

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАНЕТ: ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ

© 2019 г. А. Б. Макалкин<sup>1\*</sup>, И. Н. Зиглина<sup>1</sup>, М. Е. Артюшкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: makalkin@ifz.ru

Поступила в редакцию 18.06.2018 г.

Принята в печать 15.08.2018 г.

Рассмотрена история развития теории образования Земли и планет за 70 лет, особое внимание уделяется развитию этой теории в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ), где Отто Юльевич основал это направление исследований. Рассматривается также современное состояние теории, в особенности, проблема образования планетезималей, которая является в настоящее время одной из ключевых пока еще не решенных задач теории образования планет. Приводятся результаты недавних исследований, проведенных в ИФЗ РАН, направленных на решение этой проблемы.

*Ключевые слова:* образование Земли, образование планет, пропланетный диск, планетезимали

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191104-121>

### ВВЕДЕНИЕ. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАНЕТ

Происхождение и эволюция Земли и планет – направление исследований, созданное Отто Юльевичем Шмидтом в 1945 г. в Институте теоретической геофизики АН СССР, предшественнике Института физики Земли. По убеждению О.Ю. Шмидта, основные проблемы теоретической геофизики – сейсмичность Земли, ее тепловое состояние, вулканизм, тектоника, геомагнетизм – требовали понимания ранней истории Земли, включающей проблему происхождения планеты. И хотя происхождение планет считалось задачей астрономии, случилось так, что именно в Институте физики Земли О.Ю. Шмидтом были заложены основы современной планетной космогонии – науки об образовании планет. В астрономии того времени эта задача считалась второстепенной, потому что еще не были ясны процессы образования звезд, вокруг которых формируются планеты. Нужна была выдающаяся интуиция О.Ю. Шмидта, чтобы задолго до решения проблемы происхождения газопылевого протопланетного облака вокруг Солнца осуществить постановку центральной, по его определению, задачи планетной космогонии: «определить состояние... вещества, предшествующее процессу планетообразования,

и из этого состояния и законов природы вывести все основные свойства планетной системы» [Шмидт, 1950]. Одной из его общепризнанных заслуг является создание концепции и построение основ теории образования планет в облаке (рое), состоящем из газа и пылевых частиц разных размеров, вращающихся вокруг Солнца [Шмидт, 1944; 1950; 1957]. Как отметил О.Ю. Шмидт, «хотя законы небесной механики вовсе не требуют круговых орбит, на деле планетные орбиты очень близки к круговым». Он показал, что «круговой характер планетных орбит является следствием естественного статистического осреднения движений отдельных тел, из объединения которых возникают планеты». «Осреднение момента количества движения многих тел» объясняет и движение всех планет почти в одной плоскости и в одном направлении [Шмидт, 1957].

Немалую роль в создании теории образования планет сыграла статья [Edgeworth, 1949] и, в еще большей степени, состоящая из трех частей работа Л.Э. Гуревича и А.И. Лебединского под общим заголовком «Об образовании планет» [Гуревич, Лебединский, 1950], в которой было обосновано, что процесс образования планет может начаться даже при отсутствии в облаке крупных тел–зародышей. В результате уплощения облака твердых частиц вокруг Солнца оно

превращается в тонкий слой, достаточно плотный для того, чтобы произошел его распад на сгущения уплощенной сфероидальной формы, удерживаемые собственной гравитацией. После их объединения и уплотнения они превращаются в твердые тела астероидных размеров, которые сейчас принято называть планетезималями. Следующая стадия — объединение гравитационно взаимодействующих планетезималей, которое приводит к образованию планет. Некоторые важные вопросы, относящиеся к этой стадии и касающиеся эксцентриситетов орбит допланетных тел, формирования планетных расстояний и вращения планет, были исследованы в работах [Шмидт, 1944; 1945; 1946; Гуревич, Лебединский, 1950]. На основе концепции, предложенной О.Ю. Шмидтом, и с учетом более ранних разработок отечественных и зарубежных авторов, в 1950-х — 1960-х годах была построена математически проработанная теория образования Земли и планет. Ее автором был В.С. Сафронов, ставший сотрудником ИФЗ по приглашению О.Ю. Шмидта в 1950 г. В эти годы в ведущих научных журналах было опубликовано около двадцати статей В.С. Сафронова, а полностью теория представлена в его монографии «Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет» [Сафронов, 1969]. Эта книга, переведенная по заказу NASA на английский язык в 1972 г., стала основой для многих исследований в этой области, проводимых в мире. Рост интереса к проблеме образования планет был связан с бурно развивавшимися в 60-е годы исследованиями Луны, Венеры и Марса с помощью космических аппаратов.

Разделы монографии охватывают все этапы образования Земли и планет и учитывают многие физические и, прежде всего, динамические процессы, ведущие к образованию планет. Рассмотрена эволюция газопылевого допланетного облака, которое в настоящее время принято называть протопланетным диском, оседание твердых частиц к экваториальной плоскости в газовой среде диска, образование пылевого слоя, распределение в нем температуры, от которой зависит химический состав допланетного вещества, гравитационная неустойчивость слоя. В результате неустойчивости образуются очень разреженные пылевые сгущения. Их массы по порядку величины соответствуют массам километровых и стокилометровых тел на расстояниях Земли и Юпитера, соответственно, а плотности сгущений на этих расстояниях в 1 млн раз и 100 млн раз меньше плотности твердых тел, поскольку сжатие сгущения мешает его

вращение. Образовавшиеся сгущения сталкиваются, сливаются и уплотняются, образуя планетезимали с массами в 100–1000 раз больше начальных масс сгущений. Следующая стадия, исследованная в монографии, — объединение гравитационно взаимодействующих планетезималей при взаимных столкновениях, которое приводит к опережающему росту крупнейших тел и формированию зародышей планет. Учитывалась дисперсия скоростей и решалось уравнение коагуляции для поиска распределения по массам растущих тел. В результате гравитационного взаимодействия зародышей их орбиты начинают пересекаться, и после дальнейших объединений сталкивающихся зародышей образуется небольшое число планет земной группы и твердые ядра планет-гигантов. С указанными выше процессами связаны также рассмотренные в книге процессы формирования вращения планет и наклонов их осей, выброс тел из Солнечной системы, образование пояса астероидов, нагрев растущей планеты (на примере Земли) ударами крупных тел.

Следует отметить, что трактовка многих вопросов в книге В.С. Сафронова не устарела до сих пор. Особенно это касается образования планетезималей и поздних стадий образования планет земной группы. Все результаты, отраженные в книге, были получены задолго до первых наблюдений газопылевых дисков вокруг молодых звезд солнечной массы, выполненных к концу 80-х годов. Многие из дисков оказались сходными по массам и размерам с моделью околосолнечного допланетного диска, представленной в книге. Оценка Сафроновым длительности процесса образования Земли — около 100 миллионов лет — позже получила подтверждение с помощью методов изотопной геохронологии. Указанная монография, и вся модель образования планет Шмидта–Сафронова до сих пор является отправной точкой для современных исследований образования планет и изучения дисков вокруг молодых звезд солнечного типа.

Дальнейшие исследования роста (аккумуляции) планет в ранней Солнечной системе, проводимые в Институте физики Земли, показали, что дробление тел при столкновениях играет существенную роль в распределении масс допланетных тел в процессе их аккумуляции [Звягина и др., 1973; Печерникова и др., 1976]. Еще более важным является вывод о более крупных, чем считалось ранее, размерах тел, падавших на растущую Землю на основной стадии ее аккумуляции. Выяснилось, что для формирования эксцентриситетов и наклонов орбит Земли и планет

земной группы, а также периодов и наклонов осей вращения планет необходимы сближения (под действием взаимной гравитации) и падения на растущие планеты тел со средними массами  $\sim 0.01\text{--}0.02$  от конечной массы планеты ( $M_p$ ), а массы крупнейших тел могли достигать  $0.05\text{--}0.1 M_p$  [Печерникова, Витязев, 1980; Зиглина, 1985; Витязев и др., 1990; Lissauer, Safronov, 1991]. Эти результаты свидетельствуют в пользу раннего разогрева Земли и частичного плавления ее мантии (образования магматического океана), а также не противоречат модели мегаимпакта, согласно которой Луна образовалась благодаря удару о растущую Землю одного тела размером с Марс и выбросу вещества в протолунный диск. Однако в последнее время гипотеза мегаимпакта столкнулась с значительными трудностями в объяснении схожести изотопных отношений кислорода, титана и вольфрама на Земле и Луне [Kruijer et al., 2015]. Поэтому становится более актуальной модифицированная модель коаккреции [Печерникова, Рускол, 2016], отличающаяся от первоначальной модели [Рускол, 1975] тем, что она связывает образование Луны с ударами о Землю нескольких (в пределах десятка) крупных тел с массами менее  $0.1 M_{\oplus}$  (массы Земли) [Витязев, Печерникова, 1996], а, возможно,  $\sim 20$  ударов тел с массами  $0.01\text{--}0.1 M_{\oplus}$  [Rufu et al., 2017]. В целом процессы образования Луны в настоящее время менее ясны, чем процессы образования регулярных спутников планет-гигантов в околопланетных протоспутниковых дисках, которые также интенсивно изучались в последние десятилетия [Safronov et al., 1986; Макалкин и др., 1999; Кусков и др., 2009; Макалкин, Дорофеева, 2014].

После того, как в последние двадцать лет были открыты экзопланетные системы (вокруг других звезд), появились новые вопросы, касающиеся образования планетных систем, включая и Солнечную, так как более 600 открытых планетных систем (содержащих более одной планеты) в подавляющем большинстве своем совсем не похожи на нашу [Morbidelli, Raymond, 2016]. В некоторых из них имеются планеты-гиганты на орбитах, очень близких к центральной звезде (так называемые горячие Юпитеры), которые, согласно всем имеющимся теоретическим моделям, не могли образоваться там. Зато известны физические механизмы переноса этих планет с более далеких расстояний за счет гравитационного взаимодействия этих планет с газовым протопланетным диском и образования в нем спиральных волн плотности [Ogilvie, Lubow, 2002]. Поскольку в присутствии планеты

распределение плотности в диске не является осесимметричным, оно обеспечивает создание крутящего момента, действующего на планету, в результате чего ее орбитальная скорость изменяется, и орбита расширяется или сжимается в зависимости от знака крутящего момента. Это приводит к радиальной миграции планет. На ранней стадии такая миграция направлена к центральной звезде [Ward, 1997]. Но на более позднем этапе эволюции протопланетного диска, после диссипации всего (или значительной части) газа из диска, Юпитер, находящийся на завершающей стадии формирования, не только выбрасывал планетезимали из Солнечной системы [Сафронов, 1969], но и возмущал орбиты крупных планетезималей, выбрасывая их из своей зоны и обеспечивая их миграцию [Ипатов, 1989]. Совместно с Сатурном он мог таким образом вытолкнуть зародыши Урана и Нептуна на периферию планетной системы [Жарков, Козенко, 1990; Zharkov, 1993].

