

УДК 523

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА СИСТЕМЫ ПЛАНЕТА–СПУТНИК В РЕЗУЛЬТАТЕ АККУМУЛЯЦИИ ВЕЩЕСТВА ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА

© 2011 г. С. В. Васильев¹, А. М. Кривцов¹, Э. М. Галимов²

¹Институт проблем машиноведения РАН

²Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

Поступила в редакцию 23.11.2010 г.

В работе предложена модель, позволяющая исследовать процесс роста двойной системы (планета–спутник) в результате аккумуляции рассеянного вещества из общего пылевого сгущения. Модель состоит из двух составляющих – компьютерной и аналитической. Компьютерная модель в ходе численного эксперимента позволяет определить зависимость отношения числа частиц, захваченных каждым телом, от отношения их масс. Далее полученная зависимость используется для замыкания аналитической модели роста протопланет, сводящейся к решению дифференциального уравнения. Показано, что при любом виде зависимости уравнение интегрируется в квадратурах, и исследовано его решение в ряде конкретных случаев. В результате получены возможные сценарии роста двойной системы.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема образования планетарной системы Земля–Луна остается одним из серьезных вопросов современной космохимии и астрофизики. Наиболее популярной в западной литературе является гипотеза мегаимпакта, предложенная в середине 70-х годов XX века группой американских ученых (Hartmann, Davis, 1975; Cameron, Ward, 1976), согласно которой Земля на заключительной стадии аккумуляции столкнулась с телом планетарных размеров. В результате столкновения расплавленная масса вещества земной мантии была выброшена на околоземную орбиту, где она быстро аккумулятировалась в виде земного спутника Луны. Последующие расчеты показали (Melosh, Sonett, 1986; Canup, Righter, 2000), что при мегаимпакте до 80% выброшенного вещества происходит за счет неизвестного ударника, а не из вещества Земли. Было показано (Галимов, 2004), что ряд геохимических наблюдений не согласуется с гипотезой мегаимпакта.

В работе (Галимов, 1995) был предложен альтернативный сценарий, по которому Луна и Земля возникли как двойная система при коллапсе облака нагретых пылевых частиц первичного состава, основывающийся на представлении о возможности образования планетно-спутниковых систем в процессе аккумуляции газопылевых сгущений (Гуревич, Лебединский, 1950; Энеев, Козлов, 1977). В работе (Галимов, Кривцов, 2005) была предложена новая модель образования Луны, учитывающая как геохимические, так и динамические аспекты проблемы. Согласно модели (Галимов, Кривцов, 2005), процесс образования системы Земля–Луна можно разделить на три этапа.

1. Гравитационная неустойчивость привела к образованию газопылевых сгущений, со временем об-

разующих достаточно большое и плотное облако, которое начинает коллапсировать под действием собственной гравитации.

2. Образование в результате коллапса двух горячих тел – зародышей нынешних Земли и Луны.

3. Дальнейший рост зародышей за счет аккумуляции вещества из межпланетного пространства.

В работе (Галимов, Кривцов, 2005) подробно рассматривался второй этап образования системы – ротационный коллапс газопылевого облака. Однако для замыкания модели существенным является третий этап – медленный рост зародышей в результате аккумуляции вещества из межпланетного пространства. Данная статья посвящена исследованию этого процесса и получению ответа на основные вопросы, при этом возникающие, – каким образом будет распределяться вещество между двумя зародышами, как будет происходить их рост и изменение относительных размеров? Ответы на эти вопросы необходимы для дальнейшего анализа геохимического состава образовавшихся тел и помогут при анализе существующих в настоящее время динамических и геохимических характеристик системы Земля–Луна. Процесс роста зародышей исследовался ранее аналитическими методами (Сафронов, 2002; Harris, 1978). В работе (Harris, 1978) аналитически были получены сходные с данной работой результаты для случая, когда масса одного из зародышей планет много меньше массы другого. В данной работе предлагается комбинированная компьютерно-аналитическая модель роста двойной системы в результате аккумуляции рассеянного вещества пылевого сгущения, являющаяся развитием подхода, изложенного в работах (Галимов, Кривцов, 2005; Vasilyev и др., 2004).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим модельную задачу о развитии системы двух гравитирующих тел (что может быть применимо, в частности, и к развитию системы Земля–Луна). Предположим изначальное существование пары крупных космических тел – зародышей, вращающихся вокруг общего центра масс. Предположим, что рост зародышей происходит за счет падения на них частиц вещества из окружающего пространства, при этом падение частиц происходит в гравитационном поле двойной системы. Далее, для определенности, два крупных тела будем называть протопланетами, а падающее на них вещество – пылевыми частицами. Названия эти достаточно условны, в ходе роста тела могут превратиться в планету и ее спутник, планетой, вообще говоря, не являющийся, падающее вещество может быть как в форме пылевых частиц, так и представлять собой газопылевые сгущения или планетезимали. Однако для простоты изложения будет сохранена указанная терминология.

Средние плотности вещества протопланет и пылевых частиц полагаются одинаковыми. На самом деле, различия в плотности могут быть связаны как с различием состава вещества протопланет и пылевых частиц, так и со сжатием протопланет под действием собственной гравитации. Однако учет данных факторов сильно усложнил бы модель и поэтому выведен за рамки данной работы.

