

УДК 523-52

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ ПЫЛЕ-ЛЕДЯНЫХ КЛАСТЕРОВ НА ЛИНИИ ЛЬДА В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

© 2021 г. М. Я. Маров^{a, *}, А. В. Русол^{a, **}, А. Б. Макалкин^{a, b, ***}

^aИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*e-mail: marovmail@yandex.ru

**e-mail: fermata@inbox.ru

***e-mail: makalkin@ifz.ru

Поступила в редакцию 02.06.2020 г.

После доработки 14.12.2020 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Представлены результаты математического (имитационного) моделирования структуры и свойств гетерогенных фрактальных пыле-ледяных кластеров размером ~ 0.1 – 10 см и их распада на фрагменты на линии водяного льда в протопланетных дисках. Основная цель работы — выяснение условий, при которых распад кластера в результате сублимации льда приводит к образованию крупных фрагментов, сопоставимых по массе и размерам с исходным кластером или, напротив, мелких и мало-массивных фрагментов. Преобладание по массе крупных или мелких фрагментов с внутренней стороны от линии льда с учетом различий их взаимодействия с газом в диске может оказать существенное влияние на локализацию и специфику формирования планетезималей. Предполагается, что кластеры состоят из пылевых агрегатов двух типов: один — преимущественно из водяного льда с малой примесью более тугоплавкого вещества, другой — преимущественно из менее летучего чем лед вещества; при этом размеры агрегатов обоих типов в десятки–сотни раз меньше размера кластера. Варьируются соотношения размеров, плотностей и массовых долей агрегатов обоих типов. При выборе значений этих параметров используются кометные данные. Показано, что крупные массивные фрагменты с внутренней стороны линии льда могут образовываться, если ледяные агрегаты в среднем существенно крупнее тугоплавких. В этом случае массивные тугоплавкие фрагменты образуются даже при относительно высокой массовой доле водяного льда ($> \sim 0.3$), согласующейся с протосолнечным отношением масс тугоплавкой и ледяной компонент ≤ 2 , при условии, что отношение плотностей тугоплавких и ледяных агрегатов $< \sim 3$. Если же отношение плотностей порядка 10, то массивные фрагменты образуются при значительно меньшей доле льда (~ 0.1), которая, однако, не противоречит кометным данным.

Ключевые слова: планеты; формирование, протопланетный диск, пылевые агрегаты, пыле-ледяные кластеры, линия льда, планетезимали, моделирование

DOI: 10.31857/S0320930X2103004X

ВВЕДЕНИЕ

Изучение фрагментации пыле-ледяных кластеров в протопланетных дисках на линии водяного льда (“снеговой линии”) при движении (миграции) вещества к центральной звезде непосредственно связано с определением зоны образования планетезималей во внутренней области диска. На этой линии (фронте испарения) при низких давлениях, характерных для протопланетных дисков, начинается сублимация льда и кластеры претерпевают значительные структурные изменения. Если кластеры достаточно разреженные (проницаемые) и состоят из небольших частиц, то на фронте испарения происходит полная сублимация льда, в результате которой кластер распадается и образуются безводные (безледные)

фрагменты, состоящие из пылевых агрегатов. От соотношения размеров и масс исходного кластера и его фрагментов, образовавшихся в результате испарения льда, зависит дальнейшая судьба фрагментов в диске. При малых размерах фрагменты будут накапливаться с внутренней стороны линии льда и образовывать планетезимали вблизи нее (Saito, Sirono, 2011; Ida, Guillot, 2016). Если же эти размеры после испарения льда не слишком малы по сравнению с исходным кластером, то из-за эффективной потери углового момента при трении о газ они будут перемещаться на меньшие радиальные расстояния, где может произойти накопление пылевой компоненты вещества диска, необходимое для образования планетезималей в зоне формирования внутренних

планет (Drażkowska и др., 2016; Макалкин, Артюшкова, 2017).

С физической точки зрения, процесс фрагментации пыле-ледяных кластеров на линии льда является примерно одинаковым для окосолнечного и других протопланетных дисков. Это подтверждается наблюдениями протопланетных дисков, в частности, диска вокруг молодой звезды HL Tau, в котором часть наблюдаемых колец можно связать с фазовыми переходами, на внутреннем из которых происходит сублимация льда воды (Carrasco-González и др., 2019). Таким образом, механизм изменения структуры вещества в рамках рассматриваемой эволюционной модели можно распространить на формирование систем экзопланет, содержащих планеты земного типа.

Влияние структуры содержащих лед и пылевую компоненту кластеров на процесс накопления вещества, ведущий к образованию планетезималей вблизи линии льда, изучалось в работе (Schoonenberg, Ormel, 2017). При этом рассматривались только два варианта структуры пыле-ледяных кластеров, которые предполагались плотными: первый — двуслойные частицы с силикатным ядром и ледяной оболочкой, второй — кластеры со многими силикатными частицами микронных размеров, заключенными внутри сплошного ледяного массива (куска льда с микронными вкраплениями).

Однако структура кластеров с внешней стороны от линии льда может быть более сложной. Об этом, в частности, свидетельствуют данные по комете 67P/Чурюмова—Герасименко. Была получена оценка пористости ядра кометы на уровне (70–80)% (Davidsson и др., 2016), обнаружено наличие в ядре пылевых агрегатов, имеющих фрактальную структуру, наряду с более плотными агрегатами типа гальки (pebbles). Получено высокое отношение масс тугоплавкого (труднолетучего) вещества и водяного льда δ внутри ядра ($\delta > 3$), найдено различие в составе образующих комету частиц (Fulle и др., 2016; 2019). Выяснилось, что ядро кометы состоит из довольно плотных агрегатов с размерами $> \sim 1$ мм и пористостью $\sim 50\%$, состоящих из тугоплавкого (нелетучего) вещества — силикатов, сульфидов и большой доли органики (углеводородов) — и не содержащих или почти не содержащих льда (Blum и др., 2017; Fulle и др., 2019). Более крупные агрегаты, ~ 1 см, в комете 67P состоят на 80–90% по массе из тугоплавкого вещества и на 10–20% из водяного льда (Fulle и др., 2016; 2019). Массовая доля плотных агрегатов (пемблов) составляет до 99% вещества кометы, а около 1% приходится на рыхлые пылевые агрегаты с фрактальной структурой. Обнаружение фрактальных пылевых агрегатов в комете 67P может быть объяснено только сохранением первичного допланетного вещества в кометном ядре (Blum, 2018). Данные, полученные при полетах к другим кометам (1P/Halley, 9P/Tempel 1, 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2) и по результатам наземных наблюдений (см. статью Fulle и др., 2019 и библио-

графию в ней) также накладывают ограничения на состав кометных ядер, сформировавшихся на допланетной стадии.

Эксперименты по столкновениям мелких пылевых агрегатов, имеющих фрактальную структуру, показали, что их изначальное уплотнение и соответствующий рост фрактальной размерности приводит к слипанию агрегатов, а затем, по мере их дальнейшего уплотнения, слипание сменяется отскоком при взаимных столкновениях, когда их размеры достигают ~ 0.1 – 1 см в случае тугоплавких агрегатов. Размеры могут быть значительно больше у фрактальных агрегатов, состоящих преимущественно из водяного льда, поскольку наибольшая относительная скорость, при которой еще возможно их слипание, на порядок выше (Kataoka и др., 2013; Gundlach, Blum, 2015; Blum и др., 2017; Blum, 2018). Слипание ледяных частиц с тугоплавкими должно быть менее эффективным. Образование характерных для кометы 67P агрегатов, преимущественно или почти полностью состоящих из тугоплавкого вещества, возможно, происходило в области протопланетного диска с малым содержанием водяного льда либо на более ранней стадии при температуре выше температуры конденсации водяного льда.

Таким образом, с учетом новых кометных данных структуру пылевых агрегатов за линией водяного льда можно представить в виде фрактального кластера, состоящего из агрегатов двух типов: тугоплавких (состоящих преимущественно из менее летучих веществ, чем водяной лед) и ледяных (состоящим в основном из водяного льда). Оба типа агрегатов имеют высокую пористость, не менее той, которая характерна для тугоплавкой и ледяной компонент вещества кометы 67P/Чурюмова—Герасименко. Возможно, тугоплавкие агрегаты могут содержать незначительное количество льда на поверхности или в микропорах, а ледяные агрегаты могут содержать единичные или множественные тугоплавкие ядра, не оказывающие существенного влияния на среднюю плотность агрегата. Пока неизвестно, как ведут себя при столкновениях в условиях протопланетного диска пылевые частицы и агрегаты смешанного состава, содержащие тугоплавкую компоненту и лед.

Если пыле-ледяные самогравитирующие сгущения образовались в протопланетном диске в результате потоковой неустойчивости (Youdin, Goodman, 2005; Bai, Stone, 2010; Колесниченко, Маров, 2019) и/или гравитационной неустойчивости в обогащенном пылью экваториальном слое диска (Coradini и др., 1981; Goodman, Pindor, 2000; Youdin, 2011; Макалкин, Зиглина, 2018), то в результате гравитационного коллапса пыле-ледяного сгущения, состоящего из агрегатов с преимущественно пылевым и ледяным или смешанным составом, получается вещество, аналогичное кометному, при отношении масс пылевой и ледяной компонент в диапазоне $3 < \delta < 9$ (Lorek и др., 2016). Однако в протокометном и первичном ко-

метном веществе возможны более низкие, протосолнечные значения этого отношения, характерные для протопланетных дисков: $1.5 < \delta < 2$ (Pollack и др., 1994; Дорофеева, 2020). Хотя фрактальная размерность пыле-ледяного кластера за линией льда является недостаточно определенной величиной, можно ожидать, что она должна быть достаточно низкой, учитывая, что плотность кластера была меньше или существенно меньше, чем средняя объемная плотность кометы.

В данной работе путем численного моделирования исследуется структура гетерогенного фрактального кластера, состоящего из тугоплавких пылевых агрегатов и летучих ледяных агрегатов, которые полностью испаряются на линии водяного льда в протопланетном диске при движении к центральной звезде. В рассматриваемых моделях пренебрегается малой примесью водяного льда в тугоплавких агрегатах и считается, что плотности и радиусы тугоплавких агрегатов не изменяются при пересечении линии льда. Также пренебрегается возможным наличием мелких тугоплавких включений внутри ледяных агрегатов, которые сохраняются при испарении льда и дают некоторую (незначительную) добавку в тугоплавкое вещество в виде мелких (вероятно, микронных) пылевых частиц.

Исследуются свойства фрагментов, образующихся в результате полного испарения льда. Предположение, что при пересечении линии льда кластер полностью теряет ледяную компоненту и распадается на тугоплавкие фрагменты, является достаточно обоснованным при высокой проницаемости кластера с размером $< \sim 10$ см и размерах агрегатов, образующих кластер, $< \sim 1$ см. При таких размерах ледяных агрегатов полное испарение льда внутри кластера происходит в протопланетном диске за время порядка ~ 1 года (Drażkowska, Alibert, 2017).

Размеры тугоплавких пылевых агрегатов $< \sim 1$ см соответствуют получаемым в лабораторных экспериментах по взаимным соударениям таких агрегатов и в численных моделях образования планетезималей (Blum, 2018). Они согласуются с приведенными выше данными наблюдений по комете 67P/Чурюмова–Герасименко. По данным численного моделирования пористость ледяных агрегатов существенно больше и, соответственно, фрактальная размерность и плотность существенно меньше, чем у тугоплавких агрегатов (Blum, 2018; Lorek и др., 2016).

Основная цель исследования — выяснить условия, при которых в результате сублимации ледяных агрегатов образуются фрагменты малых масс и размеров по сравнению с исходным кластером за линией льда, а также условия, при которых образуются большие фрагменты, массы и размеры которых составляют значительную долю массы и размера исходного кластера. В первом случае мелкие фрагменты из-за малой скорости

радиального дрейфа должны накапливаться у линии льда, что способствует образованию здесь планетезималей. Во втором случае крупные фрагменты эффективно теряют угловой момент при трении о газ, что способствует их быстрому дрейфу от линии льда к центру диска и препятствует накоплению твердого вещества с внутренней стороны от линии льда, в области главного астероидного пояса в Солнечной системе и вероятной аналогичной зоны в планетных системах у других звезд.

Дальнейшее изменение масс фрагментов, образовавшихся на линии льда, происходит при их последующих столкновениях. Они могут как объединяться в более крупные кластеры (Drażkowska и др., 2016), так и распадаться на более мелкие фрагменты (Gundlach, Blum, 2015). При относительных скоростях $< \sim 1$ м/с фрагменты растут, при существенно больших скоростях — распадаются на части (Blum, 2018). Эти скорости зависят от интенсивности турбулентных движений и могут быть существенно меньше в средней плоскости протопланетного диска, чем вдали от нее (Carrea и др., 2017; Макалкин, Артюшкова, 2017). В данной статье рассматривается только образование фрагментов на линии льда и не прослеживается их дальнейшая эволюция.

ИСХОДНАЯ МОДЕЛЬ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Рассматривается модель структуры рыхлых кластеров сантиметрового — дециметрового размера, состоящих из смеси льда воды и пыли, которые при движении в газе протопланетного диска по направлению к центру пересекают линию водяного льда (“снеговую линию”) и в дальнейшем вносят вклад в образование планетезималей в зоне формирования планет земной группы. Предполагается, что пыле-ледяной кластер обладает фрактальной структурой и что содержащиеся в нем тугоплавкие и ледяные агрегаты имеют сферическую форму.

При построении модели используется алгоритм, в котором при формировании структуры кластера направление “стыковки” отдельных образующих его частиц (агрегатов) задается с помощью сплайнов, радиусы кривизны которых корректируются с целью обеспечения заданной фрактальной размерности (Русол, 2021). Такие характерные формы внутренней структуры кластера, напоминающие ветви, похожи на получаемые в лабораторных экспериментах (Wurm и др., 2003) и численных экспериментах (Marov, Rusol, 2015) “пушистые” образования с микронными и субмикронными частицами. Применяемый нами метод проницаемых частиц позволил моделировать сложные взаимодействия при кластер-кластерных столкновениях (Маров, Русол, 2011, 2018) и оценить параметры, обеспечивающие образование протяженных пространственных структур. Та-

кой усовершенствованный подход к построению кластера (Русол, 2021) можно назвать имитационным моделированием в том смысле, что он позволяет заменить крайне затратное (требующее использования суперкомпьютера) моделирование агрегирования системы при кластер-кластерных столкновениях на существенно более простое моделирование формирования кластера. При этом, однако, учитываются основные особенности его структуры, интересующие нас в данном исследовании: получение необходимой фрактальной размерности и соответствующей ей пористости, а также внутренней гетерогенности кластера, состоящего из агрегатов двух различных типов, отличающихся размерами, плотностями и содержанием по массе.