В настоящее время радиальная миграция планет в ранней Солнечной системе является важной задачей, требующей дальнейшего исследования. Это касается не только планет-гигантов, из которых Юпитер оказывает определяющее влияние на всю конструкцию Солнечной системы и ее эволюцию. Предстоит еще объяснить, почему в Солнечной системе нет суперземель — планет с массами в несколько раз большими земной, а по плотности подобных Земле. Планеты этого типа оказались наиболее распространенными среди всех экзопланет, известных на данный момент [Morbidelli, Raymond, 2016]. Обнаружено немало систем, содержащих по несколько суперземель, компактно расположенных во внутренней области с орбитальными периодами, не превышающими  $\sim 100$  дней. (В Солнечной системе во внешней части этой области находится только маленький Меркурий.) Все теоретические рассуждения указывают на то, что эти суперземли не могли образоваться на том месте, где они находятся, а попали туда в результате миграции. Предстоит разобраться, почему в Солнечной системе суперземель нет.

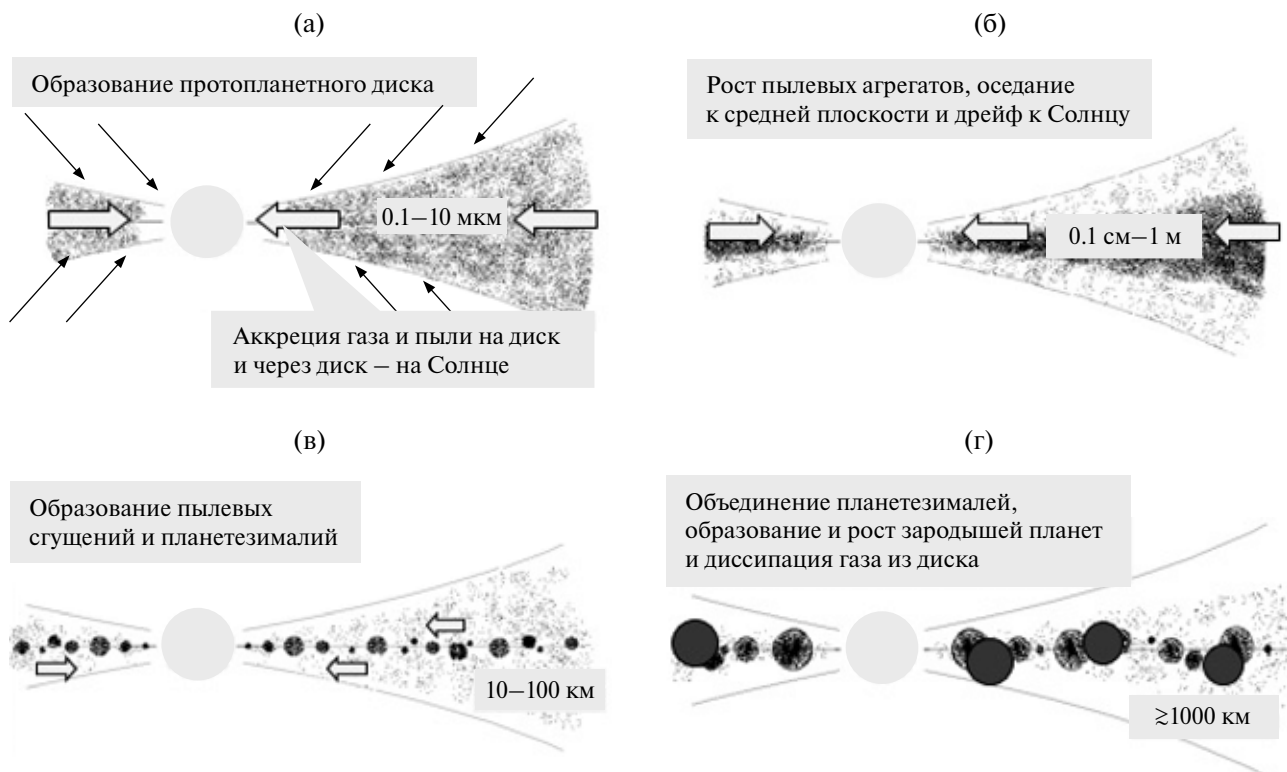
Разумеется, все особенности поздних стадий образования планет зависят от предшествующих процессов: эволюции газопылевого протопланетного диска и образования первых планетезималей — тел, удерживаемых от развала собственной гравитацией. Планетезимали образуются при взаимодействии с газом диска, значительная часть миграции формирующихся планет также происходит из-за взаимодействия с газом. Поэтому очень важно улучшить

знание структуры и эволюции протопланетного газопылевого диска. Радиальное распределение поверхностной плотности и температуры, а вместе с ними объемной плотности газа и давления, оказывает существенное влияние на зависимость скорости радиального дрейфа твердых частиц (пылевых агрегатов) от радиальной координаты, что определяет их обеднение или, напротив, накопление на тех или иных расстояниях от центральной звезды, необходимое для образования планетезималей [Макалкин, Зиглина, 2004; Drażkowska et al., 2016; Макалкин, Артющкова, 2017]. Поэтому важное значение имеет то, как по радиусу и по времени изменяется распределение указанных выше основных термодинамических параметров в протопланетном диске [Макалкин, Дорофеева, 1996; 2009]. Распределение температуры влияет также на химический состав пылевого вещества, из которого образуются планетезимали. Внутренний нагрев диска и перенос углового момента в нем определяются турбулентной вязкостью. Основной теоретической моделью для описания вязкости протопланетного диска является модель с альфа-параметризацией вязкости диска [Shakura, Sunyaev, 1973]. Турбулентная (кинематическая) вязкость считается пропорциональной произведению скорости звука на толщину диска с постоянным коэффициентом  $\alpha$ , что предполагает две пропорциональные зависимости: турбулентной скорости от скорости звука и турбулентной длины перемешивания от толщины диска. Обычно считается, что источником турбулентности является магниторотационная неустойчивость. Однако недавно было показано, что эта неустойчивость может почти везде подавляться благодаря амбиполярной диффузии [Bai, Stone, 2013], и в качестве основного эффекта, уносящего угловой момент из диска, предложен дисковый ветер, связанный с МГД-эффектами в диске [Bai et al., 2016]. В результате внутренняя структура диска может отличаться от альфа-диска, и вязкость внутренних слоев может быть очень низкой, а наружных, сильно ионизированных слоев, очень высокой, однако эффективная турбулентная вязкость, усредненная по толщине диска, должна быть достаточной для переноса углового момента и обеспечения потока массы на центральную звезду. С учетом указанных неопределенностей коэффициент  $\alpha$  и его распределение по радиусу и во времени остается свободным параметром. При этом, для согласования с данными по околозвездным дискам, необходимо, чтобы перенос момента и поток массы на звезду убывал в течение эволюции диска,

включая и стадию образования планетезималей. Однако на некоторой достаточно ранней стадии, перед образованием планетезималей, вязкость должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить температуру  $T > 300$  К на расстоянии  $r = 1$  а.е., необходимую для удовлетворения космохимическим ограничениям для околозвездного диска [Макалкин, Дорофеева, 2009].

Общая картина эволюции твердого вещества в протопланетном диске на допланетной стадии проиллюстрирована на рис. 1.

На первой стадии, продолжающейся не более 0.5 млн лет, образуется диск вокруг протосолнца. На этой стадии происходит падение газа и пыли на формирующийся диск из аккреционной оболочки протосолнца (показано стрелками), а также перенос массы по радиусу диска, находящегося в турбулентном состоянии и характеризующегося высокой турбулентной диффузией. Во внутренней области диска, на расстояниях до 10 а.е. в результате диффузии происходит аккреция газа и пылевого вещества через диск – на протосолнце. Пылевые агрегаты на этой стадии успевают вырасти в 100–1000 раз по сравнению с размерами межзвездных пылевых частиц (панель (а)). На следующей стадии, после исчезновения аккреционной оболочки диск оказывается вокруг молодого Солнца, находящегося на стадии Т Тельца в течение времени  $\sim 1$  млн лет и имеющего в начале этой стадии светимость больше современной. Диск остается в турбулентном состоянии, но с меньшей турбулентностью, чем на первой стадии, и с меньшей турбулентной диффузией вещества по радиусу диска. По мере продолжения роста пылевых агрегатов при соударениях происходит их оседание к средней плоскости диска и образование там пылевого слоя. На этой стадии агрегаты могут достигать размеров от 0.1 до 100 см (панель (б)). Такие крупные агрегаты, испытывая лобовое сопротивление газа, имеющего орбитальную скорость меньшую, чем у частиц (из-за поддержки радиальным градиентом давления в диске), теряют угловой момент и дрейфуют к Солнцу. При этом может происходить их накопление на некоторых радиальных расстояниях от Солнца, где в результате гравитационной неустойчивости пылевого слоя образуются пылевые сгущения, удерживаемые от распада собственной гравитацией, которые уплотняются и превращаются в планетезимали астероидных размеров (панель (в)). При объединении этих планетезималей в процессе взаимных столкновений происходит



**Рис. 1.** Эволюция твердого вещества в протопланетном диске. Панель (а) соответствует времени эволюции  $\sim 0.1$ – $0.5$  млн лет; панель (б)  $\sim 0.5$ – $1$  млн лет; панель (в)  $\sim 1$ – $2$  млн лет; панель (г)  $\sim 2$ – $10$  млн лет (на основе рисунка из книги [Дорофеева, Макалкин, 2004]. Значения параметров уточнены).

формирование и рост зародышей планет, в том числе ядер планет-гигантов, еще до завершения диссипации газа из диска (панель (г)).