Обозначим m_1 и m_2 массы протопланет (для определенности будем считать, что $m_1 > m_2$), $m = m_1 + m_2$ – суммарная масса системы, a – расстояние между протопланетами, G – гравитационная постоянная. В работе учитываются только взаимное притяжение протопланет и их гравитационное воздействие на пылевые частицы. Гравитационное взаимодействие пылевых частиц и их воздействие на протопланеты не учитываются. Радиусы орбит протопланет a_1 , a_2 и угловая скорость ω их обращения вокруг центра масс системы считаются неизменными и определяются формулами

$$a_1 = \frac{m_2}{m} a, \quad a_2 = \frac{m_1}{m} a, \quad \omega^2 = \frac{Gm}{a^3}. \quad (1)$$

Для упрощения, в данной постановке задачи обращение системы двух тел вокруг Солнца не учитывается. Так как рассматриваемая область находится внутри сферы Хилла для наибольшего из тел, такое упрощение оправдано. В работе проводится комплексное численно-аналитическое моделирование процесса аккумуляции частиц зародышами. Цель работы – выяснить, каким образом будет происходить рост зародышей за счет падающих на них частиц, на основании вычислительных экспериментов и аналитических расчетов при различных вариациях постановки задачи и ее параметров. Задача рассматривается в двухмерной и трехмерной постановках. Во всех численных экспериментах прово-

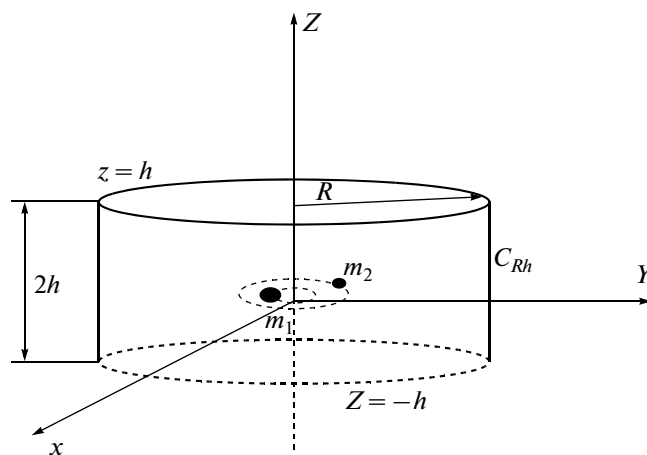


Рис. 1. Геометрическая модель системы двух вращающихся зародышей.

дились прямые вычисления траекторий каждой частицы. Эти траектории довольно разнообразны и сложны: частица может совершить несколько оборотов вокруг центра масс системы, пока не упадет на одно из тел зародышей.

ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Рассматривается система двух протопланет, вращающихся в плоскости XY по круговым орбитам вокруг общего центра масс. На данную систему последовательно падают более мелкие тела (частицы), моделирующие облако космической пыли, окружающее зародыши планет. В трехмерной постановке начальные положения частиц пыли равномерно распределены по цилиндрической поверхности C_{Rh} радиуса R и высотой $2h$. Ось цилиндрической поверхности C_{Rh} совпадает с общим центром круговых орбит главных тел. Массы частиц одинаковы, начальные скорости равны нулю. Координаты каждой последующей частицы выбираются случайно на поверхности C_{Rh} , далее вычисляется ее траектория в гравитационном поле двойной системы до соприкосновения с поверхностью одного из тел. Поверхности протопланет моделируются сферами радиуса r_1 и r_2 . Вычисления прекращаются также, если частица вылетела за пределы сферы радиуса $2R$ с центром в центре масс системы. Затем на поверхность C_{Rh} вносится следующая частица и процесс повторяется. В результате многократного повторения расчета производится регистрация числа частиц, упавших на первое и второе тело. Эта регистрация частиц в данной постановке описывает изменение масс главных тел. Влияние частиц на движение главных тел не учитывается. В двухмерной постановке единственное отличие состоит в том, что частицы вносятся на окружность, являющуюся пересечением цилиндра C_{Rh} и плоскости XY (рис. 1).

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РОСТА ПРОТОПЛАНЕТ

В описанной выше постановке компьютерного эксперимента не учитывается изменение масс зародышей планет, определяется лишь число частиц n_1 и n_2 , упавших, соответственно, на первое и второе тело. Однако эти данные позволяют построить аналитическую модель роста протопланет. Покажем это. Из компьютерного расчета может быть получена функция f , связывающая отношение масс m_2/m_1 протопланет с пропорцией упавших на них частиц n_2/n_1 :

$$f\left(\frac{m_2}{m_1}\right) = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2)$$

Введем безразмерный параметр, равный отношению масс протопланет

$$\xi = \frac{m_2}{m_1}, \quad 0 < \xi < 1. \quad (3)$$

Функция $f(\xi)$, очевидно, должна обладать следующими свойствами:

$$0 < f(\xi) < 1; \quad f(0) = 0, \quad f(1) = 1. \quad (4)$$

Теперь предположим, что падение частиц продолжается длительное время, значительно превышающее время компьютерного расчета. Тогда массы протопланет станут увеличиваться, причем отношение скоростей роста масс протопланет $\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$ будет равно отношению n_2/n_1 (при условии равенства плотностей вещества протопланет и пылевых частиц). В результате, для роста зародышей планет можно написать следующую систему уравнений

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = f\left(\frac{m_2}{m_1}\right), \quad m_1 + m_2 = m(t), \quad (5)$$

где $m(t)$ — суммарная масса, которую будем полагать известной функцией времени.