При формировании исходной структуры кластера чередование входящих в него тугоплавких и ледяных агрегатов определяется случайным образом, причем частота появления частиц каждого сорта управляется задаваемыми параметрами, в качестве которых используются массовые доли каждого сорта частиц (x_d и x_w) в формируемом кластере. В результате серии расчетов удается получить состав кластера, в котором значения массовых долей x_d и x_w близки к задаваемым значениям. Здесь и дальше нижние индексы d и w обозначают две компоненты твердого вещества с внешней стороны от линии льда в протопланетном диске: тугоплавкую пылевую компоненту и водяной лед.

В данной работе в основном рассматриваются кластеры с фрактальной размерностью $D_B = 2.75$. При такой фрактальной размерности пористость находится в диапазоне 70–80%, как следует из рассчитанных нами моделей (см. ниже), поэтому реализуется высокая проницаемость кластера, соответствующая его моделируемой “ворсистой” структуре. Параметр D_B определяется уравнением (2) в работе (Русол, 2021). Для проверки влияния величины фрактальной размерности на параметры кластеров и образующихся фрагментов предприняты также расчеты с варьируемой фрактальной размерностью (от 2.5 до 2.8) при фиксированных значениях других исходных параметров.

Высокая проницаемость кластера и небольшие размеры образующих его агрегатов $< \sim 0.1 - 1$ см, которые могут полностью терять водяной лед за время порядка ~ 1 года (Drażkowska, Alibert, 2017), позволяют вполне обоснованно предположить, что при пересечении линии льда кластер полностью теряет ледяную компоненту и распадается на тугоплавкие фрагменты.

В модели учтено, что тугоплавкие и ледяные частицы (агрегаты) полидисперсны, т.е. имеют распределение по размерам. Для обоих типов частиц принято обратное степенное распределение по радиусу частицы с показателем $p = 3.5$, которое достаточно универсально: оно неплохо соответствует распределению по размерам как мельчайших межзвездных частиц, так и кратеров на телах

Солнечной системы, создаваемых ударами крупных тел. Отметим вместе с тем, что варьирование показателя p в пределах от 3 до 4 не оказывает существенного влияния на основные результаты моделирования.

Помимо фрактальной размерности D_B к варьируемым входным параметрам модели относятся:

R_{cl} — радиус кластера, который определяется как сфера наименьшего радиуса, охватывающая центры всех сферических агрегатов (частиц), составляющих данный кластер;

$R_{d, \min}$ и $R_{d, \max}$ — минимальный и максимальный радиусы тугоплавких пылевых агрегатов (pebbles);

$R_{w, \min}$ и $R_{w, \max}$ — минимальный и максимальный радиусы агрегатов, состоящих из водяного льда;

ρ_d и ρ_w — плотности тугоплавких и ледяных агрегатов;

$\delta = \delta_s = x_{d, s} / x_{w, s}$ — задаваемое (приближенное) отношение массовых долей тугоплавкой пылевой компоненты и водяного льда в кластере, которое затем уточняется в результате расчета ($x_{d, s} + x_{w, s} = 1$).

Необходимость уточнения задаваемого значения δ связана с тем, что при моделировании кластера используется вариант формирования композиции частиц путем случайного выбора из массивов, сформированных по медианным значениям радиусов частиц, с последующей их заменой на распределение радиусов частиц по обратному степенному закону. Такой алгоритм приводит к погрешности массовых долей тугоплавких и ледяных частиц, следовательно, и параметра δ , а также фрактальной размерности кластера.

Параметрами подобия в рассматриваемой модели (в предположении сферической формы как кластера, так и агрегатов) являются отношения:

$$\begin{aligned} r_{d, \min} &= R_{d, \min} / R_{cl}, & r_{d, \max} &= R_{d, \max} / R_{cl}, \\ r_{w, \min} &= R_{w, \min} / R_{cl}, & r_{w, \max} &= R_{w, \max} / R_{cl}. \end{aligned} \quad (1)$$

При сохранении этих отношений (для заданного распределения частиц по размерам) сохраняются и отношения объемов агрегатов к объему кластера. Поэтому все результаты моделирования должны зависеть от указанных выше отношений, а не от абсолютных значений радиусов, что и было подтверждено численными экспериментами. С учетом этого в качестве входных параметров в расчетах использовались относительные радиусы $r_{d, \min}$, $r_{d, \max}$, $r_{w, \min}$ и $r_{w, \max}$, определяемые соотношениями (1). Эти минимальные и максимальные значения относительного радиуса принимались различными для агрегатов каждого типа — тугоплавких и ледяных.

Отношения характерных размеров тугоплавких и ледяных агрегатов в протопланетном диске

неизвестны. В серии рассматриваемых нами моделей отношения $r_{d, \min}/r_{w, \min}$ и $r_{d, \max}/r_{w, \max}$ варьировались от 0.1 до 10. Наименьший радиус агрегатов обоих типов принимался не менее 0.003 радиуса кластера. Возможные частицы еще меньшего радиуса не учитывались в расчетах из-за вычислительных ограничений на полное число частиц в кластере.

При моделировании использовались различные значения плотности тугоплавких агрегатов. Одно из них, $\rho_d = 1.2 \text{ г/см}^3$, соответствует пористости $\sim 50\text{--}60\%$ для вещества, состоящего из силикатов, сульфидов и органики в кометах и объектах пояса Койпера (Davidsson и др., 2016; Fulle и др., 2019) и в протопланетном диске на стадии образования планетезималей (Kothe и др., 2010). Рассматривались также модели с существенно меньшими значениями плотности, $\rho_d = 0.3\text{--}0.6 \text{ г/см}^3$; они соответствуют более высокой пористости, $\sim 75\text{--}90\%$, которая получается по результатам моделирования роста силикатных агрегатов в протопланетном диске (Zsom и др., 2010; Lorek и др., 2016; 2018). Для агрегатов, состоящих из водяного льда, использовались два значения. С учетом высокой пористости ледяных агрегатов в условиях протопланетного диска ($\sim 90\%$) (Lorek и др., 2018) было принято значение $\rho_w = 0.1 \text{ г/см}^3$. Рассмотрен также вариант с существенно более высокой плотностью $\rho_w = 0.4 \text{ г/см}^3$, которая лучше согласуется с кометными данными (Fulle и др., 2017).

Задаваемые значения отношения массовых долей тугоплавкой и ледяной компонент внутри кластера (δ) в представленных моделях варьировались в широких пределах: от 2 до 9. Этот диапазон полностью охватывает вероятный диапазон значений δ для комет и протокометного вещества $3 < \delta < 9$ (Fulle и др., 2019; Lorek и др., 2016), а нижняя граница диапазона не противоречит данным для протопланетного диска $1.5 < \delta < 2$ (Pollack и др., 1994; Дорофеева, 2020).

В модели вычисляются следующие параметры:

N_{cl} , N_d , N_w — полное количество частиц (агрегатов) в кластере, количество тугоплавких частиц и ледяных частиц в нем ($N_d + N_w = N_{cl}$);

M_{cl} , M_d и M_w — масса кластера и суммарные массы составляющих его тугоплавких и ледяных частиц ($M_{cl} = M_d + M_w$).

Эти массы позволяют рассчитать среднюю объемную плотность кластера

$\rho_{cl} = M_{cl}/V_{cl}$ где $V_{cl} = (4/3 \pi R_{cl}^3)$, а также получить уточненные значения массовых долей тугоплавкой и ледяной компонент $x_d = M_d/M_{cl}$ и $x_w = M_w/M_{cl}$ и, следовательно, уточненное значение $\delta = \delta = x_d/x_w$. С помощью вычисленных значений ρ_{cl} , x_d и x_w , а также задаваемых плотностей агрегатов ρ_d и ρ_w рассчитывается пористость (макропористость) кластера ψ , определяемая из соотношения $\psi = 1 - V_d/V_{cl} = 1 - \rho_{cl}/\rho_a$, где V_d — объем, за-

нимаемый тугоплавкими и ледяными агрегатами внутри кластера, ρ_a — средняя плотность вещества агрегатов, составляющих кластер (плотность кластера при нулевой пористости), которая равна $\rho_a = (x_d/\rho_d + x_w/\rho_w)^{-1}$.

К вычисляемым параметрам также относятся:

N_{fr} — количество тугоплавких фрагментов, образующихся в результате сублимации ледяных частиц в кластере,

N_i , M_i и L_i — количество тугоплавких агрегатов в i -м фрагменте, масса и максимальный линейный размер фрагмента (поскольку фрагменты имеют неправильную форму). Для параметров фрагментов также удобно пользоваться относительными величинами $n_i = N_i/N_d$; $m_i = M_i/M_d$; $l_i = L_i/2R_{cl}$, которые обозначают соответственно относительное содержание всех тугоплавких агрегатов (по числу частиц) в i -м фрагменте, их массовую долю в нем, а также максимальный размер фрагмента по отношению к диаметру кластера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нами были проведены серии численных экспериментов по распаду кластеров при различных исходных параметрах задачи. Ниже приведены результаты расчетов для семи вариантов (соответственно, Модели 1–7). Значения как исходных, так и рассчитываемых параметров по всем моделям для удобства сравнения моделей приведены в табл. 1.

Модель 1. Для этой модели характерно то, что в ней тугоплавкие агрегаты в кластере на порядок крупнее ледяных. Значения задаваемых параметров следующие: $r_{d, \min} = 0.05$, $r_{w, \min} = 0.005$, $r_{d, \min}/r_{w, \min} = r_{d, \max}/r_{w, \max} = 10$, $r_{d, \max}/r_{d, \min} = r_{w, \max}/r_{w, \min} = 2$, $\rho_d = 1.2 \text{ г/см}^3$, $\rho_w = 0.1 \text{ г/см}^3$, $\delta_s = x_{d, s}/x_{w, s} = 9$.

Рассчитанные значения параметров: $\rho_{cl} = 0.169 \text{ г/см}^3$, $x_d = 0.9004$; $x_w = 0.0996$, $\delta = 9.04$, $\psi = 0.706$, $N_{cl} = 597658$, $N_d = 461$, $N_w = 597197$, $N_{fr} = 413$.

Рассчитанные значения x_d и x_w соответствуют значению $\delta = 9.04$, которое очень близко к заданному (ориентировочному) значению.

На рис. 1 приведен вид кластера до и после сублимации льда. Видно, что он распался на мелкие фрагменты, несмотря на минимальную массовую долю льда для наших моделей с $x_w \approx 0.1$, соответствующую максимальному отношению $\delta = x_d/x_w \approx 9$.

На рис. 2 показан вид и значения параметров трех наибольших по массе фрагментов, образовавшихся в результате испарения ледяных агрегатов, входящих в состав кластера. В модели 1 каждый из этих фрагментов состоит всего лишь из трех частиц (агрегатов). Как видно из значений параметров m и l на рис. 2, массовая доля тугоплавких частиц в этих фрагментах (m), а также их максимальные относительные размеры (l) по

Таблица 1. Параметры моделей

Исходные параметры	Номер модели						
	1	2	3	4	5	6	7
$r_{d, \min}$	0.05	0.005	0.005	0.003	0.005	0.005	0.005
$r_{w, \min}$	0.005	0.005	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05
$r_{d, \min}/r_{w, \min}$	10	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$r_{d, \max}/r_{w, \max}$	10	1	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1
$r_{d, \max}/r_{d, \min}$	2	2	2	10	10	2	2
$r_{w, \max}/r_{w, \min}$	2	2	2	10	2	2	2
$\rho_d, \text{ г/см}^3$	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.3	1.2
$\rho_w, \text{ г/см}^3$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
$\delta_s = x_{d,s}/x_{w,s}$	9	9	9	9	9	2.25	2.25
Рассчитанные параметры	Номер модели						
	1	2	3	4	5	6	7
x_d	0.9004	0.9002	0.899	0.887	0.897	0.693	0.692
x_w	0.0996	0.0998	0.101	0.113	0.103	0.307	0.308
$\delta = x_d/x_w$	9.04	9.02	8.91	7.85	8.71	2.26	2.25
$\rho_{cl}, \text{ г/см}^3$	0.169	0.105	0.111	0.142	0.158	0.0391	0.158
ψ	0.706	0.816	0.805	0.735	0.719	0.790	0.787
N_{cl}	597658	652109	295990	799445	194993	321070	324543
N_d	461	279795	295605	798589	194449	320619	324130
N_w	597197	372314	385	856	544	451	413
N_{fr}	413	28774	1547	570	25871	928	986
$\Sigma_3 m$	0.030	0.003	0.35	0.49	0.021	0.37	0.40
$\Sigma_{12} m$	0.074	0.011	0.51	0.65	0.063	0.53	0.55
l_{\max}	0.046	0.236	0.997	0.999	0.667	0.999	0.998

Примечание. Расшифровка обозначений – в тексте статьи.

сравнению с диаметром кластера очень малы. В табл. 1 приведены значения суммарной массовой доли тугоплавкого вещества кластера в трех самых крупных фрагментах ($\Sigma_3 m$), равной $(M_1 + M_2 + M_3)/M_d$, которая для модели 1 равна 0.03. (Нумерация фрагментов начинается с самого массивного и идет в порядке убывания их масс.) В двенадцати крупнейших фрагментах содержится массовая доля пылевого (тугоплавкого) вещества: $\Sigma_{12} m = 0.074$. В табл. 1 также приведено значение наибольшего размера фрагментов l_{\max} , которое получается путем сравнения максимального линейного размера каждого фрагмента и выбора наибольшего из них. Для модели 1 получено значение $l_{\max} = 0.0456$.

Очевидно, увеличение массовой доли льда приводит к распаду кластера на отдельные тугоплавкие частицы (агрегаты). В то же время, как показывают расчеты, увеличение плотности ле-

дяных агрегатов в несколько раз (до $\rho_w = 0.4 \text{ г/см}^3$) из-за уменьшения доли объема кластера, приходящейся на ледяные агрегаты, увеличивает массы и размеры тугоплавких фрагментов в несколько раз, но они остаются очень малыми по сравнению с полной массой тугоплавкого вещества и размером кластера.