### ПРОЦЕССЫ, ВЕДУЩИЕ К ОБРАЗОВАНИЮ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ

Образование планетезималей – это одна из важнейших пока еще не решенных проблем в области образования планет. Планетезималиями называют допланетные тела, собственная гравитация которых способна удержать их от развала и создать достаточное притяжение, чтобы падающие на них более мелкие тела и частицы смогли удержаться на их поверхности и обеспечить их дальнейший рост. Для выполнения этих условий наименьшие размеры тел должны быть  $\sim 1$  км. Самогравитация создает условия для дальнейшего роста при их столкновениях с другими телами, но образование планетезималей она обеспечить не может, будучи недостаточной для слияния более мелких тел. Скорости соударений тел с размерами  $\lesssim 10$  м, которые определяются, в основном, их трением о газ, намного больше той максимальной скорости, называемой скоростью убегания, при которой

гравитация таких тел может удерживать их от распада. Поэтому необходимы другие физические механизмы образования планетезималей.

Самый простой механизм – объединение твердых частиц при столкновениях. Частицы объединяются (слипаются), если энергия связи Ван-дер-Ваальса сравнима с энергией столкновения. Процессы, которые способствуют слипанию частиц: деформация и уплотнение пылевых агрегатов при столкновении, а также глубокое внедрение мелких частиц в рыхлые пылевые агрегаты. Если столкновение не ведет к слипанию частиц, реализуются другие варианты: может быть просто отскок частицы, а при более высоких скоростях – эрозия, кратерирование, фрагментация. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что пылевые агрегаты вырастают до сантиметровых размеров, если они состоят из силикатного вещества, оставаясь достаточно рыхлыми [Blum, 2018]. Во внешней части диска, за линией льда, пылевые агрегаты, содержащие лед, могут расти до размеров в несколько дециметров [Morbidelli, Raymond, 2016]. Дальнейший рост агрегатов возможен путем присоединения к массивной мишени части вещества мелкой частицы при ее дроблении

во время столкновения, однако по имеющимся данным эффективность этого процесса в ранней Солнечной системе была недостаточно высокой, хотя он мог привести к значительному увеличению размеров пылевых агрегатов [Blum, 2018].

Другой механизм, предлагаемый для образования планетезималей во внешней части Солнечной системы, где пылевые агрегаты содержат лед, основан на предположении об очень высокой эффективности слипания ледяных мономеров с размерами 0.1 мкм, которые в результате слипания образуют чрезвычайно разреженную, фрактальную структуру с плотностью  $10^{-5}$  г/см<sup>3</sup> и, дорастая с такой плотностью до масс планетезималей, затем уплотняются под действием давления окружающего газа и самогравитации, превращаясь в 10-километровые тела с плотностью  $\sim 0.1$  г/см<sup>3</sup> [Kataoka et al., 2013; Michikoshi, Kokubo, 2017]. Однако экспериментальные данные для субмикронных частиц отсутствуют и все физические процессы, связанные со столкновениями таких сверхразреженных агрегатов, пока мало изучены, поэтому трудно оценить вероятность образования ледяных планетезималей таким способом. Но из имеющихся данных следует, что каменные (силикатные) планетезималы таким путем образоваться не могут [Blum, 2018].

Наиболее перспективным путем образования планетезималей, согласующимся с имеющимися эмпирическими данными по кометам и астероидам, и, прежде всего, новыми данными по физическим свойствам кометы 67P Чурюмова–Герасименко, является достаточно медленное сжатие (но не быстрый коллапс) массивного сгущения пылевых агрегатов под действием собственной гравитации [Blum, 2018 и ссылки там].

Классическим путем образования такого сгущения является гравитационная неустойчивость плотного пылевого слоя в средней плоскости протопланетного диска; такой слой образуется в результате оседания пыли к средней плоскости диска под действием вертикальной компоненты силы тяготения Солнца и затем распадается на пылевые сгущения [Гуревич, Лебединский, 1950; Сафронов, 1969]. Однако необходимое утоньшение и уплотнение пылевого слоя требует отсутствия турбулентности газа в диске и поэтому оказывается труднодостижимым. Дело в том, что даже после затухания глобальной турбулентности в диске она локализуется вблизи средней плоскости в области пылевого слоя [Weidenschilling, 1984]. Ее генерирует сдвиговое

течение, существующее из-за различия между скоростью вращения газа в пылевом слое и скоростью вращения газа в остальной (выше- и нижележащей) части диска. Это различие вызвано тем, что газ в пылевом слое, по массе состоящем преимущественно из пылевой фазы, с помощью лобового сопротивления ускоряется твердыми частицами практически до кеплеровской скорости, а газ за пределами слоя вращается с меньшей скоростью из-за поддержки радиальным градиентом давления [Goldreich, Ward, 1973]. Благодаря большому вертикальному градиенту орбитальной скорости газа создаются значительные сдвиговые напряжения, генерирующие турбулентность, которая обеспечивает турбулентную диффузию частиц, предотвращает их дальнейшее оседание и не позволяет достичь плотности слоя, необходимой для гравитационной неустойчивости [Weidenschilling, 1984; Cuzzi et al., 1993].

В настоящее время более перспективным путем образования плотного пылевого сгущения, которое может сжиматься под действием собственной гравитации, считается потоковая неустойчивость (streaming instability). Для ее достижения достаточно, чтобы плотность пылевой фазы стала больше плотности газовой фазы в диске (тогда как для гравитационной неустойчивости необходимо многократное превышение плотности пылевой фазы над газовой). Поэтому потоковая неустойчивость может произойти раньше, чем гравитационная неустойчивость, и заместить ее [Johansen et al., 2014]. Потоковая неустойчивость – это вид гидродинамической неустойчивости двухфазной газопылевой среды. Очень приблизительно ее можно описать так. Если возникла область, в которой произошло флуктуационное увеличение плотности пылевой фазы, то она движется по орбите с несколько большей скоростью, увлекая газ. Такое пылевое сгущение из-за коллективного взаимодействия с газом имеет несколько больший удельный угловой момент, чем отдельные частицы вне сгущения, испытывающие лобовое сопротивление. Поэтому частицы, находящиеся в сгущении, дрейфуют к центру протопланетного диска с чуть меньшей скоростью, чем соседние частицы, не находящиеся в сгущении. В результате происходит рост массы и уплотнение сгущения за счет поглощения соседних частиц, дрейфующих с больших радиальных расстояний. Этот процесс взаимодействия пыли и газа в линейном приближении имеет одну растущую моду, соответствующую уплотнению

пылевой фазы [Youdin, Goodman, 2005]. Численное моделирование показало, что в результате потоковой неустойчивости плотность пылевой фазы может превысить в 100–300 раз плотность газа в средней плоскости [Johansen et al., 2012]. В таком случае плотность превышает критическое значение для гравитационной неустойчивости, и дальше идет гравитационный коллапс сгустков.

Однако неясно, достигались ли условия для потоковой неустойчивости в протопланетном диске, особенно в его внутренней части [Morbidelli, Raymond, 2016]. Даже для крупных пылевых агрегатов с числом Стокса  $St \sim 0.3$  (в области образования Земли это значение  $St$  соответствует диаметрам агрегатов  $\sim 30$  см) необходимо, чтобы массовое отношение твердого вещества к газу в диске (проинтегрированное по толщине)  $Z$ , называемое металличностью, было не меньше  $Z=0.03$  [Bai, Stone, 2010; Morbidelli, Raymond, 2016]. Это выше протосолнечного значения, равного  $Z=0.015$  во внешней части диска, и намного выше, чем  $Z=0.005$  во внутренней части, где лед испарен [Lodders, 2003]. Для более мелких пылевых агрегатов с размерами  $\lesssim 10$  см условия достижения потоковой неустойчивости гораздо хуже, а для частиц с размером  $\sim 0.1$  см (размер хондр) для потоковой неустойчивости необходимо  $Z \approx 0.08$  [Carrera et al., 2015], т. е. в 16 раз выше протосолнечного значения во внутренней зоне. Есть еще одна проблема с расчетом потоковой неустойчивости. В уравнениях гидродинамики двухфазной среды не учтена турбулентность (которая генерируется не самой потоковой неустойчивостью, а существует до нее): в уравнения для газа не включена турбулентная вязкость в уравнении движения и турбулентная диффузия в уравнении неразрывности, в уравнении движения частиц не учтено возмущение скорости газа турбулентностью. В то же время из решения задачи о гравитационной неустойчивости пылевого слоя в газе [Youdin, 2011; Зиглина, Макалкин, 2016] известно, что турбулентная диффузия и хаотические скорости частиц существенно препятствуют неустойчивости пылевого слоя. Поэтому пока еще нет достаточных оснований считать потоковую неустойчивость основным механизмом, обеспечивающим образование планетезималей. В результате есть смысл снова обратиться к гравитационной неустойчивости пылевого слоя как «классическому» механизму образования планетезималей.

## ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПЫЛЕВОГО СЛОЯ И МАССЫ ПЫЛЕВЫХ СГУЩЕНИЙ

В отличие от более ранних работ [Сафронов, 1969; Goldreich, Ward, 1973], в которых пылевой слой рассматривался как однофазная среда, в работе [Coradini et al., 1981] гравитационная неустойчивость в пылевом слое протопланетного диска была впервые рассмотрена с учетом взаимодействия пылевой (монодисперсной) и газовой фаз, которое выражалось через силу вязкого сопротивления. Численно решалась система гидродинамических уравнений (движения и неразрывности) для возмущений плотности и скорости каждой из фаз. В этой статье и последующих работах других авторов, вслед за работой [Генкин, Сафронов, 1975], при рассмотрении гравитационной неустойчивости учитывалась конечная толщина пылевого слоя. Основное отличие результатов [Coradini et al., 1981] от предшествующих однофазных моделей заключается в существенном увеличении времени развития гравитационной неустойчивости благодаря торможению частиц в газе. Из-за этого эффекта гравитационную неустойчивость, учитывающую сопротивление газа, иногда называют вековой (secular) [Youdin, 2011], хотя при крупных размерах пылевых агрегатов и высокой плотности слоя она может развиваться быстро, за несколько периодов обращения [Зиглина, Макалкин, 2016]. Аналитическая оценка влияния сопротивления газа на гравитационную неустойчивость в пылевом слое с учетом только радиальных возмущений скорости твердых частиц [Safronov, 1991], а позже – аналитическое решение системы уравнений для возмущений радиальных и азимутальных скоростей и поверхностных плотностей пылевой и газовой фаз в слое [Маров и др., 2008] подтвердили численные результаты [Coradini et al., 1981], показав существенное увеличение характерного времени развития гравитационной неустойчивости слоя по сравнению с моделью, не учитывающей газ.