Используя полученные уравнения, исследуем, как со временем будет изменяться отношение масс протопланет ξ . Для этого с использованием уравнений (5) вычислим производную $\dot{\xi} = \left(\frac{\dot{m}_2}{m_1}\right)$, выражая массы протопланет через m и ξ . В результате получим

$$\dot{\xi} = \Phi(\xi) \frac{\dot{m}}{m}, \quad (6)$$

где функция $\Phi(\xi)$ определяется соотношением

$$\Phi(\xi) = (1 + \xi) \frac{f(\xi) - \xi}{f(\xi) + 1} \equiv \left(\frac{1}{1 + \xi} + \frac{1}{f(\xi) - \xi} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Дифференциальное уравнение (6) легко сводится к квадратурам

$$\int_{\xi_0}^{\xi} \frac{d\zeta}{\Phi(\zeta)} = \ln \frac{m(t)}{m_0}, \quad (8)$$

где ξ_0 и m_0 — начальные значения соответствующих величин. После вычисления интеграла (8) и нахождения $\xi(t)$ массы протопланет могут быть вычислены по формулам

$$m_1 = \frac{m}{1 + \xi}, \quad m_2 = \frac{\xi m}{1 + \xi}. \quad (9)$$

Однако важные выводы о характере зависимости (t) можно сделать без вычисления интеграла (8). Так, из уравнений (6)–(7) следует, что знак $\dot{\xi}$ совпадает со знаком разности $f(\xi) - \xi$ (все остальные сомножители положительны в силу того, что, согласно постановке задачи, массы протопланет растут со временем). Случаю $f(\xi) = \xi$ соответствует динамическое равновесие $\dot{\xi} = 0$ — массы протопланет растут со временем, но их отношение остается неизменным. Для получения условия устойчивости некоторого положения равновесия проварируем уравнение (6) в окрестности $\xi = \xi_*$, что дает

$$\delta \dot{\xi} = \Phi'(\xi_*) \frac{\dot{m}}{m} \delta \xi, \quad (10)$$

где $\delta \xi$ — вариация (отклонение от положения равновесия). Из полученного уравнения следует, что при ненулевом $\Phi'(\xi_*)$ необходимым и достаточным условием устойчивости является условие

$$\Phi'(\xi_*) < 0 \Leftrightarrow f'(\xi_*) < 1. \quad (11)$$

Второе неравенство из (11) получено с использованием тождества $f(\xi_*) = \xi_*$. Для анализа изменения величины ξ со временем удобно рассмотреть на одном графике зависимости $f = f(\xi)$ и $f = \xi$ — рис. 2. Если кривая $f = f(\xi)$ расположена выше прямой $f = \xi$, то величина ξ растет, в противном случае — убывает. Состоянию системы соответствует точка на кривой $f(\xi)$, с течением времени ее положение меняется в соответствии с направлением изменения ξ . Пересечению кривой $f = f(\xi)$ и прямой $f = \xi$ соответствует точка динамического равновесия $\xi = \xi_*$. Из рис. 2 видно, что равновесие устойчиво, если при отклонении от него в сторону увеличения ξ кривая $f = f(\xi)$ оказывается ниже прямой $f = \xi$, в противном случае равновесие неустойчиво. Это условие, очевидно, эквивалентно полученному выше критерию устойчивости (11).

Таким образом, если функция $f(\xi)$ получена из компьютерного моделирования, то эволюция системы может быть описана аналитически с помо-

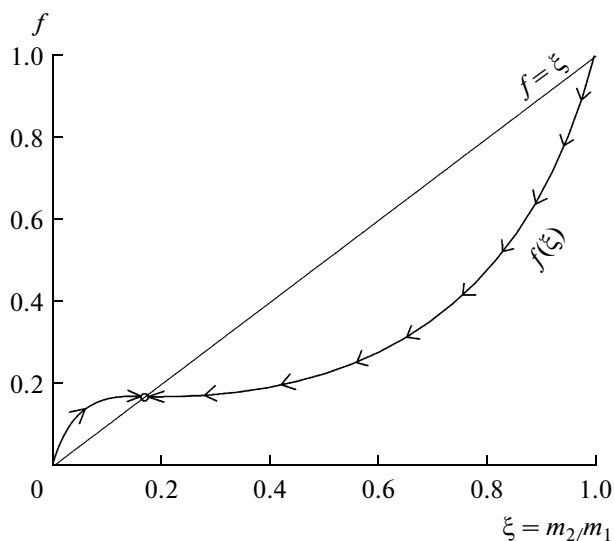


Рис. 2. Схематическое изображение зависимости отношения числа захваченных частиц от отношения масс протопланет.

щью уравнений (6)–(8) или проанализирована графически на основе рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Согласно проведенному выше аналитическому рассмотрению, задача численного моделирования

сводится к определению функции $f(\xi)$, связывающей отношение масс $\xi = \frac{m_2}{m_1}$ протопланет с пропорцией упавших на них частиц $n_2 = n_1$.

Типичный вид зависимости $f(\xi)$, полученной в результате компьютерного моделирования, приведен на рис. 3. Из рисунка видно, что почти на всем интервале значений выполняется $f(\xi) < \xi$. Следовательно, с течением времени отношение масс уменьшается – меньшее тело аккумулирует значительно меньше пылевых частиц, чем большее (не пропорционально их размерам), в результате чего его относительная масса уменьшается. Однако этот процесс не может продолжаться до бесконечности при некотором малом значении $\xi = \xi_*$ кривая $f = f(\xi)$ пересекает прямую $f = \xi$ и наступает динамическое равновесие – массы растут, а пропорция между ними не меняется. При этом $f'(\xi_*) < 0$, то есть ситуация аналогична изображенной на рис. 2 – равновесие устойчиво. На рис. 4 это пересечение показано более детально, видно, что равновесие наступает при $\xi_* = 0.05$.