Модель 2. В отличие от модели 1, в этой модели взят один и тот же диапазон (от минимального до максимального) радиусов тугоплавких и ледяных агрегатов; при этом по сравнению с моделью 1 тугоплавкие агрегаты имеют на порядок меньшие размеры: $r_{d, \min} = 0.005$, $r_{w, \min} = 0.005$, $r_{d, \min}/r_{w, \min} = r_{d, \max}/r_{w, \max} = 1$. Остальные значения входных параметров такие же, как в модели 1: $r_{d, \max}/r_{d, \min} = r_{w, \max}/r_{w, \min} = 2$, $\rho_d = 1.2 \text{ г/см}^3$, $\rho_w = 0.1 \text{ г/см}^3$, $\delta_s = 9$.

В результате расчетов получены следующие значения параметров: $\rho_{cl} = 0.105 \text{ г/см}^3$, $x_d = 0.9002$,

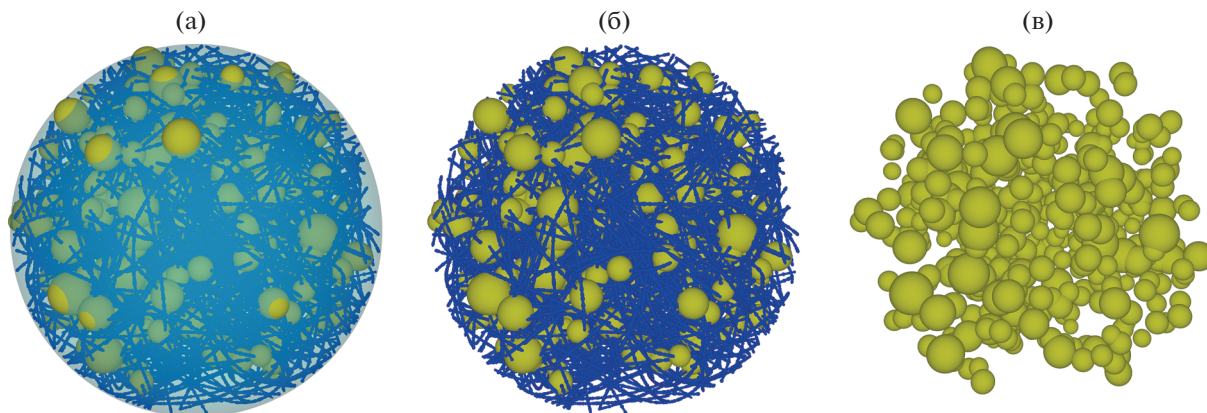


Рис. 1. Фрактальный кластер, модель 1: (а) охватывающий объем, (б) кластер до сублимации льда, (в) после сублимации льда.

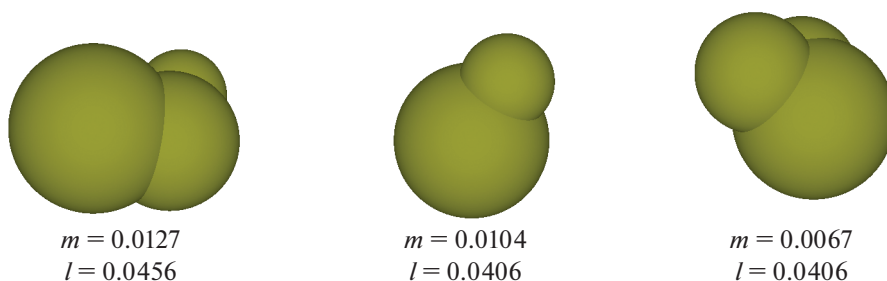


Рис. 2. Три фрагмента, наибольшие по массе, в модели 1 (в порядке убывания массы). m – доля массы тугоплавкого вещества кластера в каждом из фрагментов, l – максимальный размер каждого из фрагментов по отношению к диаметру кластера.

$x_w = 0.0998$, $\delta = 9.02$, $\psi = 0.816$, $N_{cl} = 652109$, $N_d = 279795$, $N_w = 372314$; $N_{fr} = 28774$. Вид кластера по этой модели до и после испарения льда показан на рис. 3.

На рис. 4 показан вид трех тугоплавких фрагментов в модели 2 (в каждом из них – около 300 тугоплавких частиц) и значения масс и наибольших размеров фрагментов m и l . Как видно, массовая доли тугоплавких частиц (m) в этих наибольших фрагментах еще меньше, чем в модели 1, из-за более мелких размеров частиц в модели 2, а максимальные относительные размеры (l) по сравнению с моделью 1 увеличились в несколько раз, но малы по сравнению с диаметром кластера.

Массовая доля тугоплавкого вещества кластера в трех самых массивных фрагментах $\Sigma_3 m$ модели 2 составляет всего лишь 0.003 – в 10 раз меньше, чем в модели 1, а $\Sigma_{12} m = 0.011$, в 7 раз меньше, чем в модели 1. При этом наибольший линейный размер фрагментов l_{max} , в пять раз больше, чем в модели 1 (см. табл. 1).

Модель 3. Ее отличие от модели 2 в том, что в ней радиусы ледяных агрегатов на порядок больше радиусов тугоплавких агрегатов. Соответственно, заданные значения радиусов таковы: $r_{d, min} = 0.005$,

$r_{w, min} = 0.05$, $r_{d, min}/r_{w, min} = r_{d, max}/r_{w, max} = 0.1$. Остальные заданные значения параметров такие же, как в моделях 1 и 2: $r_{d, max}/r_{d, min} = r_{w, max}/r_{w, min} = 2$, $\rho_d = 1.2$ г/см³, $\rho_w = 0.1$ г/см³, $\delta_s = x_{d, s}/x_{w, s} = 9$.

Расчитаны следующие значения параметров: $\rho_{cl} = 0.111$ г/см³, $x_d = 0.8991$, $x_w = 0.1009$, $\psi = 0.805$, $N_{cl} = 295990$, $N_d = 295605$, $N_w = 385$; $N_{fr} = 1547$. Расчитанные величины x_d и x_w дают значение $\delta = 8.91$, близкое к заданному.

Вид кластера до и после сублимации льда показан на рис. 5.

На рис. 6 показан вид трех самых массивных тугоплавких фрагментов, образовавшихся из-за сублимации льда для модели 3 (в каждом из них 20–40 тыс. частиц) и значения массы и максимального размера каждого из фрагментов (m и l). Суммарная массовая доля тугоплавких частиц в трех самых крупных фрагментах $\Sigma_3 m$ в этой модели равна 0.35, что на два порядка больше, чем в модели 2. В двенадцати крупнейших фрагментах содержится чуть более половины массы всего пылевого (тугоплавкого) вещества: $\Sigma_{12} m = 0.51$. Размеры 12-ти крупнейших фрагментов лишь на 10–20% меньше диаметра кластера. Такие фрагменты

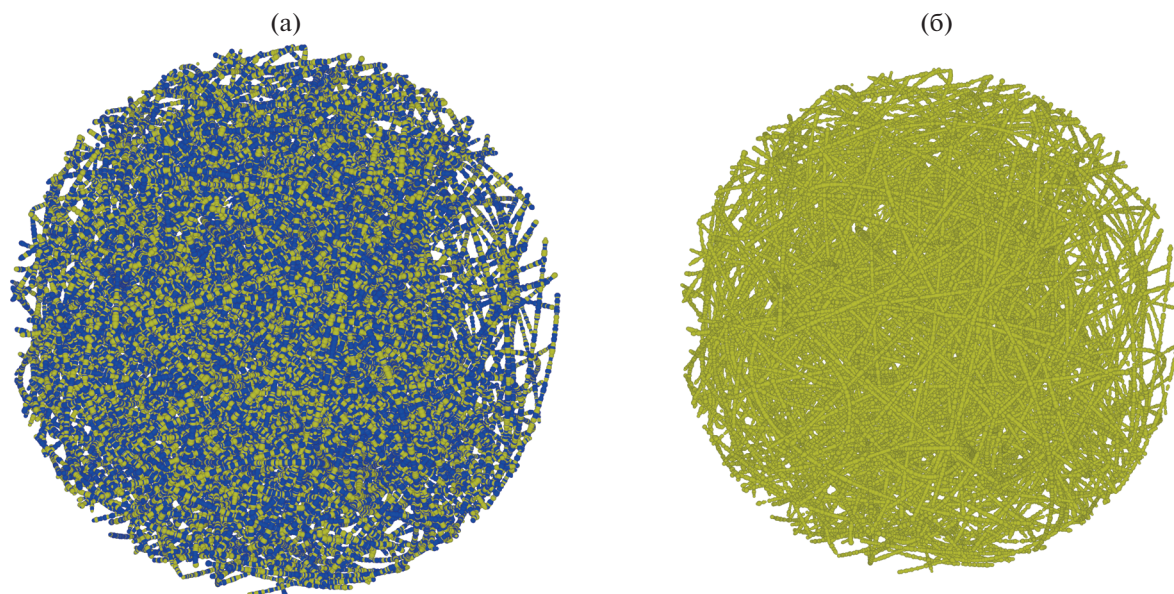


Рис. 3. Фрактальный кластер (модель 2): (а) до сублимации льда, (б) после сублимации льда.

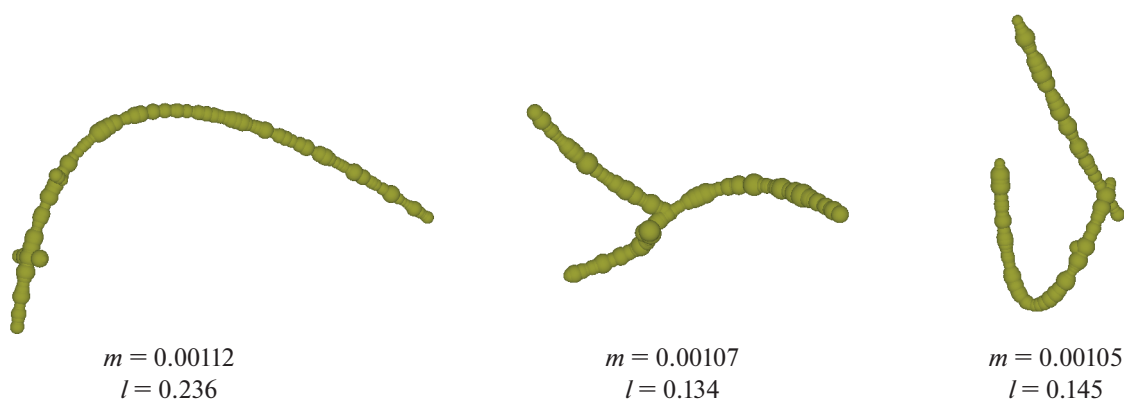


Рис. 4. Три фрагмента, наибольшие по массе в модели 2. Обозначения m и l , как на рис. 2.

должны испытывать значительное лобовое сопротивление в газе диска и эффективно терять орбитальный угловой момент.

Отметим, что в построенных моделях не учитывается возможность аккумуляции фрагментов, находящихся внутри охватывающего объема кластера после испарения льда. Такая аккумуляция за счет “сцепления” фрагментов приведет к значительному увеличению масс и плотностей крупнейших фрагментов и может обеспечить образование суперфрагмента, содержащего в себе подавляющую часть массы тугоплавкого вещества кластера; при этом лишь небольшая часть массы может остаться в мелких фрагментах.

Модель 4. Данная модель отличается от модели 3 тем, что в ней отношение максимального и минимального радиусов как пылевых (тугоплавких), так и ледяных агрегатов в пять раз больше,

чем в модели 3: вместо 2 это отношение принято равным 10. При этом минимальные значения радиусов обоих типов частиц на 40% меньше их значений в модели 3, а максимальные в 3 раза больше максимальных значений в модели 3. В результате этого (с учетом распределения радиусов агрегатов обоих типов по обратному степенному закону с $p = 3.5$) основная масса как тугоплавкого, так и ледяного вещества, оказывается в более крупных частицах.

В модели 4 приняты следующие значения радиусов: $r_{d, \min} = 0.003$, $r_{w, \min} = 0.03$, $r_{d, \min} / r_{w, \min} = r_{d, \max} / r_{w, \max} = 0.1$, $r_{d, \max} / r_{d, \min} = r_{w, \max} / r_{w, \min} = 10$. Остальные заданные значения параметров такие же, как в моделях 1 – 3: $\rho_d = 1.2 \text{ г/см}^3$, $\rho_w = 0.1 \text{ г/см}^3$, $\delta_s = 9$.

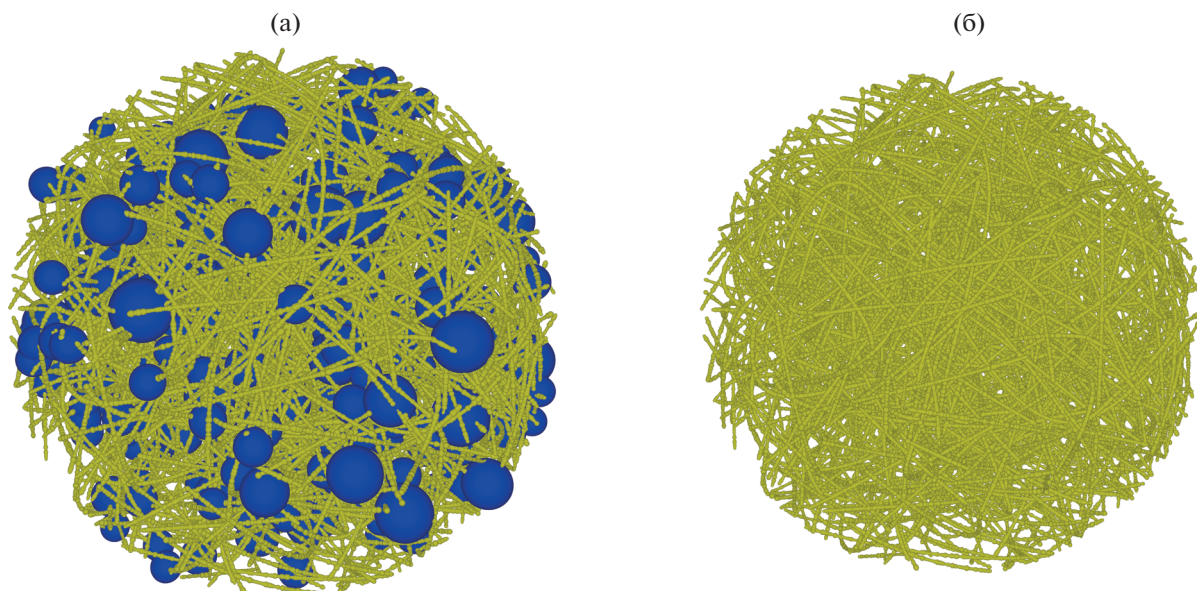


Рис. 5. Фрактальный кластер (модель 3): (а) до сублимации льда, (б) после сублимации льда.

