds: W.K. Hartmann, R.J. Phillips, G.J. Taylor), Lunar and Planetary Institute, Houston, 1986. P. 125-144.
16. *Ringwood A.E.* Composition and origin of the Moon // In: "Origin of the Moon" (Eds: W.K. Hartmann,

- R.J. Phillips, G.J. Taylor), Lunar and Planetary Institute, Houston, 1986. P. 673-698.
17. *Weinke H., Dreibus G.* Geochemical Evidence for the Formation of the Moon by impact-induced fission of the proto-Earth // In: Origin of the Moon (eds.: W.K. Hartmann et al.), Lunar and Planet. Inst., Houston, 1986. P. 649-672.
  18. *Clayton R.N., Mayeda T.K.* Genetic relation between the Moon and meteorites // Proc. 6th Lunar. Sci. Conf. Houston. 1975. P. 1761-1769.
  19. *Lugmair G., Shukolyukov A.Yu.* Early solar system ti-mescale according to  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$  isotope systematics // *Geochim. et Cosmoch. Acta.* 1998. V. 62. P. 2863-2886.
  20. *Jones J.H., Delano J.W.* A three component model for the bulk composition of the Moon // *Geochim. et Cosmoch. Acta.* 1984. V. 53. P. 513-527.
  21. *Warren P.H.* Anorthosite assimilation and the origin of the Mg/Fe - related bimodality of pristine Moon rocks: Support form the magmasphere hypothesis // Proc. 16th Lunar Planet. Sci. Conf. 1986. P. 331-343.
  22. *Newsom H.E.* Constrains on the origin of the Moon from abundance of molybdenium and the siderophile elements // In: "Origin of Moon" (Eds. W.K. Hartmann, R.J. Phillips, G.J. Taylor), Lunar and Planetary Institute, Houston. 1986. P. 203-229.
  23. *Галимов Э.М.* О происхождении вещества Луны // *Геохимия.* 2004. № 7. С. 691-706.
  24. *Cameron A.G.W.* Higher-resolution simulations of the Giant Impact. In: Origin of the Earth and Moon (Eds.: R.M. Canup and K. Righter), Univ. Arisona Press. 2004. P. 133-144.
  25. *Галимов Э.М.* Проблема происхождения Луны. В кн.: "Основные направления геохимии", (иод. ред. Э.М. Галимова), М.: Наука, 1995. С. 8-45.
  26. *Galimov E.M.* The Russian Lunar Project // In: Proc. ESA Lunar Conference, 1998. Sardinia. Italy. P. 1.1-1.6.
  27. *Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990, 296 с.
  28. *Wetherill G.W.* Provenance of the terrestrial planets // *Geochim. Cosmoch. Acta.* 1994. V. 58. P. 4513-4520.
  29. *Гуревич Л.Е., Лебединский А.И.* Формирование планет. Известия АН СССР, сер. Физич., 1950. V. 14(6). 765-775.
  30. *Энеев Т.М., Козлов Н.Н.* Численное моделирование процесса формирования планет и протопланетной небулы // Препринт Ин-та Прикл. Математики, 1977. 80 с.
  31. *Хокни Р., Иствуд Дж.* Численное моделирование методом частиц. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 640 с.
  32. *Кривцов А.М., Кривцова Н.В.* Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела // *Дальневосточный математический журнал.* 2002. Т. 3. № 2. С. 254-276.
  33. *Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А.* Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 295 с.
  34. *Алтишуллер Л.В., Крупников К.К., Бражник М.И.* Динамическая сжимаемость металлов при давлениях от четырехсот до четырех миллионов атмосфер // *ЖЭТФ.* 1958. Т. 34. № 4. С. 886-893.
  35. *Поляченко В.Л., Фридман А.М.* Равновесие и устойчивость гравитирующих систем. М.: Наука, 1976. 447 с.
  36. *Barnes J., Hut P.A.* A hierarchical  $O(N \log N)$  force calculation algorithm // *Nature.* 1986. V. 324. P. 446-449.
  37. *Vasilyev S.V., Krivtsov A.M. and Galimov E.M.* Modeling space bodies growth by accumulation of space dust material. Proc. Of XXXII Summer School - Conference "Advanced Problem in Mechanics 2(X)4", June 24 - July 1, St. Petersburg, Russia. P. 425-428.