Таким образом, при неограниченном подводе массы к системе вращающихся тел отношение их масс будет стремиться к малому, но все же фиксированному значению.

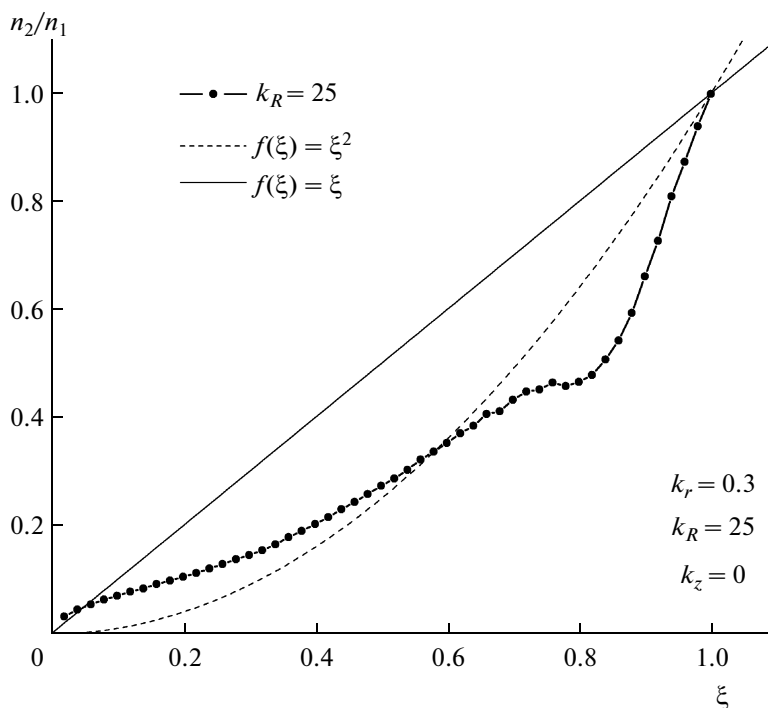


Рис. 3. Типичный вид зависимости, полученной из компьютерного эксперимента.

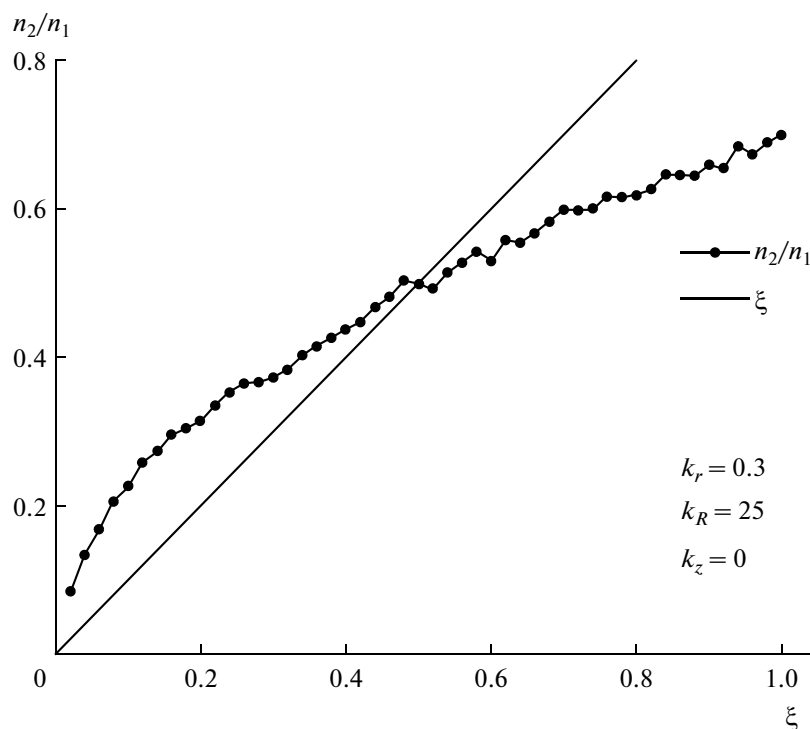


Рис. 4. Случай малых отношениях масс протопланет.

Рассматриваемая система, однако, содержит три существенных безразмерных параметра, значения которых влияют на результат

$$k_r = \frac{r_1}{a}, \quad k_R = \frac{R}{a}, \quad k_z = \frac{h}{R}, \quad (12)$$

где a — расстояние между телами, r_1 — радиус большего тела, h и R — высота и радиус цилиндра C_{Rh} , на котором задаются начальные положения пылевых частиц. Безразмерный параметр k_r характеризует удаленность протопланет друг от друга, параметр k_R — удаленность начального положения частиц, параметр k_z — относительную ширину разброса частиц по координате z (толщину пылевого сгущения). При $k_z = 0$ трехмерная постановка эквивалентна двумерной. Результаты, приведенные на рис. 3, соответствуют следующим значениям параметров

$$k_r = 0.3; \quad k_R = 25; \quad k_z = 0. \quad (13)$$

В этом и всех последующих компьютерных экспериментах использовалось число частиц $n = 10^5$. При таком количестве частиц получаются достаточно гладкие графики зависимости $f(\xi)$, а дальнейшее увеличение числа частиц мало влияет на результат.