Все эти результаты получены в моделях, в которых газ и пылевая фаза имеют разные скорости (двухжидкостная модель). Было опубликовано немало работ, в которых использовалась одножидкостная модель, предполагающая, что газ и пыль сжимаются с одинаковыми скоростями. Однако для развития гравитационной неустойчивости в такой модели, как показано в работе [Coradini et al., 1981; Safronov, 1991], требуется слишком большая плотность слоя, которая соответствует его толщине (1–100 м), что требует

нереально низких хаотических скоростей в слое ( $< 10^{-5}$  м/с).

В работах [Goodman, Pindor, 2000; Youdin, 2011; Shariff, Cuzzi, 2011] в уравнение неразрывности для пылевого слоя был введен член, отражающий турбулентную диффузию твердых частиц в радиальном направлении. До этого учитывалась только вертикальная турбулентная диффузия частиц, определяющая толщину слоя [Cuzzi et al., 1993]. Радиальная турбулентная диффузия частиц, как и вертикальная, препятствует гравитационной неустойчивости, так как она противодействует сжатию и уплотнению сгущений и приводит к расползанию формирующихся кольцевых сгущений при недостаточно большой длине волны возмущений плотности. В результате существенно увеличивается как минимальная длина волны возмущений, при которой возможна гравитационная неустойчивость, так и длина волны с наибольшей скоростью роста возмущений. Это имеет большое значение для оценки характерных размеров и масс формирующихся пылевых сгустков — предшественников планетезималей. Однако в этих работах не учитывались возмущения движения газа, в частности, азимутальные возмущения скорости газа, регулирующие передачу углового момента. Из-за этого не сохраняется момент количества движения в единице объема пылегазовой среды диска и получается избыточная передача углового момента от пылевой фазы газу. В результате необоснованно получается, что гравитационная неустойчивость может происходить при значениях плотности пылевого континуума на 2–3 порядка меньших критической плотности, получаемой в задаче для однофазной среды, а длины волн возмущений ограничены сверху только радиальным размером диска.

В работе [Takahashi, Inutsuka, 2014] при рассмотрении гравитационной неустойчивости учтены не только турбулентная диффузия и дисперсия скоростей частиц, но и возмущения плотности и скорости газа, для чего в систему внесены соответствующие уравнения, в которые включена также турбулентная вязкость газа. При этом анализ и численное решение системы уравнений выполнены для периферийной области протопланетного диска,  $r = 100$  а.е., далекой от области образования планет, диск считался однородным по толщине, т.е. оседание пыли к средней плоскости не учитывалось. В работе получено, что на расстоянии 100 а.е. при дополнительном условии 10-кратного обеднения газом ( $Z = 0.1$ ), газопылевой диск, в целом, (включая газ) близок к состоянию гравитационной

неустойчивости, поскольку на этом расстоянии параметр Тоомре  $Q$  [Toomre, 1964] близок к 3. (Неустойчивость наступает при  $Q \lesssim 1$ .) Отсюда следует, что для расстояния в 10 раз меньшего, т.е.  $r = 10$  а.е. при 10-кратном увеличении плотности и таком же значении  $Z$  получается  $Q \sim 10$ , что соответствует состоянию диска, далекому от гравитационной неустойчивости. А поскольку модель [Takahashi, Inutsuka, 2014] не учитывает оседания частиц и образования пылевого слоя, она не может быть использована для рассмотрения гравитационной неустойчивости в зоне формирования планет как механизма образования планетезималей.

Поэтому нами рассмотрена задача о гравитационной неустойчивости в области образования планет, в пылевом слое в средней плоскости протопланетного диска. При этом учитывалось трение твердых частиц (агрегатов пылевых частиц) о газ внутри слоя [Зиглина, Макалкин, 2016], а также турбулентные касательные напряжения, действующие на слой со стороны газа, находящегося вне слоя [Макалкин, Зиглина, 2018]. В обеих работах решалась линеаризованная система гидродинамических уравнений для радиальных возмущений пылевой (монодисперсной) и газовой фаз в осесимметричном, проинтегрированном по толщине пылевом слое в предположении, что длина волны возмущения намного меньше радиуса пылевого слоя и диска. Как было показано [Зиглина, Макалкин, 2016], если время роста возмущения не очень мало по сравнению с орбитальным периодом, что всегда выполняется в диске, то можно использовать приближение несжимаемого газа. В результате система уравнений сокращается с шести до четырех, и неизвестными параметрами являются возмущения радиальной скорости и поверхностной плотности пылевой фазы, а также азимутальных скоростей обеих фаз. При расчете возмущений этих параметров учитывается возмущение гравитационного потенциала слоя, которое само зависит от возмущений поверхностной плотности пылевой фазы и рассчитывается с учетом толщины слоя, а последняя зависит от самогравитации слоя, солнечной гравитации и турбулентной диффузии частиц в вертикальном направлении. В уравнения включены члены, показывающие лобовое сопротивление, действующее на частицу (пылевой агрегат) со стороны газа, среднеквадратичную хаотическую скорость частиц в турбулентном газе, турбулентную диффузию частиц, турбулентную вязкость газа. В расчеты турбулентной вязкости внесен поправочный множитель, учитывающий, что



большое массовое содержание пылевой фазы в слое ослабляет турбулентность газа, уменьшая турбулентную вязкость [Колесниченко, Маров, 2006].

Наличие уравнения для возмущения азимутальной скорости газа позволяет правильно описать передачу углового момента от пылевой фазы газу в слое из-за торможения частиц газом. Такое взаимодействие частиц и газа приводит к ограничению сверху на длину волны возмущения, при которой возможна неустойчивость. Получено и решено кубическое дисперсионное уравнение, справедливое для плотного пылевого слоя, т. е. для случая, когда отношение поверхностных плотностей пылевой фазы и газа в слое много больше единицы. Для небольших частиц (агрегатов), у которых характерное время торможения в газе гораздо меньше орбитального кеплеровского периода, выведен критерий гравитационной неустойчивости, который помимо поверхностной плотности и среднеквадратичной скорости твердых частиц и их кеплеровской угловой орбитальной скорости, входящих в параметр Тоомре  $Q$ , учитывает также время торможения частицы в газе, зависящее от ее размера. Из критерия следует, что условие гравитационной неустойчивости ухудшается с уменьшением радиуса частицы (обратно пропорционально радиусу частиц не меньше сантиметра на 1 а.е.). Рассчитаны параметры неустойчивости слоя: интервал длин волн, в котором она происходит, и ее скорость роста (инкремент) в зависимости от длины волны возмущения в околосолнечном диске на радиальных расстояниях 1 а.е. и 10 а.е. Численные расчеты выполнены для изменяющихся в широких пределах значений числа Стокса ( $St$ ) и параметров турбулентной вязкости. Число Стокса равно произведению характерного времени торможения частицы в газе  $t_s$  на ее кеплеровскую (орбитальную) угловую скорость  $\Omega$ , то есть имеет смысл безразмерного времени торможения частицы и является мерой динамического влияния, которое оказывает сила сопротивления газа на движение частицы. Число  $St$  увеличивается с размером и плотностью частицы (пылевого агрегата) при заданных плотности и температуре газа и угловой скорости  $\Omega$ , зависящих от радиального расстояния. Учитывалась как глобальная турбулентная вязкость в протопланетном диске, описываемая альфа-моделью [Shakura, Sunyaev, 1973], так и локальная турбулентность в области пылевого слоя. Локальная турбулентность связана с неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца в этой области [Goldreich, Ward, 1973] и обусловлена различием

плотностей и скоростей вращения пылевого слоя и газа, находящегося выше и ниже слоя. Локальную вязкость также можно выразить через параметр  $\alpha$ , но он уже не будет константой, так как зависит от отношения плотностей пылевой и газовой фаз в слое и может зависеть от параметров частиц [Takeuchi et al., 2012]. В качестве коэффициента в выражении для локальной турбулентной вязкости обычно фигурирует  $Re_*^{-2}$ , где  $Re_*$  – критическое число Рейнольдса, которое определено недостаточно точно для условий протопланетного диска и пылевого слоя. Его варьируют в пределах от 20 до 200 [Cuzzi et al., 1993], однако значение  $Re_* \sim 20$ , вероятно, предпочтительнее [Rafikov, 2011; Takeuchi et al., 2012].

В результате расчетов [Зиглина, Макалкин, 2016] показано, что на расстоянии 1 а.е. для неустойчивости в слое необходимо обогащение твердым (пылевым) веществом в диске (его относительное содержание по массе характеризуется параметром  $Z$ ). Обогащение может варьировать от очень небольшого до стократного по сравнению с первичными, протосолнечными значениями, равными  $Z=0.005$  на расстоянии 1 а.е. и  $Z=0.015$  на 10 а.е. [Lodders, 2003] в зависимости от параметров пылевых агрегатов и параметров турбулентной вязкости. Для очень крупных пылевых агрегатов, имеющих число  $St=2$ , которое соответствует размерам агрегатов  $\sim 40$  см при плотности вещества  $1.5 \text{ г/см}^3$  и при предельно низкой турбулентной вязкости,  $\alpha=4 \cdot 10^{-8}$  и  $Re_*=200$ , обогащения вообще не требуется, и гравитационная неустойчивость может происходить при первичном значении  $Z=0.005$  на 1 а.е.