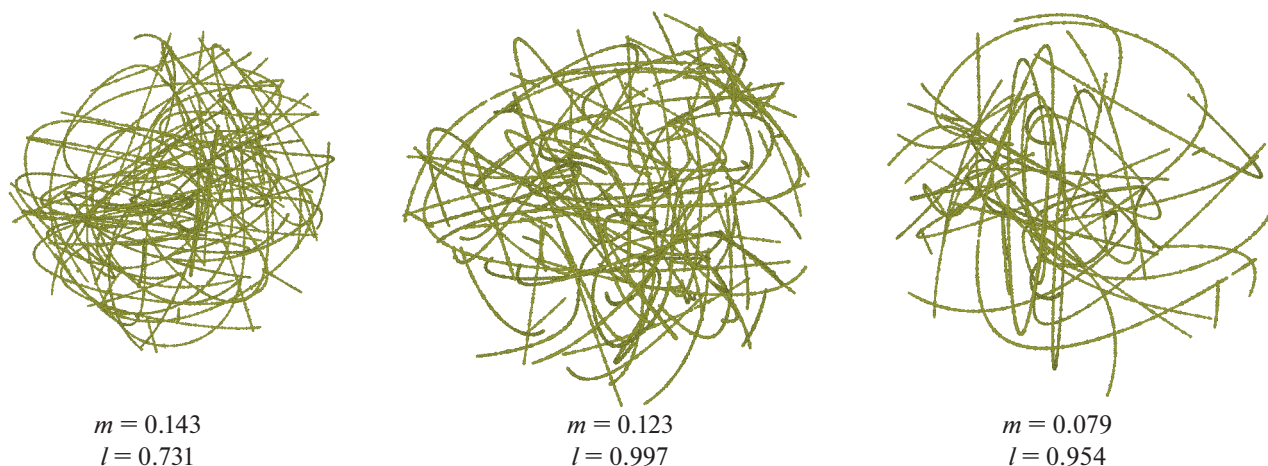


Рис. 6. Три наиболее массивных фрагмента в модели 3. Нумерация фрагментов – в порядке убывания массы. Смысл параметров m и l – как на рис. 2.

Вид полученного кластера до и после сублимации льда показан на рис. 7. Рассчитанные значения параметров: $\rho_{cl} = 0.142 \text{ г/см}^3$, $x_d = 0.887$, $x_w = 0.113$, $\delta = 7.85$, $\psi = 0.735$, $N_{cl} = 799445$, $N_d = 798589$, $N_w = 856$; $N_{fr} = 570$.

Три крупнейших фрагмента, полученные в модели 4, показаны на рис. 8. Наблюдается почти 9-кратное превышение массы в первом фрагменте по сравнению со вторым. В трех наибольших фрагментах содержится масса $\Sigma_3 m = 0.49$, т.е. почти половина всей массы тугоплавкой компоненты. В 12-ти фрагментах с наибольшим количеством частиц содержится полная масса $\Sigma_{12} m = 0.65$, т.е. по сравнению с моделью 3 наблюдается более

сильная концентрация массы в крупнейших фрагментах, которая может быть связана с троекратно бóльшим верхним пределом в распределении пылевых агрегатов по размерам. Размеры 12-ти наибольших пылевых агрегатов превышают 85% диаметра кластера, а у 8 из 12 – превышают 95% диаметра.

Как следует из сравнения рассчитанных масс фрагментов в моделях 3 и 4, при увеличении отношений максимального и минимального радиусов в степенном распределении по размерам тугоплавких и ледяных агрегатов: $r_{d, \max}/r_{d, \min}$ и $r_{w, \max}/r_{w, \min}$ происходит увеличение концентрации массы в крупнейших фрагментах, образовавшихся после испарения ледяной компоненты

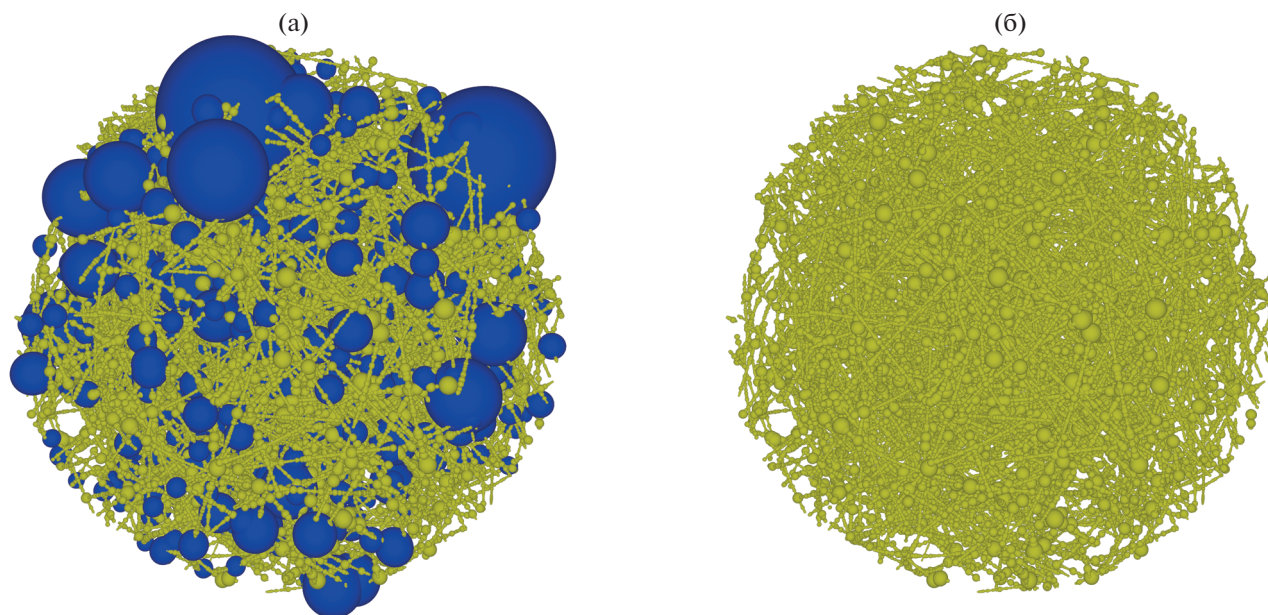


Рис. 7. Фрактальный кластер (модель 4): (а) до сублимации льда, (б) после сублимации льда.

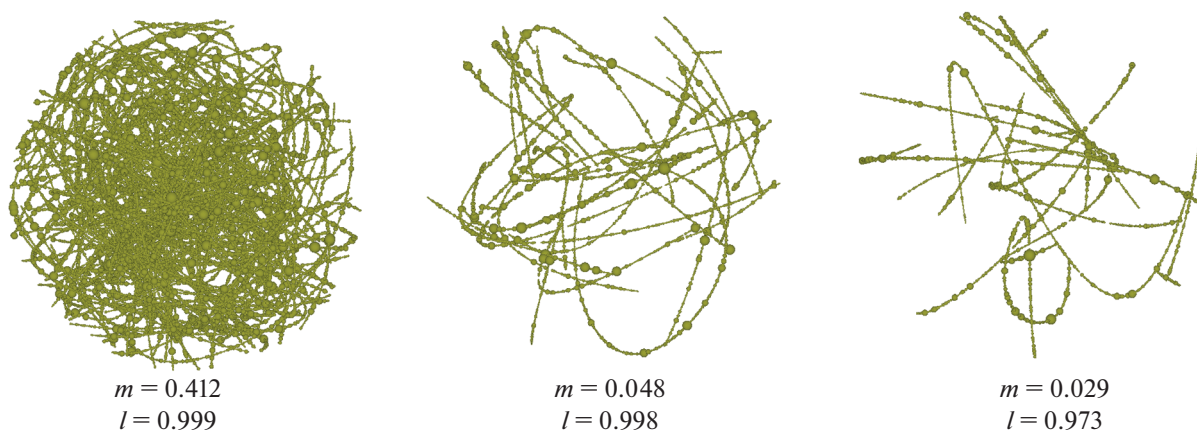


Рис. 8. Три наиболее массивных фрагмента в модели 4. Параметры m и l – как на рис. 2.

кластера: в модели 4 массовая доля тугоплавкого вещества в трех крупнейших фрагментах на 10–30% больше, чем в модели 3, и достигает 0.5, а в 12 крупнейших фрагментах в модели 4 эта масса на 15–25% больше, чем в модели 3, и достигает 0.65. Это, вероятно, связано с тем, что из-за трехкратного больших значений максимальных масс в распределениях как тугоплавких, так и ледяных частиц, основная часть массы тугоплавкой компоненты содержится в более крупных частицах, чем наибольшие частицы в модели 3, и это приводит к увеличению масс фрагментов. Других принципиальных различий между моделями 3 и 4 не наблюдается.

Модель 5. В этой модели, как и в модели 4, отношение максимального и минимального радиу-

сов для пылевых (тугоплавких) агрегатов равно 10, но в отличие от предыдущей модели, для ледяных агрегатов это отношение в пять раз меньше, то есть равно 2, как в модели 3. При этом максимальный радиус тугоплавких агрегатов равен минимальному радиусу ледяных. Кроме того, минимальные и максимальные радиусы тугоплавких агрегатов в $5/3 \approx 1.67$ раза больше таких радиусов в модели 4. Поэтому основная масса тугоплавкого вещества в модели 5 находится в более крупных частицах, а ледяного вещества – в более мелких, чем в предыдущей модели. Остальные параметры оставлены без изменения. В целом, набор значений входных параметров имеет вид: $r_{d, \min} = 0.005$, $r_{w, \min} = 0.05$, $r_{d, \min}/r_{w, \min} = 0.1$, $r_{d, \max}/r_{w, \max} = 0.5$,

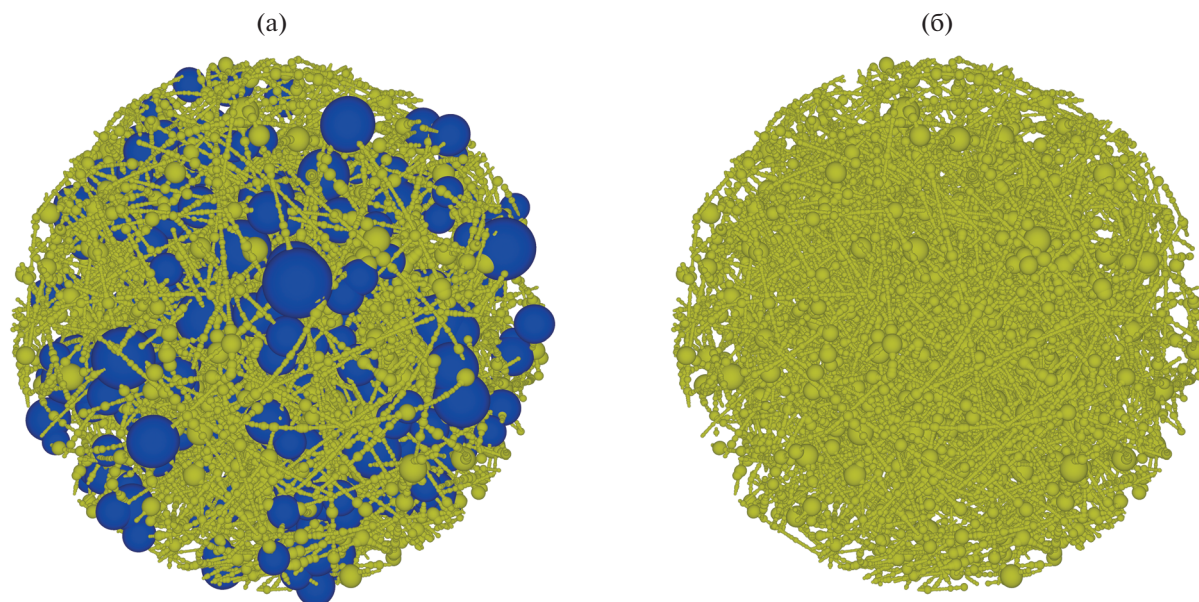


Рис. 9. Фрактальный кластер (модель 5): (а) до сублимации льда, (б) после сублимации льда.

$$r_{d, \max}/r_{d, \min} = 10, r_{w, \max}/r_{w, \min} = 2, \rho_d = 1.2 \text{ г/см}^3, \rho_w = 0.1 \text{ г/см}^3, \delta_s = 9.$$

Рассчитанные значения параметров: $\rho_{cl} = 0.158 \text{ г/см}^3, x_d = 0.897, x_w = 0.103, \delta = 8.71, \psi = 0.719, N_{cl} = 194993, N_d = 194449, N_w = 544; N_{fr} = 25871.$

Вид кластера до и после сублимации льда представлен на рис. 9. Особенность модели 5 — более узкий диапазон радиусов ледяных агрегатов, примыкающий к верхней границе диапазона радиусов тугоплавких агрегатов. Поэтому в данной модели радиусы ледяных и тугоплавких агрегатов, осредненные по массам внутри своего диапазона, отличаются не в 10 раз, как в моделях 3 и 4, а в 2.5–3 раза. В результате модель по различию средних радиусов тугоплавких и ледяных частиц является промежуточной между моделями 3 и 4 с одной стороны и моделью 2 — с другой. Эта особенность модели 5 ответственна за очень сильное уменьшение доли полной массы тугоплавкого вещества в крупнейших фрагментах.

Три наиболее массивных фрагмента в модели 5, представленные на рис. 10, имеют больше пустот и меньше ветвей, формирующих фрактальные кластеры фрагментов, чем крупнейшие фрагменты модели 4. Особенно важно, что суммарная массовая доля первых трех фрагментов $\Sigma_3 m$ в модели 5 составляет всего лишь 0.021, а 12 крупнейших фрагментов $\Sigma_{12} m = 0.063$ несмотря на то, что максимальные размеры этих фрагментов составляют от 25 до 67% диаметра первичного кластера.