Проанализируем влияние безразмерных параметров на результаты расчета. Параметр k_R — удаленность начального положения частиц. На рис. 5 исследуется сходимость результатов при росте k_R . Значения остальных параметров: $k_r = 0.3$, $k_z = 0$. Расчеты показали, что сходимость функциональ-

ной зависимости наступает примерно при $k_R = 25$, дальнейшее увеличение этого параметра мало влияет на результат. Таким образом, это значение является максимальным, которое имеет смысл использовать в расчетах.

Параметр k_r — удаленность протопланет друг от друга. В отличие от k_R , данный параметр характеризует скорее физическую, а не вычислительную сторону задачи. На рис. 6 представлены результаты варьирования этим параметром при $k_R = 25$, $k_z = 0$. Видно, что наиболее гладкая зависимость $f(\xi)$ реализуется при $k_r = 0.45$, т.е. когда протопланеты изначально близки друг к другу. Возможно, это связано с уменьшением вероятности пролета падающих частиц между протопланетами. С уменьшением k_r зависимость $f(\xi)$ становится менее регулярной, появляются осцилляции. На этом рисунке также в качестве иллюстрации к расчету показан график отношения числа выброшенных частиц (n_3) к общему числу упавших частиц (n).

В качестве базового значения для большинства дальнейших расчетов было выбрано значение $k_r = 0.3$, что позволяет получить достаточно регулярную зависимость $f(\xi)$ и находится в хорошем согласии с результатами предыдущего этапа исследования моделирования образования двойной системы в процессе ротационного коллапса газопылевого облака (Галимов, Кривцов, 2005).

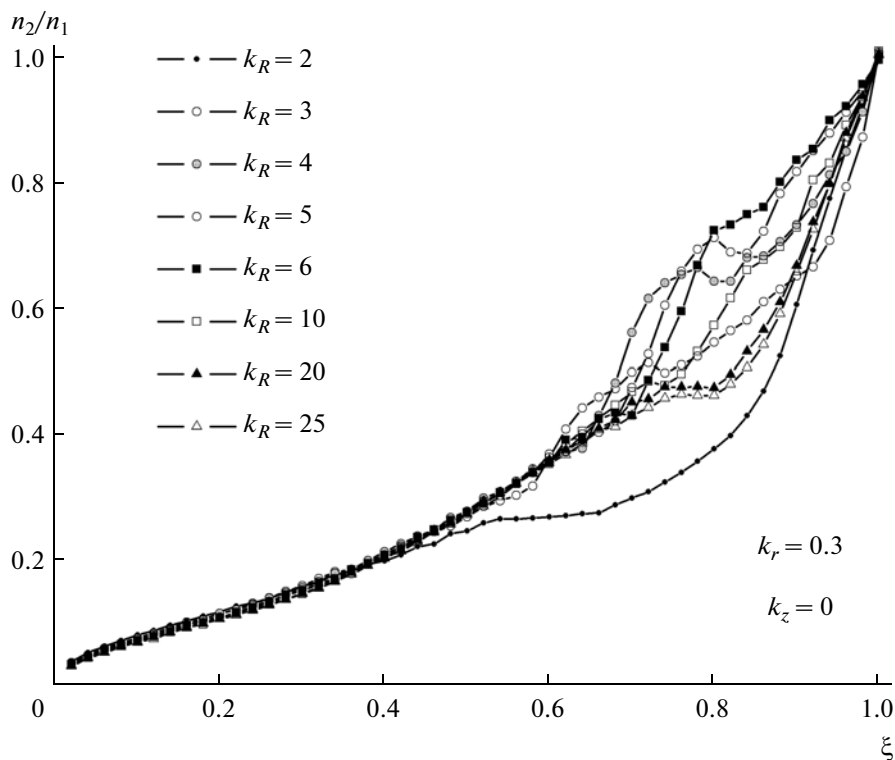


Рис. 5. Вариация параметром k_R , характеризующим относительный размер области питания.

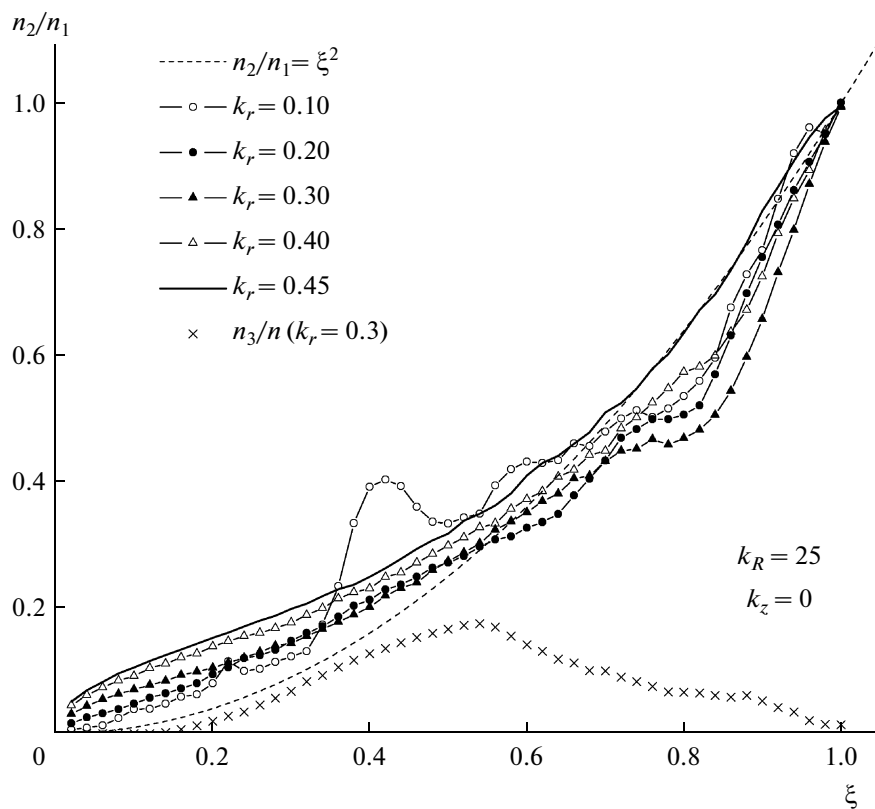


Рис. 6. Вариация параметром k_r , характеризующим размер протопланет по отношению к расстоянию между ними.