Однако достижение агрегатами таких крупных размеров и такие низкие значения вязкости очень маловероятны (хотя не исключены). При значении  $St=0.5$ , что соответствует размерам агрегатов  $\sim 20$  см, и при параметрах турбулентной вязкости  $\alpha=10^{-7}$  и  $Re_*=125$  неустойчивость наступает при пятикратном обогащении твердым веществом на 1 а.е. ( $Z=0.025$ ). При более мелких (и более вероятных) пылевых агрегатах с числом Стокса  $St=0.2$ , которое соответствует размерам агрегатов  $\sim 10$  см, и при более сильной турбулентности, которая считается более вероятной [Morbidelli, Raymond, 2016; Rafikov, 2011], а именно, с параметрами глобальной и локальной вязкости  $\alpha=10^{-6}$  и  $Re_*=20$ , необходимое обогащение твердым веществом достигает 60–70 раз по сравнению с первичным протосолнечным содержанием на 1 а.е., что соответствует значениям  $Z=0.4–0.5$ . Как было получено

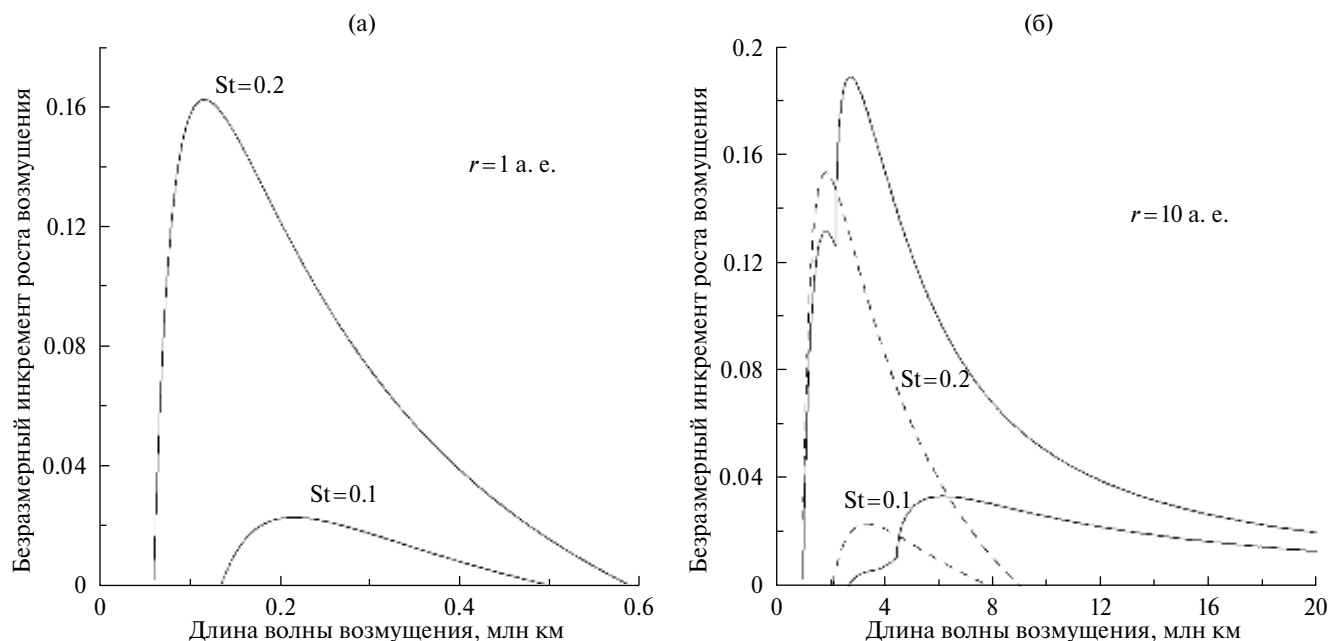
в работе [Макалкин, Артюшкова, 2017] и будет обсуждаться ниже, даже такое большое обогащение твердым веществом достижимо, если учесть возможность его накопления во внутренней зоне (где образуются планеты земной группы) за счет радиального дрейфа агрегатов в пылевом слое.

Рассчитанная объемная плотность пылевой фазы в слое в начале гравитационной неустойчивости оказалась близка к критической плотности, полученной ранее [Сафронов, 1969] для однофазной пылевой среды (отличие менее чем в 1.5 раза для крупных частиц), но теперь она зависит от числа Стокса частицы. На расстоянии  $r = 1$  а.е. при  $St = 2$  она ниже «классической» на 20%, а при  $St = 0.2$  больше ее в полтора раза независимо от параметров турбулентной вязкости ( $\alpha$  и  $Re_*$ ).

В работе [Макалкин, Зиглина, 2018] помимо взаимодействия твердых частиц с газом внутри пылевого слоя учтены турбулентные касательные напряжения, действующие на слой со стороны газа, находящегося вне слоя и имеющего меньшую орбитальную скорость. Они пропорциональны турбулентной вязкости газа и вертикальному градиенту относительной скорости вращения газа и действуют с обеих сторон от средней плоскости слоя. Эти напряжения тормозят орбитальное движение газа внутри слоя,

а за счет лобового сопротивления, действующего со стороны газа на частицы в слое, эти напряжения тормозят вращение слоя в целом. Таким образом, это еще один механизм передачи углового момента от слоя окружающему газу. В математической постановке задачи добавление этого эффекта соответствует добавлению еще одного уравнения, описывающего возмущения азимутальной скорости газа вне пылевого слоя. В это уравнение, как и в уравнение для возмущения азимутальной скорости газа внутри слоя, добавляется член, учитывающий касательное турбулентное напряжение. В результате решения дополненной системы уравнений для возмущений получено дисперсионное уравнение четвертого порядка для плотного слоя. Его решение позволило получить уточненные зависимости скорости роста возмущений поверхностной плотности от длины волны.

Интервал длин волн, в котором реализуется гравитационная неустойчивость, и зависимость инкремента (скорости) роста неустойчивости от числа Стокса проиллюстрирована на рис. 2 для двух радиальных расстояний: 1 и 10 а.е. Расчеты выполнены при следующих значениях поверхностных плотностей газа и твердого (пылевого) вещества, температуры, параметров, характеризующих вязкость газа



**Рис. 2.** Зависимость безразмерного инкремента роста возмущения поверхностной плотности (и скорости) твердого (пылевого) вещества от длины волны возмущения на радиальном расстоянии 1 а.е. (панель (а)) и 10 а.е. (панель (б)). Безразмерный инкремент представляет собой скорость роста возмущения, деленную на кеплеровскую угловую скорость  $\Omega$ . На каждой панели показаны результаты расчетов для двух значений числа Стокса частиц ( $St$ ), отличающихся в 2 раза. Значения поверхностной плотности пыли  $\Sigma_p$  и газа  $\Sigma_g$ , температуры  $T$  и параметров турбулентной вязкости газа  $\alpha$  и  $Re_*$ , при которых выполнены расчеты, даны в тексте статьи.

при глобальной и локальной турбулентности,  $\alpha$  и  $Re_*$ :  $\Sigma_p = 1000 \text{ г/см}^2$ ,  $\Sigma_g = 1000 \text{ г/см}^2$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ,  $\alpha = 10^{-6}$ ,  $Re_* = 20$  на расстоянии  $r = 1 \text{ а.е.}$  (панель (а)) и  $\Sigma_p = 318 \text{ г/см}^2$ ,  $\Sigma_g = 15 \text{ г/см}^2$ ,  $T = 50 \text{ К}$ ,  $\alpha = 10^{-6}$ ,  $Re_* = 20$  на  $10 \text{ а.е.}$  (панель (б)).

В результате расчетов [Макалкин, Зиглина, 2018] выяснилось, что для радиального расстояния  $1 \text{ а.е.}$  учет взаимодействия слоя с окружающим турбулентным газом диска не приводит к существенному изменению параметров гравитационной неустойчивости по сравнению с результатами предыдущего моделирования [Зиглина, Макалкин, 2016], в котором такое взаимодействие не учитывалось. В то же время для расстояния  $r = 10 \text{ а.е.}$  изменения параметров, характеризующих неустойчивость, оказались значительными.

Критическая поверхностная плотность для неустойчивости на расстоянии  $1 \text{ а.е.}$  увеличивается всего лишь  $\sim 1\%$ , а зависимость безразмерного инкремента от длины волны с точностью до величины  $\sim 1\%$  совпадает с зависимостью, полученной без учета взаимодействия газа в слое и в диске.

На расстоянии  $10 \text{ а.е.}$ , как показали расчеты [Макалкин, Зиглина, 2018], для гравитационной неустойчивости при параметрах вязкости газа  $\alpha = 10^{-6}$  и  $Re_* = 20$  и числе Стокса частиц  $St = 0.1$  (которое соответствует размерам частиц  $\sim 10\text{--}25 \text{ см}$  при плотности  $0.5\text{--}0.7 \text{ г/см}^3$ ) требуется значительно меньшее обогащение твердым веществом, а именно, в  $2\text{--}6$  раз (до  $Z \approx 0.03\text{--}0.09$ ), чем на расстоянии  $1 \text{ а.е.}$  при таких же значениях параметров  $\alpha$ ,  $Re_*$  и  $St$ . Критическое значение поверхностной плотности для начала гравитационной неустойчивости на расстоянии  $10 \text{ а.е.}$  с учетом взаимодействия пылевого слоя с окружающим газом диска понижается в  $1.4$  раза по сравнению со значением, полученным без учета такого взаимодействия, и в два раза по сравнению с результатом [Сафронов, 1969], полученным без учета воздействия газа на твердые частицы.

Результаты расчетов безразмерного инкремента роста возмущений в зависимости от длины волны [Макалкин, Зиглина, 2018] для расстояния  $r = 10 \text{ а.е.}$  показаны на панели (б) рис. 2. Получено, что на этом радиальном расстоянии передача углового момента от газа в пылевом слое, находящемся за пределами слоя, приводит к появлению двух новых эффектов. Во-первых, наибольший инкремент роста возмущения увеличивается благодаря возникновению нового, большего по величине максимума на длине

волны, приблизительно в два раза большей, чем у первого максимума, во-вторых, образуется длинноволновый «хвост» неустойчивости, в котором при увеличении длины волны в  $20\text{--}40$  раз инкремент медленно убывает до нуля. Этим особенностям не было при рассмотрении гравитационной неустойчивости без передачи углового момента за пределы слоя [Зиглина, Макалкин, 2016]. Их также не наблюдается на расстоянии  $1 \text{ а.е.}$ , как видно из панели (а) рис. 2.

Наличие длинноволнового хвоста в гравитационной неустойчивости слоя на расстоянии  $10 \text{ а.е.}$  и отсутствие такого хвоста на расстоянии  $1 \text{ а.е.}$  подтверждают оценку [Зиглина, Макалкин, 2016], согласно которой передача углового момента от газа в слое газу, находящемся вне слоя, на расстоянии  $1 \text{ а.е.}$  происходит медленно по сравнению со скоростью развития неустойчивости в этой области и поэтому практически не влияет на нее. На расстоянии  $10 \text{ а.е.}$  имеет место обратное соотношение скоростей передачи углового момента и развития неустойчивости.