Можно отметить еще одну особенность модели 5, отраженную на рис. 10: при очень малых массах крупнейших фрагментов максимальный

размер каждого фрагмента сопоставим с радиусом кластера. Это связано с тем, что в распределении тугоплавких частиц преобладают мелкие частицы, тогда как основная масса содержится в более крупных.

При осреднении по массам для каждого типа агрегатов в модели 5 отношение средних радиусов пылевых и ледяных агрегатов получается менее 3 (тогда как в моделях 3 и 4 оно равно 10). При этом, для модели 5 характерны более крупные тугоплавкие агрегаты, чем в модели 4, и более мелкие — ледяные: первые в среднем в 1.7 раза крупнее, а вторые в 2 раза мельче. Благодаря этим факторам полное количество тугоплавких агрегатов в модели 5 получается в четыре раза меньше, а количество фрагментов — в 45 раз больше, чем в модели 4. Все это приводит к уменьшению числа частиц и массовой доли тугоплавкого вещества даже в наибольших фрагментах и снижению концентрации массы в крупнейших фрагментах в модели 5 по сравнению с моделью 4.

В результате численного моделирования было подтверждено существование параметра подобия, который определяет степень концентрации массы тугоплавкого вещества кластера в крупнейших фрагментах при заданных размерах ледяных и тугоплавких частиц (агрегатов) в кластере. Таким параметром является отношение объема, который внутри кластера занимают все тугоплавкие частицы, к объему, занимаемому ледяными частицами, V_d/V_w . Для всех моделей с заданными размерами частиц обоих видов приблизительно одинаковая степень концентрации массы тугоплавких частиц в крупнейших фрагментах реали-

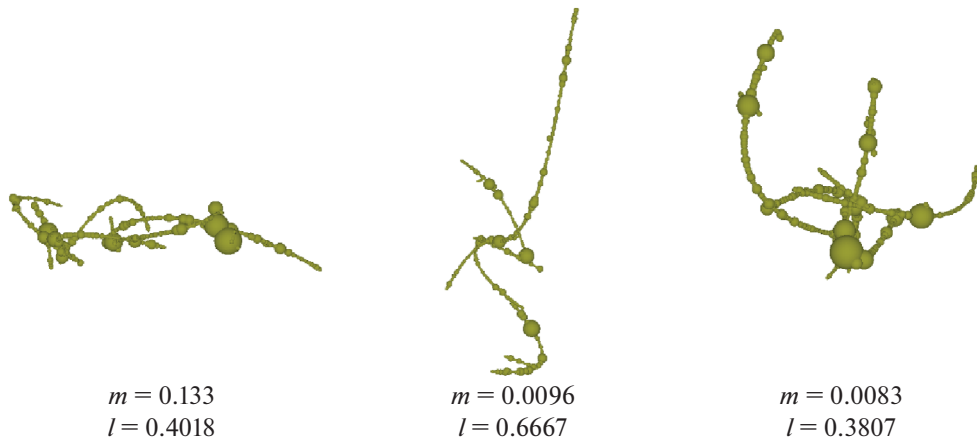


Рис. 10. Три наиболее массивных фрагмента в модели 5. Смысл параметров m и l , как на рис. 2.

зуется при одинаковых отношениях объемов V_d/V_w , то есть, когда выполняется соотношение

$$V_d/V_w = \frac{x_d}{\rho_d} / \frac{x_w}{\rho_w} = \frac{\rho_w x_d}{\rho_d x_w} = \frac{\rho_w}{\rho_d} \delta = \text{const.} \quad (2)$$

Ниже представлены результаты расчетов для двух моделей, имеющих такие же максимальные и минимальные радиусы частиц обоих типов, как в модели 3, но другие плотности частиц. При этом с помощью уравнения (2) варьировалось отношение массовых долей тугоплавких и ледяных частиц δ , чтобы получить такую же высокую степень концентрации массы тугоплавких частиц кластера в крупнейших фрагментах, как в модели 3, для которой выполняется соотношение:

$$V_d/V_w = (\rho_w/\rho_d)\delta \approx (0.1/1.2) \times 9 = 0.75 \quad (3)$$

Модель 6 предполагает, в отличие от модели 3, плотность тугоплавких агрегатов $\rho_d = 0.3 \text{ г/см}^3$, в четыре раза меньшую, чем в модели 3 (и всех предыдущих моделях) при прежней плотности ледяных агрегатов $\rho_w = 0.1 \text{ г/см}^3$. Для достижения степени концентрации массы тугоплавких частиц кластера в крупнейших фрагментах, аналогичной той, которая наблюдается в модели 3, из соотношений (2) и (3) следует значение параметра $\delta = \delta_s = x_{d,s}/x_{w,s} = 0.75 \times (0.3/0.1) = 2.25$. Значения остальных параметров остаются такими же, как в модели 3, следовательно, полный набор исходных параметров имеет вид: $r_{d,\min} = 0.005$, $r_{w,\min} = 0.05$, $r_{d,\min}/r_{w,\min} = r_{d,\max}/r_{w,\max} = 0.1$, $r_{d,\max}/r_{d,\min} = r_{w,\max}/r_{w,\min} = 2$, $\rho_d = 0.3 \text{ г/см}^3$, $\rho_w = 0.1 \text{ г/см}^3$, $\delta = x_d/x_w = 2.25$.

Рассчитанные значения параметров: $\rho_{cl} = 0.0391 \text{ г/см}^3$, $x_d = 0.693$, $x_w = 0.307$, $\delta = 2.26$, $\psi = 0.790$, $N_{cl} = 321070$, $N_d = 320619$, $N_w = 451$; $N_{fr} = 928$.

Суммарная массовая доля тугоплавких частиц в трех самых крупных фрагментах $\Sigma_3 m$ составляет в этой модели около 0.37, в двенадцати крупнейших фрагментах содержится чуть более половины

массы всего пылевого (тугоплавкого) вещества $\Sigma_{12} m \approx 0.53$. Размеры 12-ти крупнейших фрагментов находятся в интервале от 75 до 99.9% диаметра кластера. Эти значения массы, как видно из табл. 1, близки к полученным в модели 3.

Для иллюстрации сходства моделей с одинаковыми значениями параметра $(\rho_w/\rho_d)\delta$, входящего в уравнение (2), на рис. 11 показан вид кластера до и после сублимации льда в модели 6. При сравнении этого рисунка с рис. 5 видна высокая степень сходства структур.

Результаты расчетов для модели 6 подтвердили, что соотношение (2) справедливо с достаточно высокой степенью точности: при уменьшении плотности тугоплавких агрегатов в 4 раза, от 1.2 до 0.3 г/см³, для поддержания такой же, как в модели 3, высокой степени концентрации массы тугоплавкого вещества в крупнейших фрагментах достаточно уменьшить во столько же раз соотношение массы пыли и льда δ : от 9 до 2.25, что уже близко к протосолнечному значению.

Модель 7 отличается от предыдущей модели 6 тем, что в ней в четыре раза больше плотности как тугоплавких, так и ледяных агрегатов, то есть $\rho_d = 1.2 \text{ г/см}^3$, $\rho_w = 0.4 \text{ г/см}^3$. По сравнению с моделью 3 в модели 7 в четыре раза увеличена только плотность ледяных агрегатов. Остальные входные параметры остаются такими же, как в моделях 3 и 6. В результате, полный набор значений задаваемых параметров для модели 6 имеет вид: $r_{d,\min} = 0.005$, $r_{w,\min} = 0.05$, $r_{d,\min}/r_{w,\min} = r_{d,\max}/r_{w,\max} = 0.1$, $r_{d,\max}/r_{d,\min} = r_{w,\max}/r_{w,\min} = 2$, $\rho_d = 1.2 \text{ г/см}^3$, $\rho_w = 0.4 \text{ г/см}^3$, $\delta = 2.25$.

Значения параметров, полученные в результате расчета, следующие: $\rho_{cl} = 0.158 \text{ г/см}^3$, $x_d = 0.692$, $x_w = 0.308$, $\delta = 2.25$, $\psi = 0.787$, $N_{cl} = 324543$, $N_d = 324130$, $N_w = 413$; $N_{fr} = 986$.

Как видно из табл. 1, в модели 7 получена приблизительно такая же (чуть бóльшая) концентрация массы в наиболее массивных фрагментах, об-

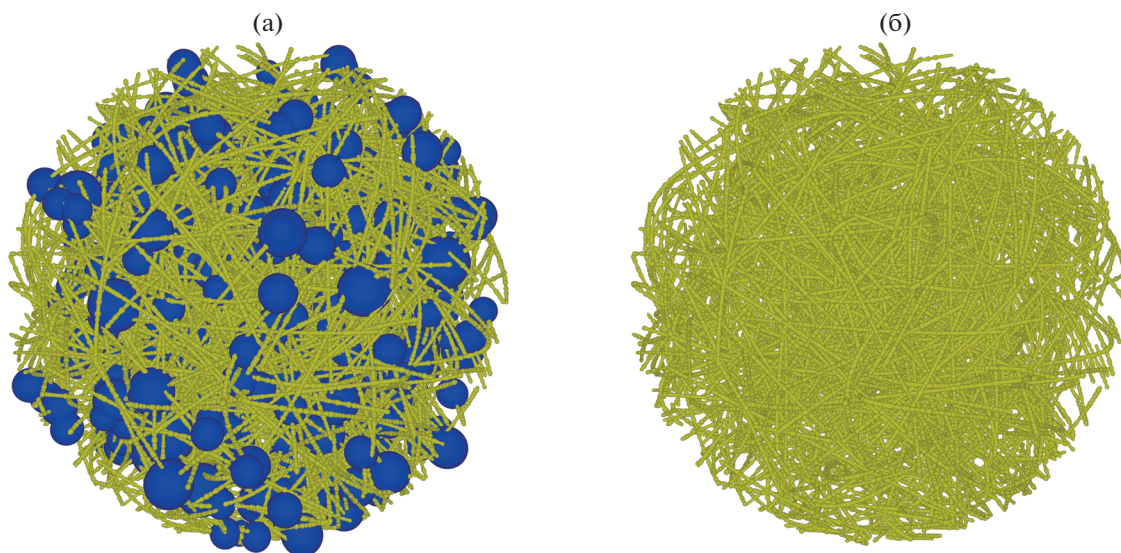


Рис. 11. Фрактальный кластер (модель 6): (а) до сублимации льда, (б) после сублимации льда.

разовавшихся в результате сублимации льда из кластера, как в моделях 3 и 6: для суммарной массовой доли тугоплавкого вещества в трех фрагментах получено $\Sigma_3 m = 0.40$, а в двенадцати наиболее массивных фрагментах $\Sigma_{12} m = 0.55$. Размеры 12 наибольших фрагментов варьируют от 0.7 до 0.998 диаметра кластера.

Расчеты модели 7 подтвердили, что при заданных значениях радиусов тугоплавких и ледяных агрегатов и фиксированном отношении их массовых долей в кластере (δ) на концентрацию масс в крупнейших фрагментах, в соответствии с формулой (2), влияет только отношение плотностей тугоплавких и ледяных агрегатов, а не их абсолютные величины.

Поскольку плотности тугоплавких пылевых агрегатов, как и агрегатов, состоящих (полностью или преимущественно) из водяного льда, в протопланетном диске неизвестны, то существование параметра подобия V_d/V_w , определяемого соотношением (2) и подтвержденного численными расчетами, может оказаться полезным. В частности, из наших численных экспериментов с учетом соотношений (2) и (3) следует, что образование крупных фрагментов в результате сублимации льда возможно даже при первичном (протокометном) отношении массовых долей тугоплавкого и ледяного вещества в диске $\delta = 1.5-2$, если отношение плотностей тугоплавкой и ледяной компонент кластера достаточно низкое, $\rho_d/\rho_w \approx 2-2.7$. Однако, оно не противоречит данным о плотности астероидов С-типа и углистых хондритов (Scheeres и др., 2015; Opeil и др., 2012).

Один из основных результатов, полученных в результате численного моделирования, заключается в том, что крупные фрагменты, сравнимые

по размеру с исходным кластером и составляющие значительную долю его массы, образуются только в том случае, если пылевые тугоплавкие агрегаты, входящие в состав кластера, значительно мельче ледяных агрегатов: при степенном распределении по радиусам (в предположении сферической формы агрегатов, принятом в данной работе), средние радиусы ледяных агрегатов (при любом способе осреднения) должны более чем в 3 раза превышать размеры тугоплавких агрегатов (при одинаковом отношении максимального и минимального радиусов для обоих типов частиц). Если же тугоплавкие агрегаты крупнее ледяных, как в модели 1, или имеют одинаковый диапазон размеров с ледяными агрегатами, как в модели 2, то даже при максимальном содержании тугоплавкой компоненты $x_d = 0.9$ в обеих моделях кластер распадается на мелкие фрагменты, каждый из которых состоит (как в модели 1) из нескольких частиц или (в модели 2), самое большее, из нескольких сотен частиц, и по массе не превышает 1% полной массы тугоплавкого вещества кластера. При этом крупнейшие фрагменты имеют размеры значительно меньше диаметра кластера. Не образуются массивные и плотные фрагменты и в случае (модель 5), когда средние размеры пылевых тугоплавких агрегатов в 2.5–3 раза больше, чем ледяных, но при этом отношение максимальных и минимальных размеров у первых гораздо шире, чем у вторых, а диапазоны размеров соприкасаются: $r_{d, \max} = r_{w, \min}$.