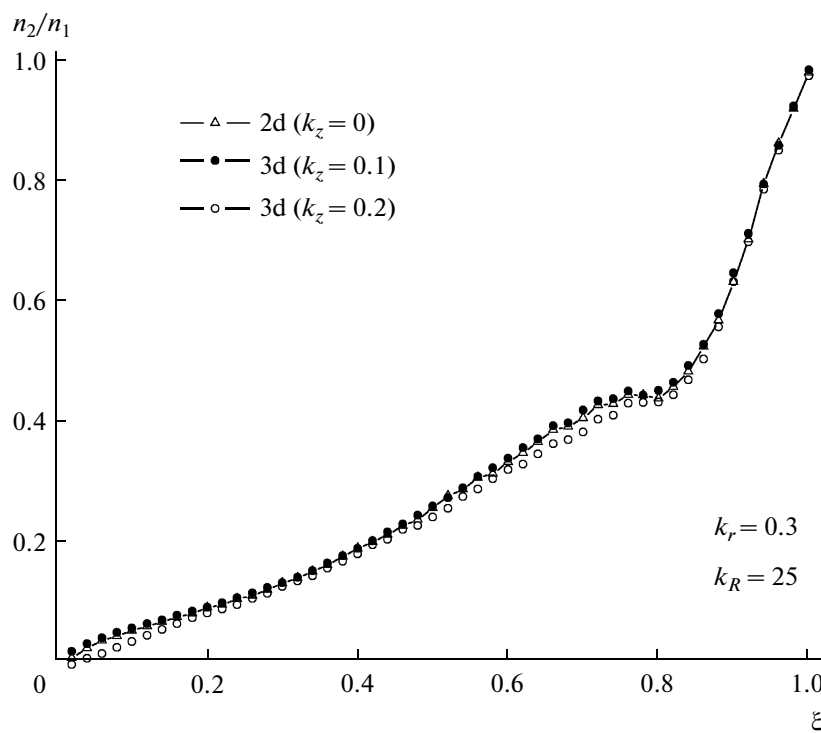


Рис. 7. Сравнение результатов двумерного и трехмерного моделирования.

Параметр k_z — относительная ширина разброса частиц по координате z (относительная толщина облака частиц). Расчеты проводились при $k_R = 25$, $k_r = 0.3$. На рис. 7 показано сравнение результатов, полученных в двумерной $k_z = 0$ и трехмерной $k_z > 0$ постановках.

Видно, что при малых k_z функциональная зависимость в трехмерной постановке мало отличается от двумерной. Однако при более детальном рассмотрении этой зависимости обнаруживается, что в области малых значений влияние параметра k_z оказывается существенным. Из рис. 8 видно, что с увеличением параметра k_z точка пересечения кривой $f = f(\xi)$ с прямой $f = \xi$ сдвигается влево по оси. Иными словами, равновесное состояние в относительном росте масс протопланет достигается при более малых отношениях m_2/m_1 , чем в двумерном моделировании. При дальнейшем увеличении параметра k_z это пересечение уже не наблюдается. В этом случае при неограниченном подводе массы к системе вращающихся протопланет отношение массы меньшего тела к большему будет стремиться к нулю.

На рис. 9 показано изменение зависимости $f(\xi)$ при существенном увеличении параметра k_z . Из рисунка следует, что по мере увеличения толщины облака, функциональная зависимость сохраняет свой общий вид, однако становится более монотонной, исчезают перегибы, что позволяет ее аппроксимировать степенной функцией.

В целом численный эксперимент показал, что при изменении безразмерных параметров в широком диапазоне зависимости $f = f(\xi)$ остается гладкой и лежит ниже прямой $f = \xi$, по крайней мере для не слишком малых значений. Следовательно, по мере аккумуляции пылевых частиц происходит неравномерный рост протопланет — отношение их масс $\xi = m_2/m_1$ уменьшается. При достижении достаточно малого значения может наступить динамическое равновесие — пропорциональный рост протопланет.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрение результатов численного эксперимента показывает, что во многих случаях (см. рис. 7, 10) функция $f(\xi)$ может быть достаточно хорошо аппроксимирована степенной зависимостью

$$f = \xi^{k+1}; \quad k > 0. \quad (14)$$

Тогда первое из уравнений системы (5) легко интегрируется, что приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$m_2^{-k} - m_1^{-k} = c^{-k}, \quad m_1 = m_2 = m(t), \quad (15)$$

где c — константа интегрирования, имеющая размерность массы. Полученная система задает в неявном виде искомые функции $m_1(t)$ и $m_2(t)$. Если подвод массы неограничен, то $m(t) \rightarrow \infty$, а следовательно, стремится к бесконечности и масса