Массы образующихся самогравитирующих пылевых сгущений связаны с характерной длиной волны возмущения  $\lambda_c$ , которая соответствует наибольшему значению инкремента роста возмущения, соотношением  $m_c \sim \sigma_p \lambda_c^2$  [Safronov, 1991], где  $\sigma_p$  — поверхностная плотность твердого вещества. Для рассчитанного интервала значений  $\lambda_c$ , получаем массы первичных сгущений  $m_c \sim 10^{20}\text{--}10^{23} \text{ г}$  на расстоянии  $1 \text{ а.е.}$  Наибольшее значение из этого интервала получается при параметрах, соответствующих панели (а) рис. 2. Для расстояния  $10 \text{ а.е.}$  получаются значения  $m_c \sim 10^{24} \text{ г}$ . Такого же порядка массы соответствуют и первичным планетезималиям, образующимся из этих сгущений.

Сформулируем основные выводы по данному разделу:

1. В результате гравитационной неустойчивости пылевого слоя во всей области образования планет происходит сжатие и уплотнение только твердой фазы слоя (но не газа), в результате чего образуются пылевые сгущения с астероидными массами.

2. Условия достижения гравитационной неустойчивости зависят от размеров твердых частиц (пылевых агрегатов) находящихся в слое: условия тем лучше, чем крупнее агрегаты, лучшие условия — при размерах агрегатов  $\sim 0.1\text{--}1 \text{ м}$ .

3. С учетом данных о турбулентности в протопланетном диске, содержащем пылевой слой, гравитационная неустойчивость в слое на расстоянии  $1 \text{ а.е.}$  даже при крупных размерах

пылевых агрегатов достигается только при многократном (не менее 5–10 раз) обогащении слоя твердым веществом (пылевой фазой) по сравнению со стандартной моделью протопланетного диска минимальной массы. Пути достижения необходимого обогащения обсуждаются в следующем разделе. Для гравитационной неустойчивости на расстоянии 10 а.е. достаточно гораздо меньшего обогащения твердым веществом, чем на 1 а.е., а в случае, если слой состоит из агрегатов метрового размера, обогащение минимально или отсутствует.

4. Более сильное взаимодействие пылевого слоя и окружающего газа в диске на расстоянии 10 а.е. по сравнению с областью 1 а.е. обеспечивает существенное расширение диапазона длин волн, в котором развивается гравитационная неустойчивость, что приводит, в частности, к увеличению масс образующихся пылевых сгущений и первичных планетезималей.

#### РАДИАЛЬНОЕ СЖАТИЕ ПЫЛЕВОГО СЛОЯ КАК ПУТЬ К ОБРАЗОВАНИЮ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ

Для объяснения того, как могло произойти необходимое для гравитационной неустойчивости значительное накопление (аккумуляция) твердого вещества во внутренней области пылевого слоя, на расстояниях от Солнца  $r \leq 10$  а.е., где по современным представлениям, происходило образование планет, можно привлечь радиальное сжатие слоя. Оно происходит из-за потери углового момента слоем при его трении об окружающий газ [Goldreich, Ward, 1973] и, если частицы в более удаленной от Солнца части пылевого слоя дрейфуют к центру с большей скоростью, чем частицы на меньших радиальных расстояниях, то происходит уплотнение слоя при его сжатии [Makalkin, 1980]. Такое уплотнение слоя может происходить под действием турбулентных касательных напряжений [Youdin, Chiang, 2004; Макалкин, Зиглина, 2004] или из-за трения о газ индивидуальных частиц в слое [Youdin, Shu, 2002]. В указанных работах не учитывалась глобальная турбулентность в протопланетном диске.

В работе [Макалкин, Артюшкова, 2017] проведено моделирование радиального сжатия пылевого слоя, состоящего из крупных пылевых агрегатов. Слой рассматривался как монодисперсная система, при этом размеры агрегатов варьировали от нескольких сантиметров до метра. Учтены сдвиговые напряжения, действующие на газ в пылевом слое, орбитальная скорость

которого больше скорости газа за пределами слоя, что приводит к потере слоем углового момента и движению к центру системы. Величина напряжений определяется турбулентной вязкостью, которая представлена как сумма  $\alpha$ -вязкости, связанной с глобальной турбулентностью в диске, и вязкости, связанной с локальной турбулентностью, имеющей место в тонкой экваториальной области диска, содержащей пылевой слой. Эта турбулентность вызвана неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца, возникающей при оседании твердых частиц, и связана с экмановским слоем, включающим в себя (охватывающим) и пылевой слой. При рассмотрении пылевого слоя использовались два варианта локальной турбулентной вязкости. В одном из них она не зависит от числа Стокса частиц – этот вариант принят для случая, когда слой состоит из крупных агрегатов частиц и имеет толщину меньше толщины экмановского слоя. В другом варианте турбулентная вязкость зависит от числа Стокса. Приведено обоснование этого варианта для случая более мелких пылевых агрегатов, у которых число  $St \ll 1$ .

Изучались условия накопления твердого вещества в слое на разных расстояниях от центральной звезды (молодого Солнца): такое накопление обеспечивает достижение критической плотности для гравитационной неустойчивости твердой фазы в слое, ведущей к образованию самогравитирующих сгустков твердого вещества – первичных сверхразреженных планетезималей. Проведено численное моделирование радиального сжатия слоя с учетом потери массы твердого вещества на фронте испарения водяного льда (линии льда). Температура сублимации водяного льда принималась равной  $T_w = 150$  К. Тогда для принятого распределения температуры  $T \propto r^{-1/2}$  и температуры на 1 а.е.  $T_1 = 300$  К получаем положение линии льда  $r_w = 4$  а.е.

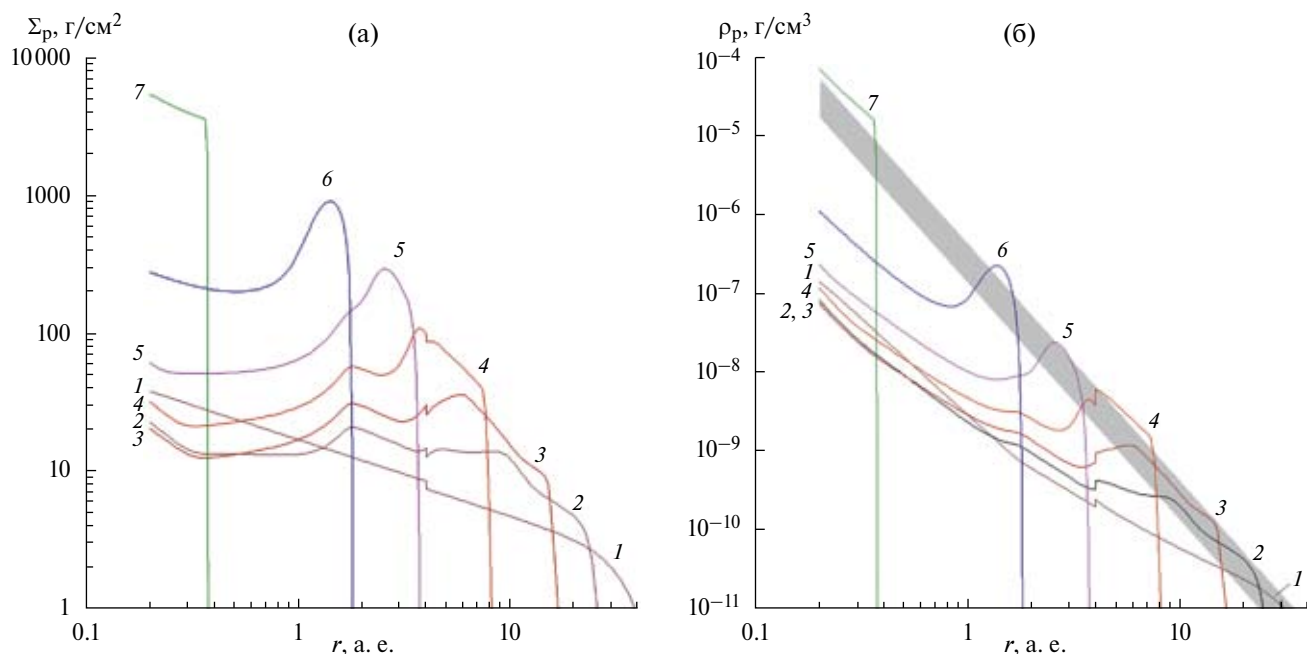
Решалось существенно нелинейное уравнение непрерывности для твердой фазы вещества пылевого слоя и использовалось граничное условие на линии льда, заключающееся в непрерывности потока массы нелетучей компоненты, не содержащей лед. Расчеты с этим дополнительным граничным условием показали, что от соотношения размеров и плотностей агрегатов частиц до и после испарения льда зависит поверхностная и объемная плотность твердой фазы с внутренней стороны линии льда. Если после испарения льда размеры (или плотность) пылевых агрегатов уменьшаются на порядок и более, то происходит накопление массы и резкий рост поверхностной плотности твердого

вещества в кольцевой зоне, прилегающей изнутри к линии льда. Это способствует гравитационной неустойчивости в этой зоне. Если же размеры агрегатов после фракционного испарения на линии льда и повторной аккумуляции при взаимных столкновениях имеют размеры, лишь в несколько раз меньшие, чем за линией льда, то в кольцевой зоне, примыкающей изнутри к линии льда, происходит падение плотности и образуется дефицит массы. Ширина этой зоны при определенных условиях может достигать ширины пояса астероидов в Солнечной системе. При этом на меньших и больших радиальных расстояниях происходит достаточная аккумуляция вещества для гравитационной неустойчивости слоя. Расчеты показали, что если во внешней области (за линией льда) пылевые агрегаты в слое имеют метровые размеры, а числа Стокса порядка единицы, то уплотнение пылевого слоя в зонах формирования планет-гигантов и планет земной группы происходит, если начальная поверхностная плотность пылевого слоя и поверхностная плотность газа в диске не слишком круто падают с радиальной координатой, что не противоречит данным наблюдений дисков молодых звезд [Williams, Cieza, 2011]. При задании этих распределений в виде обратной степенной зависимости  $\Sigma_{p,0} \propto r^{-s}$  и  $\Sigma_g \propto r^{-p}$