В остальных представленных моделях (3, 4, 6 и 7), размер тугоплавких агрегатов в кластерах на порядок меньше ледяных ($r_{d, \min}/r_{w, \min} = r_{d, \max}/r_{w, \max} = 0.1$), при этом отношение максимального радиуса к минимальному одинаково для обоих типов агрегатов. В таком случае, чтобы после испарения

льда масса тугоплавкого вещества была сконцентрирована в массивных фрагментах, нужно, чтобы выполнялось определенное соотношение между плотностями тугоплавких и ледяных агрегатов и их массовыми долями в кластере. Это соотношение вытекает из уравнения (2), в котором константа зависит от спектра размеров частиц. Для случая, когда $r_{d, \max}/r_{d, \min} = r_{w, \max}/r_{w, \min} = 2$, как в моделях 3, 6 и 7, необходимо выполнение неравенства $(\rho_w/\rho_d)\delta \geq 0.75$, следующего из соотношения (3). При более широком спектре размеров частиц, $r_{d, \max}/r_{d, \min} = r_{w, \max}/r_{w, \min} = 10$, как в модели 4, концентрирование массы в нескольких крупнейших фрагментах происходит при $(\rho_w/\rho_d)\delta \geq 0.62$. При отношении плотностей двух компонент вещества кластера $\rho_d/\rho_w = 12$, принятом в моделях 3 и 4, для образования массивных фрагментов требуется отношение масс тугоплавкого вещества и льда $\delta = x_d/x_w \geq 9$ (модель 3) или $\delta \geq 7.5$ (модель 4). В этих моделях несколько наибольших фрагментов содержат большую часть массы тугоплавкой компоненты, их размеры близки к размерам исходного кластера, а плотность и фрактальная размерность наибольшего фрагмента довольно высоки. Однако, требуемое отношение масс $\delta > 7.5$, хотя и не противоречит данным по некоторым кометам, но гораздо выше величины $\delta = 1.5-2$, характерной для протопланетных дисков. При $\rho_d/\rho_w = 3$, как в моделях 6 и 7, сосредоточение массы в нескольких крупнейших фрагментах происходит при значении $\delta > 2.2$, достаточно близкому к протосолнечному.

С целью проверки устойчивости и оценки погрешности результатов моделирования при фиксированных значениях входных параметров проведено сравнение рассчитанных значений параметров в нескольких численных реализациях выбранной модели. Результаты расчетов для модели 3 даны в табл. 2.

Четыре реализации модели 3 размещены в табл. 2 в порядке увеличения рассчитанного значения параметра $\delta = x_{d, s}/x_{w, s}$ (отношение массовых долей тугоплавкой пылевой компоненты и водяного льда в кластере), которое используемый алгоритм, как было отмечено в предыдущем разделе статьи, позволяет с определенной точностью приблизить к заданному значению $\delta = \delta_s$, равному 9 для модели 3. Из табл. 2 видно, что относительная погрешность $|\delta - \delta_s|/\delta_s$ в приведенных реализациях составляет менее 4%, и достижимо ее уменьшение до 1%, как в реализации 3, представленной в табл. 1. Пористость (ψ) в указанных реализациях отличается на еще меньшую величину: менее 1.5%. Количество частиц в кластере (N_{cl}) и отдельно частиц каждого сорта — ледяных (N_w) и тугоплавких ($N_d = N_{cl} - N_w$) варьирует в пределах ~5%, при этом отличие числа фрагментов (N_{fr}) для разных реализаций достигает максимального значения 30%. Соотношение масс между наибо-

лее массивным и вторым по массе фрагментом в разных реализациях варьирует от 1.2 до 7.5. Суммарная масса трех самых массивных фрагментов ($\Sigma_3 m$) может отличаться до полутора раз, тогда как суммарная масса в 12 крупнейших фрагментах ($\Sigma_{12} m$) для разных реализаций различается в гораздо меньших пределах — до 20%. При этом, как можно видеть из табл. 2, примерно половина этой величины обусловлена различием между заданным и вычисленным значением параметра δ , а другая половина — погрешностью вычислений при фиксированном значении δ . В целом параметр $\Sigma_{12} m$ дает удовлетворительную качественную характеристику концентрации массы в крупнейших фрагментах кластера.

Представляет также интерес оценить зависимость полученных результатов от фрактальной размерности кластера D_B при неизменных значениях других входных параметров. В частности, имеет смысл проверить, будет ли и в этом случае отношение объемов V_d/V_w , определяемое уравнениями (2) и (3), выполнять роль параметра подобия, который определяет степень концентрации массы тугоплавкого вещества кластера в крупнейших фрагментах при заданных размерах ледяных и тугоплавких частиц (агрегатов) в кластере. Поэтому была проведена серия расчетов, в которых в качестве исходных параметров использовались параметры модели 3, представленной выше, и варьировалась только фрактальная размерность кластера. В этом случае, поскольку заданные значения параметров δ , ρ_d и ρ_w неизменны, как и соотношение размеров тугоплавких и ледяных частиц, то можно ожидать, что степень концентрации массы в крупных фрагментах должна быть также неизменной при разных значениях размерности кластера D_B . Варьирование параметра D_B проводилось в пределах от 2.5 до 2.8, в которых используемый алгоритм позволял воспроизвести физически реалистичную структуру кластера и картину его фрагментации.

Полученные результаты представлены в табл. 3. Из нее, в частности видно, что в выбранном диапазоне изменения фрактальной размерности средняя плотность кластера изменяется почти в 4 раза: от 0.0355 до 0.139 г/см³, пористость существенно убывает, количество частиц обоих сортов увеличивается в несколько раз, а количество фрагментов — на порядок. При этом суммарная масса в дюжине крупнейших фрагментов $\Sigma_{12} m$ остается приблизительно на одном уровне вблизи 0.5, хотя и варьирует в пределах 10–15% из-за флуктуаций рассчитанного значения δ и ограничений алгоритма, которые обсуждались выше. Реализация, соответствующая значению $D_B = 2.5$, вероятно, из-за таких флуктуаций, несколько отклоняется от общего тренда, в частности, по anomalously большому числу фрагментов.

Таблица 2. Рассчитанные параметры для нескольких реализаций модели 3

Рассчитанные параметры	Номер реализации			
	1	2	3	4
$\delta = x_d/x_w$	8.65	8.72	8.91	9.20
$\rho_{cl}, \text{ г/см}^3$	0.116	0.110	0.111	0.115
ψ	0.794	0.805	0.805	0.801
N_{cl}	307033	291025	295990	306336
N_w	420	409	385	399
N_{fr}	1183	1241	1547	1316
$\Sigma_3 m$	0.30	0.28	0.35	0.43
$\Sigma_{12} m$	0.51	0.46	0.51	0.55

Модель 3. Исходные параметры:

$$r_{d, \min} = 0.005, r_{w, \min} = 0.05, r_{d, \min}/r_{w, \min} = r_{d, \max}/r_{w, \max} = 0.1.$$

$$r_{d, \max}/r_{d, \min} = r_{w, \max}/r_{w, \min} = 2,$$

$$\rho_d = 1.2 \text{ г/см}^3, \rho_w = 0.1 \text{ г/см}^3, \delta_s = x_{d,s}/x_{w,s} = 9$$

Полученные результаты подтверждают, что отношение объемов V_d/V_w играет роль параметра подобия и в случае варьирования фрактальной размерности, по крайней мере в рассмотренном диапазоне.

Для иллюстрации эффекта влияния фрактальной размерности D_β приведен вид кластера до и после сублимации льда, имеющего те же исходные параметры, что и для модели 3, показанной на рис. 5, но существенно меньшее значение параметра D_β : вместо 2.75 принято значение $D_\beta = 2.6$ (рис. 12).

Вид трех наиболее массивных фрагментов и их параметры для фрактальной размерности $D_\beta = 2.6$ представлены на рис. 13. Фрагменты выглядят гораздо более разреженными, чем на рис. 6, где показаны фрагменты для модели 3 с аналогичными параметрами, но при $D_\beta = 2.75$. Параметры модели, проиллюстрированной на рис. 12 и 13, даны в табл. 3.

Для более объективной оценки распределения фрагментов по массе при различных значениях фрактальной размерности, на примере кластеров с набором параметров, представленным в табл. 3, была рассчитана зависимость суммарной массы в n наиболее массивных фрагментах (расположенных по убыванию массы) от номера фрагмента n . Для этого фрагменты были пронумерованы в порядке убывания массы от $n = 1$ (для фрагмента с наибольшей массой) до $n = N_{fr}$, где N_{fr} — количество фрагментов, образовавшихся в результате сублимации льда из данного кластера. Масса рассчитывалась в относительных единицах, нормированная на полную массу тугоплавкого вещества кластера, равную суммарной массе составляющих его тугоплавких частиц. Доля полной массы фрагментов, содержащаяся в n наиболее массив-

ных фрагментах равна $m(n)/M_d$, где $m(n) = \sum_1^n m_i$, $M_d = \sum_1^{N_{fr}} m_i$, при этом $m(i+1) < m(i)$. Полученные зависимости для моделей кластеров с фрактальными размерностями D_β , равными 2.6, 2.65, 2.7, 2.75 и 2.8, показаны на рис. 14.

Из рис. 14 видно, как все кривые сначала (слева) круто идут вверх, достигая половины полной массы приблизительно при значении $n = 12$, для которого представлены результаты в табл. 1–3. Затем кривые расходятся, при этом кривые, соответствующие более высокой фрактальной размерности, идут ниже из-за того, что масса в этом случае распределяется между гораздо большим количеством фрагментов (см. табл. 3). Поэтому для более информативного представления распределения суммарной массы в наиболее массивных фрагментах следует по оси x показать номер фрагмента по отношению к полному числу фрагментов N_{fr} , т.е. долю от полного числа фрагментов, в которой содержится соответствующая доля массы тугоплавкого вещества кластера. Такая зависимость доли суммарной массы фрагментов от доли полного количества фрагментов, содержащей эту массовую долю, показана на рис. 15. Математически эту зависимость можно выразить в виде: $m(v)/M_d = \sum_0^v m_i/M_d$, где $v = n/N_{fr}$.

Как видно из рис. 15, концентрация массы тугоплавкого вещества в массивных фрагментах оказывается выше при более высокой фрактальной размерности кластера. Так, в 10% наиболее массивных фрагментов содержится около 75% суммарной массы фрагментов при $D_\beta = 2.6$ и около 85% при $D_\beta = 2.7–2.8$. При этом в 40% от всего количества фрагментов содержится почти вся масса тугоплавкого вещества кластера. Разумеется, представленные на рис. 14 и 15 кривые отра-

Таблица 3. Рассчитанные параметры для модели кластера с варьируемой фрактальной размерностью D_f

Рассчитанные параметры	Фрактальная размерность D_f						
	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.8
Исходные параметры: $r_{d, \min} = 0.005, r_{w, \min} = 0.05, r_{d, \min} / r_{w, \min} = r_{d, \max} / r_{w, \max} = 0.1,$ $r_{d, \max} / r_{d, \min} = r_{w, \max} / r_{w, \min} = 2, \rho_d = 1.2 \text{ г/см}^3, \rho_w = 0.1 \text{ г/см}^3, \delta_s = x_{d, s} / x_{w, s} = 9$							
x_d	0.8997	0.899	0.898	0.898	0.897	0.899	0.898
x_w	0.1003	0.101	0.102	0.102	0.100	0.101	0.102
$\delta = x_d / x_w$	8.97	8.90	8.81	8.80	9.00	8.91	8.80
$\rho_{cl}, \text{ г/см}^3$	0.0355	0.0422	0.0579	0.0675	0.087258	0.111	0.139
ψ	0.938	0.926	0.898	0.881	0.847	0.805	0.753
N_{cl}	94569	112017	154135	179586	232381	295990	370936
N_d	94434	111875	153927	179349	232073	295605	370424
N_w	135	142	208	237	308	385	512
N_{fr}	559	244	463	496	839	1547	2397
$\Sigma_3 m$	0.32	0.17	0.27	0.23	0.30	0.35	0.27
$\Sigma_{12} m$	0.59	0.48	0.50	0.49	0.54	0.51	0.52
l_{\max}	0.994	0.990	0.987	0.983	0.996	0.997	0.993

жают реальную зависимость только в первом приближении, поскольку имеют место погрешности, связанные с согласованием моделей по параметру δ , и алгоритмическими погрешностями реализаций.

Во всех построенных моделях, как видно из табл. 1–3, рассчитанное значение пористости (ψ) варьирует от 0.7 до 0.82 (в большинстве случаев — ближе к 0.8), что значительно больше макропористости комет $\psi \approx 0.32–0.42$ (Fulle, Blum, 2017), но совершенно естественно для небольших кластеров, не входящих в состав крупных тел. Кроме того, для каждой из частиц (агрегатов), как ледяных, так и тугоплавких, выбранные значения их плотностей соответствуют микропористости ψ_1 , которая варьирует от 0.6 до 0.9 (в среднем тоже порядка 0.7–0.8). Отсюда следует, что полная по-

стости комет $\psi \approx 0.32–0.42$ (Fulle, Blum, 2017), но совершенно естественно для небольших кластеров, не входящих в состав крупных тел. Кроме того, для каждой из частиц (агрегатов), как ледяных, так и тугоплавких, выбранные значения их плотностей соответствуют микропористости ψ_1 , которая варьирует от 0.6 до 0.9 (в среднем тоже порядка 0.7–0.8). Отсюда следует, что полная по-

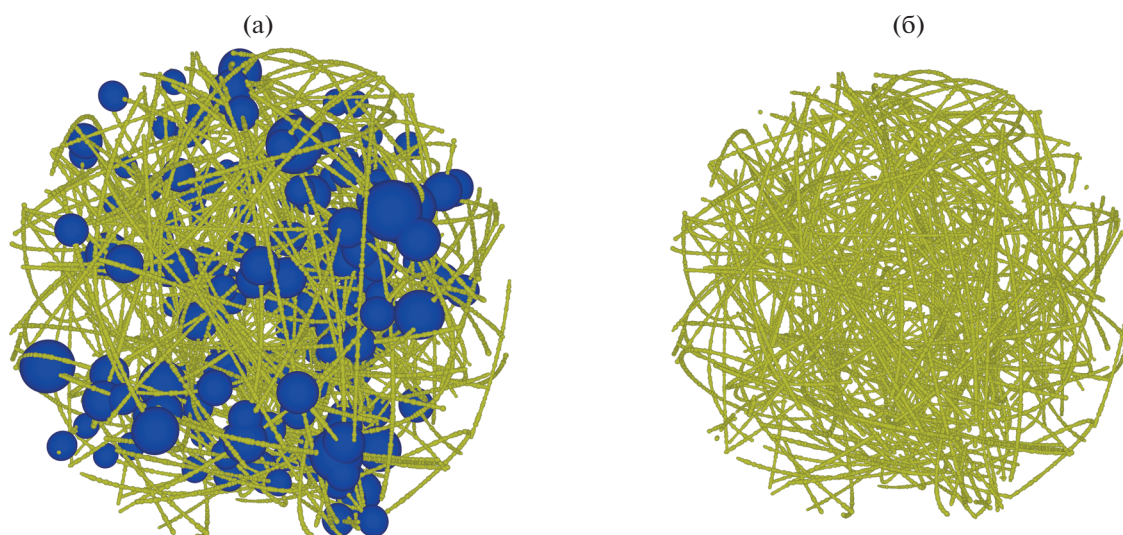


Рис. 12. Фрактальный кластер — аналог модели 3 (показанной на рис. 5), но при меньшей фрактальной размерности: $D_f = 2.6$. Вид кластера (а) до сублимации льда, (б) после сублимации льда.