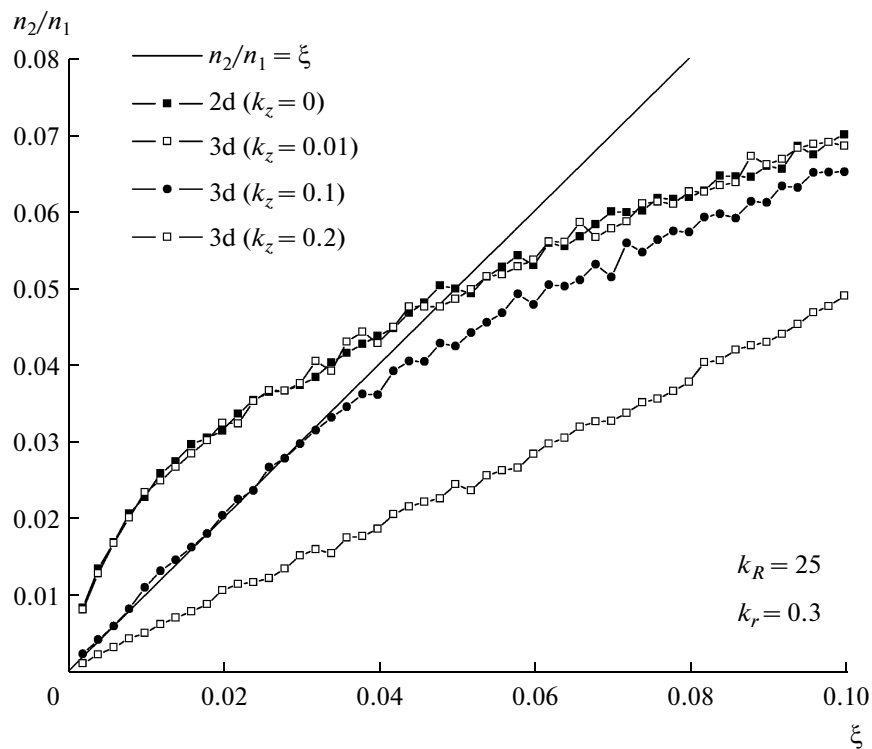


Рис. 8. Сравнение результатов двумерного и трехмерного моделирования при малых отношениях масс зародышей планет.

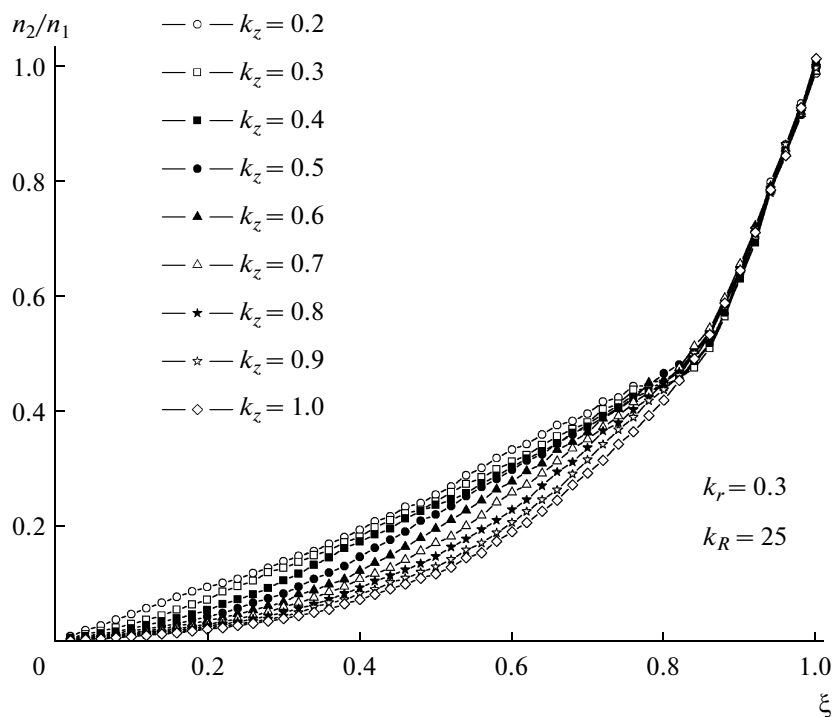


Рис. 9. Варьирование параметром k_z , характеризующим относительную толщину пылевого сгущения.

большого тела: $m_1(t) \rightarrow \infty$. Но тогда из первого уравнения системы (15) сразу получаем, что меньшая масса стремится к постоянной величине:

$$m(t) \rightarrow \infty \Rightarrow m_2(t) \rightarrow c = (m_{20}^{-k} - m_{10}^{-k})^{-\frac{1}{k}}, \quad (16)$$

где m_{10} и m_{20} – массы протопланет в начальный момент времени. Таким образом, при неограниченном подводе массы большее тело аккумулирует практически всю массу облака, в то время как размеры меньшего тела остаются ограниченными. Те же выводы можно получить, вычисляя интеграл в уравнении (8), что приводит к следующей неявной зависимости от t :

$$\frac{1 + \xi}{\xi} \sqrt{1 - \xi^k} = \frac{1}{c} m(t). \quad (17)$$

При неограниченном подводе массы уравнение (17) дает

$$m(t) \rightarrow \infty \Rightarrow \xi \rightarrow \frac{m(t)}{c}, \quad (18)$$

что согласуется с полученными ранее выводами.

Особенно простой вид полученные формулы приобретают при $k = 1$, что соответствует квадратичной функции $f(\xi) = \xi^2$. В этом случае уравнение (17) может быть решено в явном виде:

$$\xi(t) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{c^2}{m^2(t)} - 1} \right) \frac{m(t)}{c}, \quad c = \frac{m_{10} m_{20}}{m_{10} - m_{20}}. \quad (19)$$

После нахождения $\xi(t)$ массы протопланет $m_1(t)$ и $m_2(t)$ вычисляются по формулам (9).