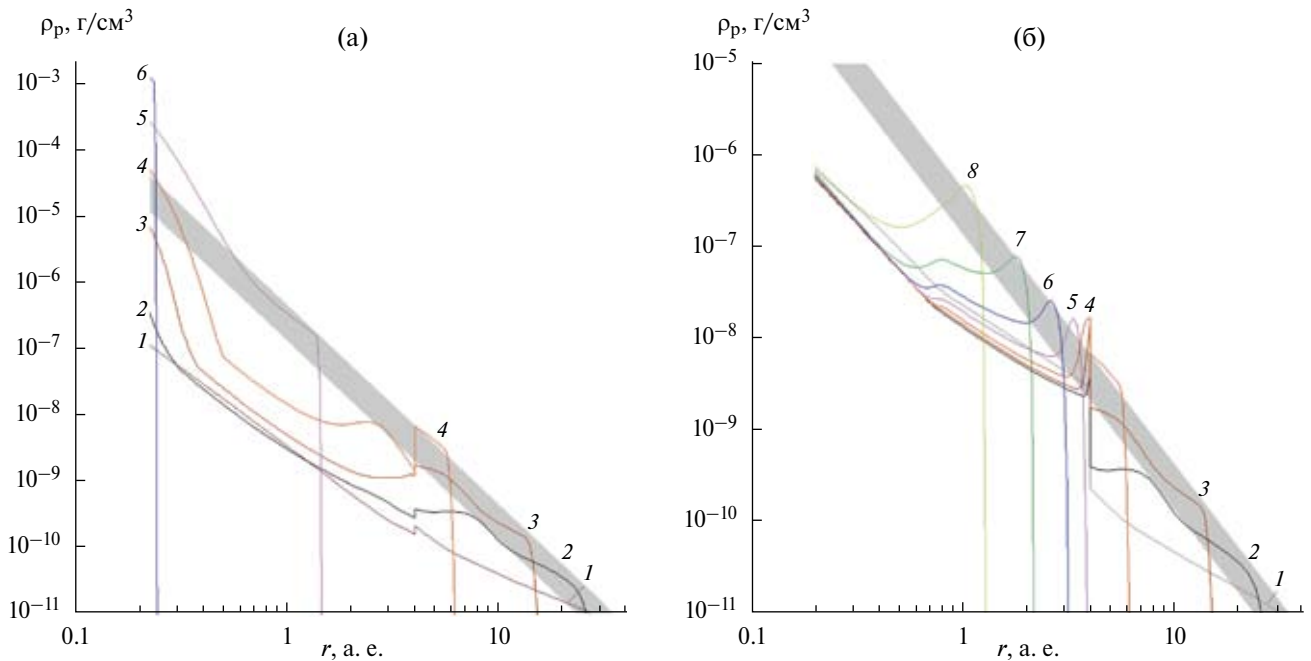
с показателями  $s$  и  $p$ , ограничение на показатели имеет вид  $s \approx p \leq 0.75$ . Если же агрегаты во внешней области более мелкие, в пределах дециметра, с числом Стокса порядка 0.01, то уплотнение слоя во всей области образования планет может происходить и при более крутом падении указанных степенных функций с радиальным расстоянием, с показателями до 1.25, а уплотнение в более узкой зоне может иметь место и при показателях до 1.5.

После начала сжатия слоя в рассчитанных моделях критическая плотность для гравитационной неустойчивости достигается сначала на периферии слоя (~20 а.е.) – через 5–40 тыс. лет при размерах агрегатов 1.6–0.8 м. Позже это происходит и во внутренней области ( $\leq 1$  а.е.), где критическая плотность достигается через 20–40 тыс. лет при полуметровых радиусах агрегатов (и протосолнечном содержании газа в диске) или через 300–400 тыс. лет при радиусах агрегатов 3 см.

Результаты некоторых расчетов [Макалкин, Артюшкова, 2017] проиллюстрированы на рис. 3 и рис. 4. В представленной на рис. 3 модели (модель 2 из указанной работы) радиусы пылевых агрегатов составляют 50 см во внешней зоне, за линией льда ( $r > r_w = 4$  а.е.) и 10 см во внутренней зоне ( $r < 4$  а.е.). Плотности агрегатов



**Рис. 3.** Изменение радиального распределения поверхностной плотности  $\Sigma_p(r)$  (панель (а)) и плотности  $\rho_p(r)$  (панель (б)) твердой фазы в средней плоскости пылевого слоя для модели 2, характеристики которой указаны в тексте. Кривые 1–7 на обеих панелях соответствуют следующим моментам времени от начала радиального сжатия слоя (тысяч лет): 0, 5, 10, 20, 40, 80, 140. Серая диагональная полоса соответствует интервалу значений для критической плотности  $\rho_p = \rho_{p,cr} = (1-3) \rho^*$ .



**Рис. 4.** Изменение плотности твердого вещества пылевого слоя  $\rho_p(r)$  в моделях 7 и 14. Для обеих моделей (на обеих панелях) кривые 1–7 (в порядке роста номеров) соответствует распределению  $\rho_p$  в следующие моменты времени от начала эволюции слоя (тысяч лет): 0, 5, 10, 20, 40, 80, 160. Для модели 14 (панель (б)) кривая 8 соответствует моменту времени от начала радиального сжатия слоя 320 тыс. лет. Серая полоса обозначает то же, что на рис. 3. Параметры моделей – в тексте.

в этих зонах приняты равными 0.5 и 1.4 г/см<sup>3</sup>, что согласуется со средними плотностями комет и астероидов типа С соответственно. Показатели  $s$  и  $p$  в радиальном распределении начальной поверхностной плотности пылевого слоя и поверхностной плотности газа в диске равны  $s = p = 0.5$ . Поверхностная плотность газа на 1 а.е. равна 1000 г/см<sup>2</sup>. Начальный радиус пылевого слоя принят равным 40 а.е. Начальное содержание твердого вещества принято в протосолнечной пропорции [Lodders, 2003], что соответствует начальному значению  $Z$  во внешней зоне  $Z_0 = 0.015$ . Указанная в подписи под рис. 3 плотность  $\rho^*$  – «размазанная» по сфере радиуса  $r$  плотность Солнца  $\rho^* = 3M_*/4\pi r^3$ . Параметры турбулентной вязкости:  $\alpha = 10^{-6}$ ,  $Re_* = 20$ .

Из рис. 3 видно, что в данной модели при отношении радиусов пылевых агрегатов во внутренней и внешней зонах как 1/5 наилучшие условия для достижения критической плотности достигаются в области  $r = 5-10$  а.е. и при  $r < 3$  а.е. Для сравнения на рис. 4 приведено изменение плотности в двух других моделях. Радиусы пылевых агрегатов в модели 7 (на панели (а) рис. 4) составляют 80 см во внешней зоне, за линией льда ( $r > r_w = 4$  а.е.) и 25 см во внутренней зоне ( $r < 4$  а.е.). В модели 14 (панель (б) рис. 4) при

таком же значении радиусов пылевых агрегатов во внешней зоне (80 см), значения радиусов во внутренней зоне в 10 раз меньше, чем в модели 7, т.е. 2.5 см. Плотности агрегатов в обеих зонах, параметры турбулентности и распределения начальной поверхностной плотности пылевой фазы и поверхностной плотности газа такие же, как указанные выше для модели 2. Начальный радиус пылевого слоя принят равным 50 а.е. Начальное содержание твердого вещества принято в количестве 0.55 от протосолнечной пропорции, т.е. начальная металличность  $Z$  во внешней части слоя (за линией льда) составляет  $Z_{L,0} = 0.55 Z_0 = 0.00825$ . Такое начальное условие соответствует предположению, что в пылевой слой опустилась лишь часть твердого вещества, находившегося в диске. Другая часть в виде достаточно мелкой пыли осталась распределенной по всей толщине протопланетного диска.

Из сравнения рис. 4а и 4б хорошо видно, как отношение радиусов пылевых агрегатов во внутренней и внешней зонах (по разные стороны от линии льда) кардинально влияет на положение области, в которой накапливается вещество и достигается плотность, необходимая для гравитационной неустойчивости слоя. В модели 7,

где отношение радиусов равно  $25/80 \approx 0.31$ , твердое вещество накапливается в области  $r \leq 1$  а.е., тогда как в модели 14, где это отношение в десять раз меньше, т.е.  $2.5/80 \approx 0.031$ , вещество накапливается в области, прилегающей с внутренней стороны к линии льда,  $r \leq 4$  а.е., в зоне астероидного пояса.

Из расчетов следует, что уплотнение слоя во всей области образования планет происходит, если глобальная турбулентность, описываемая с помощью  $\alpha$ -формализма вязкости слабее локальной турбулентности, вызванной неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца пылевого слоя. Это накладывает ограничение на параметр глобальной вязкости:  $\alpha \leq 3 \times 10^{-6}$  на 1 а.е. и  $\alpha \leq 10^{-5}$  на 10 а.е. Отсюда следует, что от соотношения величин глобальной и локальной турбулентной вязкости зависит локализация накопления вещества. Так, при повышении глобальной вязкости затрудняется накопление вещества во внутренней части диска. Накопление твердого вещества в узкой кольцевой зоне, примыкающей изнутри к линии льда, требует менее жесткого ограничения на глобальную вязкость:  $\alpha < 10^{-4}$ . Однако при  $\alpha \geq 10^{-4}$  аккумуляции вещества не происходит нигде: пылевой слой дрейфует к центру, оставаясь недостаточно плотным для гравитационной неустойчивости. В то же время локальная турбулентность, генерируемая разностью скоростей вращения слоя и диска, даже когда ее уровень высок (при  $Re_* = 20$ ) не препятствует накоплению твердого вещества и достижению гравитационной неустойчивости при радиальном сжатии слоя.