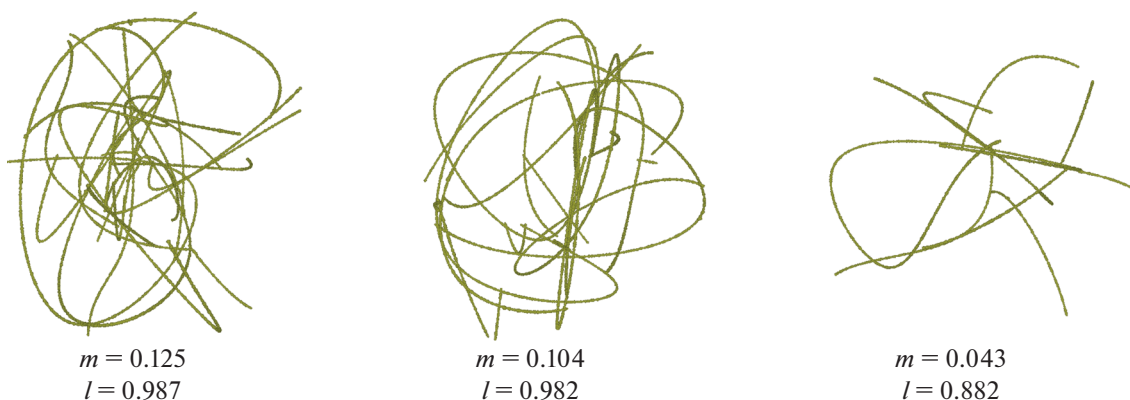


Рис. 13. Три наиболее массивных фрагмента в аналоге модели 3 при фрактальной размерности 2.6. Нумерация фрагментов – в порядке убывания массы. Смысл параметров m и l – как на рис. 2.

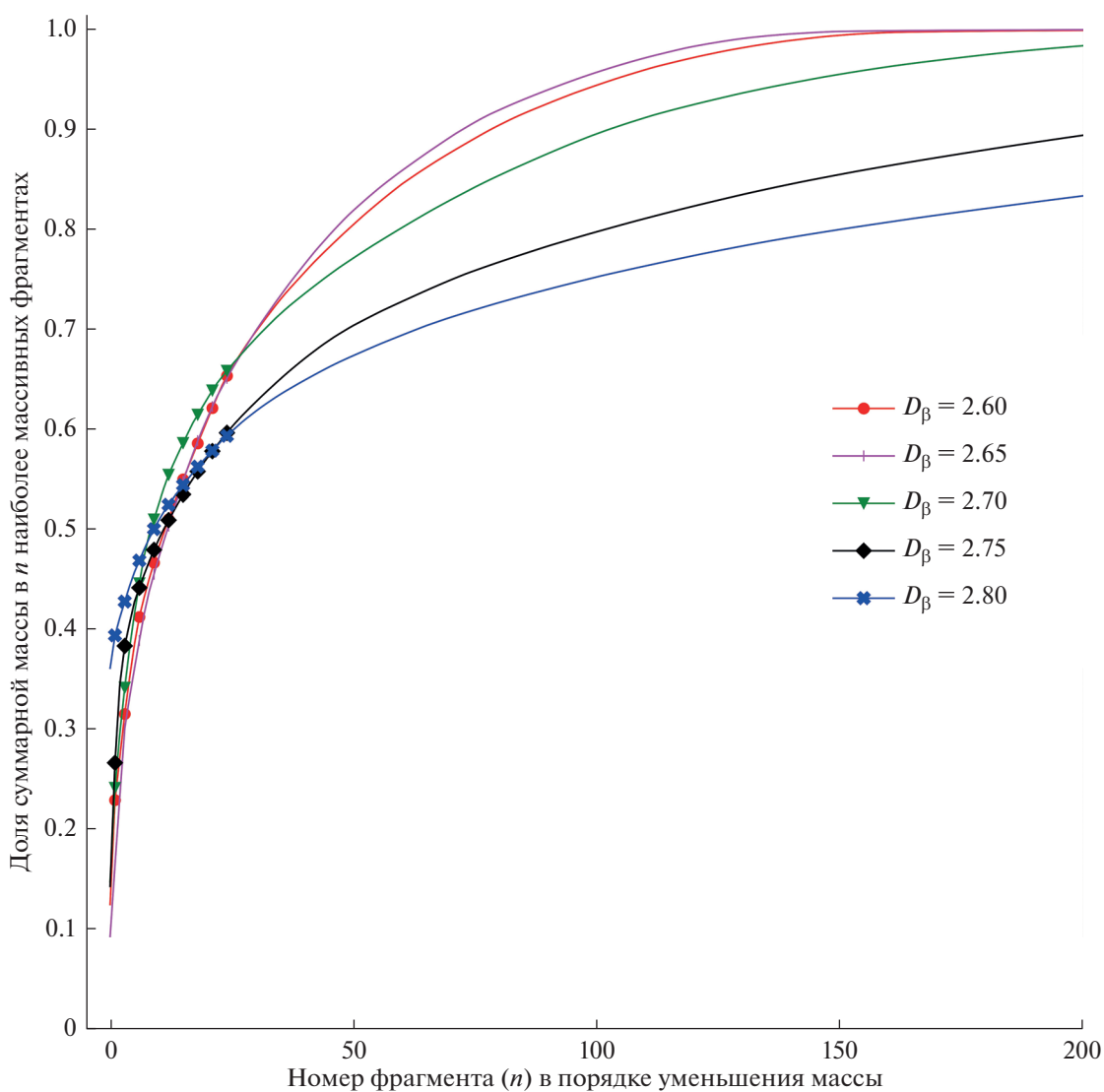


Рис. 14. Доля суммарной массы тугоплавкого вещества кластера, содержащаяся в n наиболее массивных фрагментах, пронумерованных в порядке убывания массы для кластеров с разной фрактальной размерностью D_β , указанной на рисунке (пояснения в тексте).

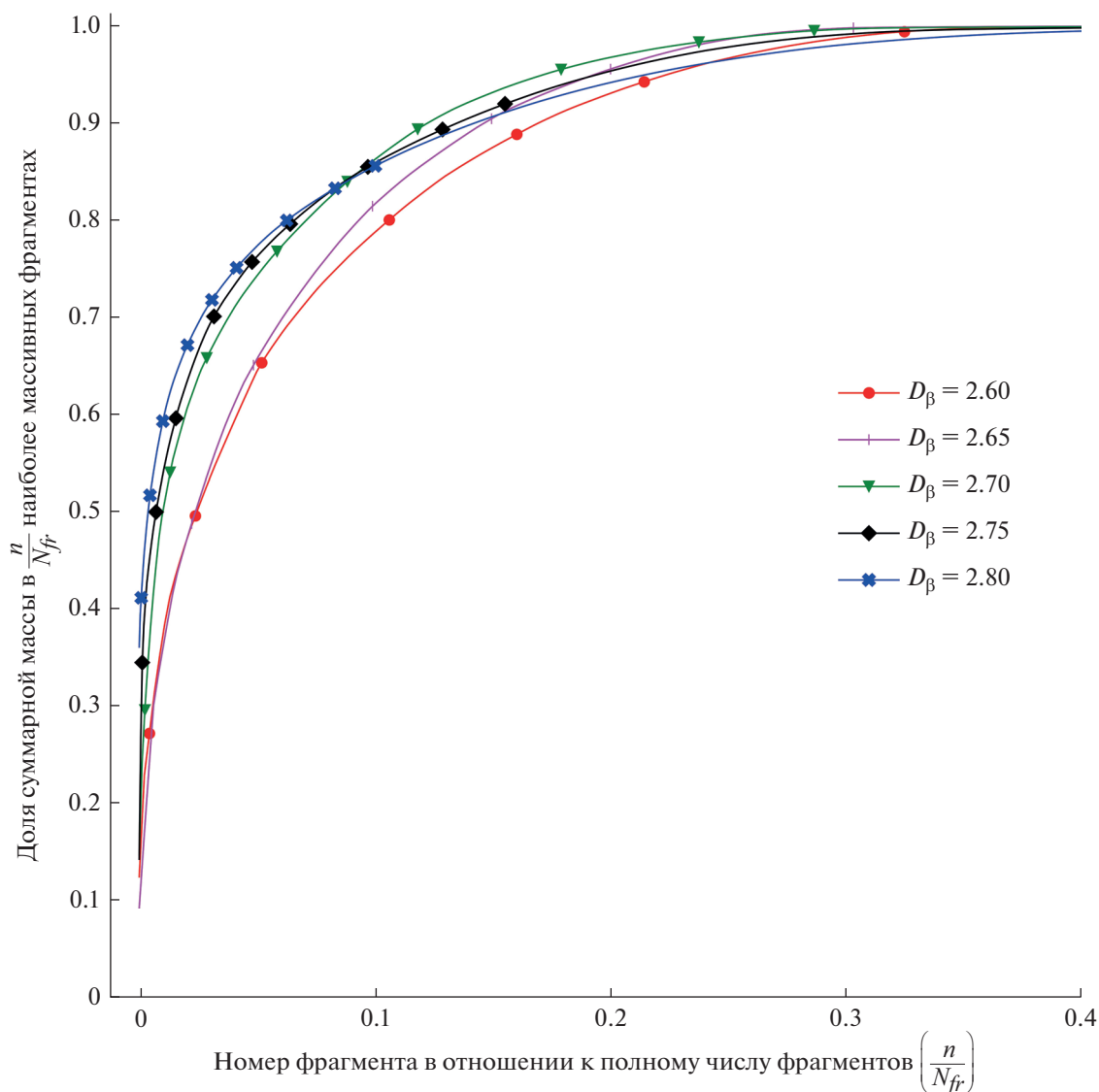


Рис. 15. Доля суммарной массы тугоплавкого вещества кластера, содержащаяся в доле (n/N_{fr}) наиболее массивных фрагментов, пронумерованных в порядке убывания массы для кластеров с разной фрактальной размерностью D_β (по-яснения в тексте).

ристость кластера, $[1 - (1 - \psi)(1 - \psi_1)]$, в наших моделях варьирует между $(1 - 0.3 \times 0.4)$ и $(1 - 0.2 \times 0.1)$, то есть лежит в интервале 0.88–0.98. Таким образом, она выше, чем пористость комет, для которых она составляет 0.75–0.85 (с максимальными значениями до 0.88 у поверхности) (Davidson и др., 2016). Меньшая пористость ядер комет представляется естественной, если кометы образовались как тела размером в единицы и десятки километров в результате гравитационного коллапса массивных пыле-ледяных сгущений, тогда как пыле-ледяные кластеры, рассмотренные в данной работе, не проходили стадию коллапса и не входили до этого в состав тел с массами кометных ядер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены результаты численного моделирования структуры рыхлых пылевых кластеров миллиметрового – дециметрового размера, как модельных образований в газе протопланетного диска, которые, мигрируя к центру, пересекают линию водяного льда и в дальнейшем вносят вклад в образование планетезималей в зоне формирования планет земной группы. Предполагалась фрактальная и гетерогенная структура кластера, состоящего из смеси пылевых агрегатов, называемых тугоплавкими с точки зрения их сохранения на линии льда (“снеговой линии”), и ледяных агрегатов, которые сублимируют (полностью испаряются) при ее пересечении. Возможная примесь льда в тугоплавких агрегатах

предполагалась незначительной и не учитывалась в расчетах, как и вероятная небольшая примесь мелких тугоплавких частиц внутри ледяных агрегатов. В рассмотренной модели тугоплавкие и ледяные агрегаты, как и весь кластер, имеют относительно низкие плотности из-за высокой пористости. Их размеры, состав, плотности и массовые доли в кластере принимались с учетом ограничений по кометным данным, прежде всего полученным в миссии Rosetta к комете 67/P Чурюмова–Герасименко. С учетом этих данных размеры пылевых агрегатов, входящих в состав кластеров, оцениваются в пределах от ~ 0.01 –1 см. В построенных моделях результаты зависят только от отношения радиусов агрегатов к радиусу кластера, а не от их абсолютных размеров. Однако, размеры существенны для подтверждения справедливости предположения о полном испарении ледяных агрегатов на линии льда.

В данной работе большинство моделей построены при фрактальной размерности кластеров, равной $D_B = 2.75$, которой, как получено из модельных расчетов, соответствует макропористость от 70 до 80%. С учетом того, что кластер в рассмотренных моделях состоит из агрегатов с диаметрами не менее нескольких тысячных от диаметра кластера, при такой фрактальной размерности и макропористости он имеет высокую проницаемость, что при указанных выше малых размерах агрегатов и, соответственно, сильно развитой поверхности в объеме кластера, обеспечивает быструю сублимацию льда (за время ~ 1 года) и обеспечивает распад кластера на фрагменты на линии льда.

При построении фрактальных кластеров использовалась развитая авторами методика, которая позволяет значительно ускорить построение модели фрактальных кластеров (по сравнению, например, с методикой баллистического кластер-кластерного агрегирования (БККА/ВССА), требующей использования суперкомпьютера, и, что не менее важно, построить модели гетерогенных кластеров, состоящих из агрегатов двух типов, различающихся размерами, плотностями и массовой долей внутри кластера. Работы по моделированию агрегации такого рода гетерогенных кластеров в известной нам литературе отсутствуют.