На рис. 4 и 7 показано, насколько согласуется квадратичная функция с численными результатами. Степенная аппроксимация функции $f(\xi)$, использованная в данном параграфе, как правило, справедлива для не слишком малых значений ξ . При малых ξ , согласно приведенным выше результатам компьютерных экспериментов, зависимость $f = f(\xi)$ может отклониться от степенной зависимости и пересечь прямую $f = \xi$. При приближении системы к этой точке прекращается изменение отношения $m_2 = m_1$ и далее массы m_1 и m_2 продолжают свой рост пропорционально друг другу.

СРАВНЕНИЕ

Аналогичная проблема роста протопланет была рассмотрена В.С. Сафроновым в (Сафронов, 2002), где в результате чисто аналитического исследования были получены сходные с данной работой результаты. Формально в работе Сафронова рассматривалась другая задача: планеты вращаются вокруг Солнца внутри питающего облака, а в нашей задаче вокруг общего центра масс в питающем облаке. Однако в обеих задачах происходит вращение системы

внутри питающей среды, вокруг центра питающего облака, что позволяет провести их сравнение.

В работе (Сафронов, 2002) было показано, что при росте двух тел в питающей среде различие масс с течением времени будет увеличиваться, т.е. большее тело становится все больше, причем большее тело растет быстрее как абсолютно, так и относительно, т.е. отношение m_2/m_1 растет. Согласно (Сафронов, 2002), это отношение может расти лишь до значения 10^{-3} . Компьютерные эксперименты, проведенные в данной работе, показывают, что в двухмерной постановке (рис. 5) равновесие наступает при $m_1/m_2 = 50 \times 10^{-3}$. Однако в трехмерной постановке по мере увеличения толщины питающего пылевого облака, это значение снижается до величин порядка 10^{-3} . Таким образом, наблюдается как качественное, так и количественное совпадение результатов.

ВЫВОДЫ

В работе была исследована задача роста системы двух зародышей планет, обращающихся вокруг общего центра масс и аккумулирующих вещество из пылевого облака, окружающего эти зародыши. Задача была рассмотрена в двумерной и трехмерной постановках, причем показано, что при достаточно малой толщине пылевого облака результаты двумерного и трехмерного моделирования практически совпадают. Было выявлено, что в двумерной постановке при неограниченном подводе массы в систему реализуется следующий сценарий роста протопланет: оба зародыша растут неограниченно, отношение их масс стремится к значению, при котором большее тело составляет примерно 5% от массы большего тела. В трехмерной постановке при малой толщине пылевого облака также реализуется этот сценарий, однако по мере увеличения толщины облака равновесное отношение масс протопланет уменьшается. Если отношение толщины облака к его диаметру превосходит критическое значение, примерно равное 0.1, то сценарий изменяется: большее тело растет неограниченно, меньшее растет до некоторого предела, отношение масс протопланет при этом стремится к нулю. Предложена аналитическая аппроксимация численной зависимости отношения скоростей роста протопланет от отношения их масс, что позволило получить аналитическое решение задачи.

Данная работа позволяет сделать вывод, что в рамках сценария с неограниченным ростом обоих зародышей планет современное соотношение масс в системе Земля–Луна можно объяснить тем, что подвод массы по какой-то причине прекратился. Для других же планет Солнечной системы, имеющих значительно меньшие отношения масс спутников к массе планеты, ситуация может быть объ-

яснена более долгим подводом массы в систему вращающихся зародышей этих планетарных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
- Галимов Э.М.* Проблема происхождения Луны // Основные направления геохимии / Ред. Галимов Э.М. М.: Наука, 1995. С. 8–45.
- Галимов Э.М.* О происхождении вещества Луны // Геохимия. 2004. № 7. С. 691–706.
- Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В. и др.* Динамическая модель образования системы Земля–Луна // Геохимия. 2005. № 11. С. 1137–1149.
- Гуревич Л.Е., Лебединский А.И.* Формирование планет // Изв. АН СССР. Сер. физич. 1950. 14(6). С. 765–775.
- Сафронов В.С.* Избранные труды. Происхождение Земли и планет. Т. 1. 2002. С. 163–168.
- Энеев Т.М., Козлов Н.Н.* Численное моделирование процесса формирования планет и протопланетной небулы // Препр. Ин-та прикл. Математики. 1977. 80 с.
- Canup R.M., Righter K.* Origin of the Earth and Moon. Univ. Ariz. Press. 2000. 555 p.
- Cameron A.G.W., Ward W.* The origin of the Moon // Proc. 7th Lunar Sci. Conf. 1976. P. 120–122.
- Harris A.W.* Satellite formation, II // Icarus. 1978. V. 34. P. 128–145.
- Hartmann W.K., Davis D.R.* Satellitized planets and lunar origin // Icarus. 1975. V. 24. P. 504–515.
- Melosh H.J., Sonett C.R.* When worlds collide: Jetted vapor plumes and the Moon's origin // Origin of the Moon /Eds Hartmann W.K., Phillips R.J., Taylor G.J. Lunar Planet. Inst. Houston. 1986. P. 621–642.
- Vasilyev S.V., Krivtsov A.M., Galimov E.M.* Modelling space bodies growth by accumulation of space dust material // Proc. XXXII Int. Summer School-Conf. Advanced Problems in Mechanics. 2004. St. Petersburg, Russia. P. 425–429.