При моделировании предполагалась сферическая форма агрегатов, составляющих кластер, как и сферическая форма охватывающего кластер объема. Варьировались следующие параметры: соотношение объемов образующих кластер тугоплавких и ледяных агрегатов, как между собой, так и с объемом кластера, массовые доли тугоплавких и ледяных агрегатов, а также плотности тугоплавких и ледяных агрегатов с учетом возможных вариаций пористости. При определении плотностей тугоплавких агрегатов учитывались возможные вариации как их пористости, так и химического состава с учетом кометных данных,

при этом предполагалось, что эти агрегаты состоят из силикатов, сульфидов (с возможной примесью Fe–Ni металла) и органических соединений. Учитывалось также распределение по размерам (радиусам) как тугоплавких, так и ледяных агрегатов. Оно было принято в форме обратной степенной зависимости с показателем $p = 3.5$ для обоих типов агрегатов, при этом варьировалось отношение максимального и минимального радиусов.

Основной целью моделирования было выяснение, при каких условиях в результате испарения льда образуются мелкие фрагменты, содержащие малую долю числа частиц и массы тугоплавкой компоненты кластера, а при каких условиях – крупные и относительно плотные фрагменты, содержащие значительную долю массы тугоплавкого вещества кластера. Это важно, в частности, для понимания того, в какой области протопланетного диска с внутренней стороны от линии льда возникают условия для накопления пылевого вещества, необходимого для образования планетезималей: вблизи линии льда или же дальше от нее и ближе к центру диска, где в солнечной системе расположены внутренние планеты.

Были получены следующие основные результаты численных экспериментов:

1. Если размеры (радиусы) составляющих кластер тугоплавких агрегатов в среднем больше размеров ледяных агрегатов или одного порядка с ними, то кластер на линии льда распадается на мелкие фрагменты с массами, не превышающими $< \sim 1\%$ полной массы тугоплавкой компоненты кластера и малыми размерами и/или малым количеством ветвей (низкой фрактальной размерностью) даже при максимально возможной массовой доле тугоплавкого вещества, согласующейся с кометными данными (90%).

2. Если минимальные и максимальные радиусы тугоплавких агрегатов существенно меньше соответствующих радиусов ледяных агрегатов (в 5 и более раз), то при достаточной массовой доле тугоплавкой компоненты в результате испарения льда образуются большие и относительно плотные фрагменты, крупнейшие из которых имеют массы 15–45% от полной массы тугоплавкого вещества в кластере, а их максимальные размеры достигают величины диаметра кластера. При этом в наиболее массивных фрагментах, составляющих не более 2% от их полного числа, сосредотачивается более половины всей массы тугоплавкой компоненты вещества кластера. Крупнейшие фрагменты оказываются достаточно плотными, а их размеры достигают исходного размера кластера. Такие крупные фрагменты из-за трения о газ и потери их углового момента могут дрейфовать от линии льда во внутреннюю зону формирования планет.

3. При заданных распределениях по радиусам тугоплавких и ледяных агрегатов в кластере, распределение по массам и размерам образующихся на линии льда фрагментов зависит от отношения плотностей тугоплавких и ледяных агрегатов и отношения их массовых долей в кластере (δ). Чем меньше плотность и больше массовая доля тугоплавкого вещества в кластере, т.е. чем больше удельный объем тугоплавкой компоненты, тем более массивными и плотными оказываются крупнейшие фрагменты, соразмерные с кластером и тем большая доля массы тугоплавкой компоненты в них сосредотачивается. Если плотность тугоплавких агрегатов всего лишь в три раза больше, чем ледяных, то даже при относительно небольшом отношении массовых долей тугоплавкой компоненты и льда ($\delta \geq 2$), близком к протосолнечному отношению ($\delta = 1.5-2$), при потере льда кластером получают большие массивные фрагменты, в которых сосредоточена большая часть массы тугоплавкого вещества. При увеличении параметра δ массовая доля, сосредоточенная в нескольких крупных и массивных фрагментах, также увеличивается. В то же время, если плотность тугоплавких агрегатов на порядок больше, чем ледяных, то для образования массивных фрагментов, содержащих в себе основную массу тугоплавкого вещества кластера, необходимо наибольшее отношение масс тугоплавкой компоненты и льда из диапазона значений, согласующихся с кометными данными ($\delta = 9$).

Полученные результаты, как выяснилось, не зависят от фрактальной размерности кластера в рассмотренных пределах от 2.5 до 2.8.

Поскольку в представленных моделях не учитывается возможность сцепления отдельных фрагментов внутри объема кластера после испарения льда, то полученные результаты дают лишь нижний предел масс образовавшихся фрагментов. Благодаря взаимному сцеплению фрагментов их массы могут значительно увеличиваться, поэтому образование крупных массивных тугоплавких кластеров при объединении фрагментов становится более вероятным. Однако, это возможно только, если ледяная компонента за линией льда содержится преимущественно в более крупных агрегатах, чем тугоплавкая.

Можно ожидать, что используемый метод моделирования двухкомпонентных кластеров, несмотря на упрощенный подход к их образованию и приращению их ветвей методом сплайнов, дает реалистичные качественные результаты относительно особенностей образования фрагментов на внутренней стороне линии льда.

Развитая модель дает подход к пониманию процесса фрагментации пыле-ледяных кластеров на линии льда в протопланетных дисках вокруг молодых звезд. Она указывает на важность изучения соотношения размеров, плотностей и массовых долей агрегатов, в которых преимущественно

содержится тугоплавкая и ледяная компоненты твердого вещества, а также степени их концентрации в агрегатах разных типов. Последнее особенно существенно при моделировании взаимных столкновений рыхлых, “пушистых” (fluffy) фрактальных пылевых агрегатов, рассмотренных ранее в работе (Маров, Русол, 2018). Полученные результаты вносят существенный вклад в изучение процессов ранней эволюции протопланетных дисков.

Авторы признательны рецензентам за полезные замечания.

Данная работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ 075-15-2020-780 (N13. 1902.21.0039). Часть расчетов, относящаяся к структурной эволюции вещества в ранней Солнечной системе, проведена в соответствии с планами фундаментальных исследований, определенных госзаданиями Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН и Институту физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дорофеева В.А.* Химический и изотопный состав кометы 67P/Чурюмова–Герасименко (Обзор результатов космической миссии Rosetta–Philae). Следствия для космогонии и космохимии // *Астрон. вестн.* 2020. Т. 54. № 2. С. 110–134. (*Dorofeeva V.A.* Chemical and isotope composition of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko: The Rosetta–Philae mission results reviewed in the context of cosmogony and cosmochemistry // *Sol. Syst. Res.* 2020. V. 54. № 2. P. 96–120.)
- Колесниченко А.В., Маров М.Я.* Механизм потоковой неустойчивости в газопылевой среде протопланетного диска и формирование пылевых фрактальных кластеров // *Астрон. вестн.* 2019. Т. 53. № 3. С. 195–213. (*Kolesnichenko A.V., Marov M.Ya.* Streaming instability in the gas–dust medium of the protoplanetary disc and the formation of fractal dust clusters // *Sol. Syst. Res.* 2020. V. 53. № 3. P. 181–198.)
- Макалкин А.Б., Артюшкова М.Е.* К образованию планетезималей: радиальное сжатие пылевого слоя, взаимодействующего с газом протопланетного диска // *Астрон. вестн.* 2017. Т. 51. № 6. С. 524–561. (*Makalkin A.B., Artyushkova M.E.* On the formation of planetesimals: radial contraction of the dust layer interacting with the protoplanetary disk gas // *Sol. Syst. Res.* 2017. V. 51. № 6. P. 491–526.)
- Макалкин А.Б., Зиглина И.Н.* Гравитационная неустойчивость в пылевом слое протопланетного диска с учетом взаимодействия слоя и окружающего газа в диске // *Астрон. вестн.* 2018. Т. 52. № 6. С. 534–551. (*Makalkin A.B., Ziglina I.N.* Gravitational instability in the dust layer of a protoplanetary disk with interaction between the layer and the surrounding gas // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. № 6. P. 518–533.)
- Маров М.Я., Русол А.В.* Модель ударного взаимодействия тел в газопылевом протопланетном диске // *ДАН.* 2011. Т. 441. № 4. С. 464–467.
- Маров М., Русол А.В.* Оценка параметров столкновений пылевых фрактальных кластеров в газопылевом протопланетном диске // *Письма в Астрон. журн.* 2018. Т. 44. № 7. С. 1–8. (*Marov M.Ya., Rusol A.V.* Es-

- timating the parameters of collisions between fractal dust clusters in a gas–dust protoplanetary disk // *Astron. Lett.* 2018. V. 44. P. 474–481.)
- Rusol A.V.* Имитационное моделирование структуры пылевых фрактальных кластеров в протопланетных газопылевых дисках // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55. № 3. С. 232–243. (*Rusol A.V.* Simulation of the structure of dust fractal clusters in protoplanetary gas-dust disks // *Sol. Syst. Res.* 2021. V. 55. № 3. P. 232–243.)
- Bai X.-N., Stone J.M.* Dynamics of solids in the midplane of protoplanetary disks: Implications for planetesimal formation // *Astrophys. J.* 2010. V. 722. P. 1437–1459.
- Blum J.* Dust evolution in protoplanetary discs and the formation of planetesimals. What have we learned from laboratory experiments? // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. Iss. 2. Article id. 52. 19 p.
- Blum J., Gundlach B., Krause M., Fulle M. et al.* Evidence for the formation of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko through gravitational collapse of a bound clump of pebbles // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. V. 469. P. S755–S773.
- Carrasco-González C., Sierra A., Flock M., Zhu Z., Henning T., Chandler C., Galván-Madrid R., Macías E., Anglada G., Linz H. и еще 6 соавторов.* The radial distribution of dust particles in the HL Tau disk from ALMA and VLA observations // *Astrophys. J.* 2019. V. 883. Article id. 71. 21 p.
- Carrera D., Gorti U., Johansen A., Davies M.B.* Planetesimal formation by the streaming instability in a photoevaporating disk // *Astrophys. J.* 2017. V. 839. Article id. 16. 17 p.
- Coradini A., Federico C., Magni C.* Formation of planetesimals in an evolving protoplanetary disk // *Astron. and Astrophys.* 1981. V. 98. P. 173–185.
- Davidsson B.J.R., Sierks H., Güttler C., Marzari F., Pajola M., Rickman H., A’Hearn M.F., Auger A.-T., El-Maarry M.R., Fornasier S. и еще 38 соавторов.* The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 592. Article id. A63. 30 p.
- Drążkowska J., Alibert Y., Moore B.* Close-in planetesimal formation by pile-up of drifting pebbles // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 594. Article id. A105. 12 p.
- Drążkowska J., Alibert Y.* Planetesimal formation starts at the snow line // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 608. Article id. A92. 11 p.
- Fulle M., Blum J.* Fractal dust constrains the collisional history of comets // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. V. 469. P. S39–S44.
- Fulle M., Blum J., Green S.F., Gundlach B., Herique A., Moreno F., Mottola S., Rotundi A., Snodgrass C.* The refractory-to-ice mass ratio in comets // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2019. V. 482. P. 3326–3340.
- Fulle M., Della Corte V., Rotundi A., Rietmeijer F.J.M., Green S.F., Weissman P., Accolla M., Colangeli L., Ferrari M., Ivanovski S., Lopez-Moreno J.J., Epifani E.M., Morales R., Ortiz J.L., Palomba E., Palumbo P., Rodriguez J., Sordini R., Zakharov V.* Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko preserved the pebbles that formed planetesimals // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. P. S132–S137.
- Goodman J., Pindor B.* Secular instability and planetesimal formation in the dust layer // *Icarus.* 2000. V. 148. P. 537–549.
- Gundlach B., Blum J.* The stickiness of micrometer-sized water-ice particles // *Astrophys. J.* 2015. V. 798. Article id. 34. 12 p.
- Ida S., Guillot T.* Formation of dust-rich planetesimals from sublimated pebbles inside of the snow line // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 596. Article id. L3. 5 p.
- Kataoka A., Tanaka H., Okuzumi S., Wada K.* Fluffy dust forms icy planetesimals by static compression // *Astron. and Astrophys.* 2013. V. 557. Article id. L4. 4 p.
- Kohe S., Güttler C., Blum J.* The physics of protoplanetesimal dust agglomerates. V. Multiple impacts of dusty agglomerates at velocities above the fragmentation threshold // *Astrophys. J.* 2010. V. 725. P. 1242–1251.
- Lorek S., Gundlach B., Lacerda P., Blum J.* Comet formation in collapsing pebble clouds. What cometary bulk density implies for the cloud mass and dust-to-ice ratio // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 587. Article id. A128. 14 p.
- Lorek S., Lacerda P., Blum J.* Local growth of dust- and ice-mixed aggregates as cometary building blocks in the solar nebula // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 611. Article id. A18. 18 p.
- Marov M.Ya., Rusol A.V.* Gas-dust protoplanetary disc: Modeling primordial dusty clusters evolution // *J. Pure Appl. Phys.* 2015. V. 3. P. 16–23.
- Opeil C.P., Consolmagno G.J., Safaric D.J., Britt D.T.* Stony meteorite thermal properties and their relationship with meteorite chemical and physical states // *Met. Planet. Sci.* 2012. V. 47. P. 319–329.
- Pollack J.B., Hollenbach D., Beckwith S.B., Simonelly D.P.* Composition and radiative properties of grains in molecular clouds and accretion disks // *Astrophys. J.* 1994. V. 421. P. 615–639.
- Saito E., Sirono S.* Planetesimal formation by sublimation // *Astrophys. J.* 2011. V. 728. Article id. 20. 8 p.
- Scheeres D.J., Britt D., Carry B., Holsapple K.A.* Asteroid interiors and morphology // *Asteroids IV / Eds Michel P., DeMeo F.E., Bottke W.F.* Tucson: Univ. Arizona Press, 2015. P. 745–766.
- Schoonenberg D., Ormel C.W.* Planetesimal formation near the snowline // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 602. Article id. A21. 19 p.
- Wurm G., Relke H., Dorschner J.* Experimental study of light scattering by large dust aggregates consisting of micron-sized SiO₂ monospheres // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. 891–899.
- Youdin A.N.* On the formation of planetesimals via secular gravitational instabilities with turbulent stirring // *Astrophys. J.* 2011. V. 731. Article id. 99. 18 p.
- Youdin A.N., Goodman J.* Streaming instabilities in protoplanetary disks // *Astrophys. J.* 2005. V. 620. P. 459–469.
- Zsom A., Ormel C.W., Güttler C., Blum J., Dullemond C.P.* The outcome of protoplanetary dust growth: pebbles, boulders, or planetesimals? II. Introducing the bouncing barrier // *Astron. and Astrophys.* 2010. V. 513. Article id. 57.