Результаты расчетов убедительно свидетельствуют о том, что скорость радиального дрейфа пылевого слоя определяется коллективным взаимодействием между слоем и окружающим газом диска. Индивидуальные регулярные скорости пылевых агрегатов в слое, вызванные лобовым сопротивлением каждого пылевого агрегата о газ, в плотных областях слоя оказываются на 2–3 порядка меньше коллективной скорости (центра масс кольцевого фрагмента слоя). При этом коллективные скорости в десятки раз меньше тех индивидуальных скоростей, которые были бы у агрегатов, если бы не было пылевого слоя, т.е. при малых концентрациях твердых частиц. В результате выяснилось, что характерное время радиального дрейфа пылевого слоя, состоящего из метровых пылевых агрегатов на два порядка, а в случае дециметровых – на один порядок больше характерного времени радиального дрейфа индивидуальных частиц в отсутствии пылевого слоя. Эти результаты

показывают, как велика роль коллективного эффекта в замедлении радиального дрейфа агрегатов частиц в пылевом слое. Так, для слоя, состоящего из частиц с радиусом 5 см за линией льда и 3 см во внутренней зоне, время перемещения внешней границы слоя от 40 до 0.2 а.е. составляет 0.5 млн лет, что приблизительно в 10 раз больше индивидуального времени дрейфа отдельной частицы. Еще в большей степени коллективный эффект проявляет себя при частичном удалении газа из протопланетного диска. Время сжатия слоя почти обратно пропорционально поверхностной плотности газа в диске.

Влияние коллективного взаимодействия пылевого слоя с окружающим газом протопланетного диска, а также резкого изменения параметров пылевых агрегатов и их скоростей на линии льда на замедление радиального дрейфа частиц в слое и накопление вещества – вот основные физические эффекты, рассмотренные в работе [Макалкин, Артющкова, 2017], которые раньше не получали достаточного внимания.

Возможность накопления вещества в кольцевой зоне, примыкающей изнутри к линии льда, отмечалась и другими авторами, например, [Ida, Guillot, 2016]. Однако в работе [Макалкин, Артющкова, 2017] показано, что от соотношения размеров и плотностей пылевых агрегатов по обе стороны от линии льда, от распределения поверхностной плотности газа и начальной поверхностной плотности твердого вещества зависит локализация областей, в которых наблюдается накопление или, наоборот, дефицит твердого вещества: происходит это за линией льда, перед ней, вблизи или вдали от нее. С учетом этого результата, для того, чтобы понять, в какой области диска твердое вещество аккумулируется на самом деле, очень важно изучить процессы сублимации ледяного компонента вещества на линии льда, правильно оценить процессы фрагментации пылевых агрегатов, происходящих при испарении льда, а также их последующее повторное агрегирование в результате объединения при столкновениях с внутренней стороны линии льда. Это поможет оценить соотношение размеров агрегатов с обеих сторон линии льда, от которого так зависит положение зоны возможного накопления твердого вещества.

Конечно, построенная модель довольно схематична и значительно упрощает физическое содержание проблемы. Но мы считаем, что модели, не учитывающие коллективного взаимодействия пылевого слоя с окружающей средой протопланетного диска и вертикального

градиента орбитальной скорости газа в слое не позволяют корректно учесть обмен энергией и угловым моментом между пылевым слоем и *всем* газом диска. Такие модели сейчас преобладают в научной литературе, и это свидетельствует об актуальности выполненного нами моделирования.

Кратко сформулируем основные результаты и выводы по этому разделу:

1. Выяснилось, что при рассмотрении радиального переноса твердого вещества в диске очень важно учитывать не только сопротивление газа для каждой твердой частицы в отдельности, но и коллективное взаимодействие между пылевым слоем (содержащим газ) и окружающим газом протопланетного диска. Такое взаимодействие существенно замедляет радиальный дрейф пылевых агрегатов и может приводить к их накоплению во внутренней части диска, в зоне образования планет земной группы, необходимо для гравитационной неустойчивости пылевого слоя и образования пылевых сгущений и планетезималей.

2. Расчеты показали, что накопление твердого вещества в зоне образования планет земной группы может происходить только при очень слабой глобальной турбулентности в этой зоне протопланетного диска.

3. Накопление твердого вещества в зоне земных планет происходит не при любых, а при некоторых радиальных распределениях параметров протопланетного диска, не противоречащих наблюдениям околозвездных протопланетных дисков.

4. За линией льда, где водяной лед является существенным компонентом твердого вещества, наибольшее накопление вещества происходит в широкой области, прилегающей к линии льда с внешней стороны, т. е. в зоне формирования Юпитера.

5. С внутренней стороны от линии льда конкретная зона, где накапливается твердое вещество — в области земных планет или в области пояса астероидов — зависит от соотношения размеров пылевых агрегатов по обе стороны от линии льда, то есть до испарения льда и после него. Процесс трансформации агрегатов на линии льда требует тщательного изучения.

Для дальнейшего изучения проблемы накопления вещества в пылевом слое, необходимого для образования в нем планетезималей, в эволюционную модель следует включить рост пылевых агрегатов, расход массы слоя на образование

планетезималей, фракционное испарение на линии льда, деформацию, разрушение и повторную аккумуляцию рыхлых пылевых агрегатов, имеющих фрактальную структуру. При этом мы считаем, что необходимо сохранить важную особенность принятого подхода — учет коллективного взаимодействия слоя с протопланетным диском.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН и при частичной поддержке Программы Президиума РАН 28.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Витязев А.В., Печерникова Г.В.* Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // *Физика Земли*. 1996. № 6. С. 3–16.

*Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы. Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука. 1990. 295 с.

*Генкин И.Л., Сафронов В.С.* Неустойчивость вращающихся гравитирующих систем с радиальными возмущениями // *Астрон. журн.* 1975. Т. 52. Вып. 2. С. 306–315.

*Гуревич Л.Э., Лебединский А.И.* Об образовании планет // *Изв. АН СССР. Сер. физич.* 1950. Т. 14. № 6. С. 765–799.

*Дорофеева В.А., Макалкин А.Б.* Эволюция ранней солнечной системы. Космохимические и физические аспекты. М.: Едиториал УРСС. 2004. 288 с.

*Жарков В.Н., Козенко А.В.* О роли Юпитера в образовании планет-гигантов // *Письма в Астрон. журн.* 1990. Т. 16. С. 169–173.

*Звягина Е.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Качественное решение уравнения коагуляции с учетом дробления // *Астрон. журн.* 1973. Т. 50. С. 1261–1273.

*Зиглина И.Н.* Эксцентриситеты и наклоны орбит растущих планет // *Астрон. журн.* 1985. Т. 62. С. 141–152.

*Зиглина И.Н., Макалкин А.Б.* Гравитационная неустойчивость в пылевом слое протопланетного диска: взаимодействие твердых частиц с турбулентным газом в слое // *Астрон. вестн.* 2016. Т. 50. № 6. С. 431–449.

*Ипатов С.И.* Миграция планетезималей во время последней стадии аккумуляции планеты-гиганта // *Астрон. вестн.* 1989. Т. 23. С. 27–38.

*Колесниченко А.В., Маров М.Я.* Основы механики гетерогенных сред в околосолнечном допланетном облаке: влияние твердых частиц на турбулентность в диске // *Астрон. вестн.* 2006. Т. 40. № 1. С. 2–62.

*Кусков О.Л., Дорофеева В.А., Кронрод В.А., Макалкин А.Б.* Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников / Отв. ред. М.Я. Маров. М.: изд-во ЛКИ. 2009. 576 с.

*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.
- Макалкин А.Б., Дорофеева В.А.* Аккреционные диски вокруг Юпитера и Сатурна на стадии образования регулярных спутников // *Астрон. вестн.* 2014. Т. 48. № 1. С. 64–80.
- Макалкин А.Б., Дорофеева В.А.* Распределение температуры в околосолнечном протопланетном диске на последовательных стадиях его эволюции // *Астрон. вестн.* 2009. Т. 43. № 6. С. 528–554.
- Макалкин А.Б., Дорофеева В.А.* Строение протопланетного аккреционного диска вокруг Солнца на стадии Тельца. II. Результаты расчета моделей // *Астрон. вестн.* 1996. Т. 30. № 6. С. 496–513.
- Макалкин А.Б., Дорофеева В.А., Рускол Е.Л.* Моделирование аккреционного протоспутникового диска Юпитера: оценка основных параметров // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. № 6. С. 518–526.
- 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.
- Макалкин А.Б., Зиглина И.Н.* Образование планетезималей в транснептуновой области протопланетного диска // *Астрон. вестн.* 2004. Т. 38. № 4. С. 330–343.
- Маров М.Я., Колесниченко А.В., Макалкин А.Б., Дорофеева В.А., Зиглина И.Н., Чернов А.В.* От протосолнечного облака к планетной системе. Модель эволюции газопылевого диска. Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Ред. Галимов Э.М. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»/URSS. 2008. С. 223–274.
- Печерникова Г.В., Витязев А.В.* Эволюция эксцентриситетов орбит планет в процессе их формирования // *Астрон. журн.* 1980. Т. 57. С. 799–811.
- Печерникова Г.В., Звягина Е.В., Сафронов В.С.* Распределение допланетных тел по массам. II. Численное решение обобщенного уравнения коагуляции // *Астрон. журн.* 1976. Т. 53. С. 612.
- Печерникова Г.В., Рускол Е.Л.* Модели происхождения Луны // *Жизнь и Вселенная* / Ред. В.Н. Обридко, М.В. Рагульская. М.: изд-во ВВМ. 2017. С. 117–127.
- Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука. 1975. 188 с.
- Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука. 1969. 244 с.
- Шмидт О.Ю.* Четыре лекции о теории происхождения Земли. Изд. Третье (дополненное) М.: изд-во АН СССР. 1957. 140 с.
- Шмидт О.Ю.* Астрономический возраст Земли // *Докл. АН СССР.* 1945. Т. 46. № 9. С. 392–395.
- Шмидт О.Ю.* Возникновение планет и их спутников // *Изв. АН СССР. Сер. физич.* 1950. Т. 14. № 1. С. 29–45.
- Шмидт О.Ю.* Метеоритная теория происхождения Земли и планет // *Докл. АН СССР.* 1944. Т. 45. № 6. С. 245–249.
- Шмидт О.Ю.* О законе планетных расстояний // *Докл. АН СССР.* 1946. Т. 52. № 8. С. 673–678.
- Bai X.-N., Stone J.* Dynamics of solids in the midplane of protoplanetary disks: Implications for planetesimal formation // *Astrophys. J.* 2010. V. 722. P. 1437–1459.
- Bai X.-N., Stone J.M.* Wind-driven accretion in protoplanetary disks. I. Suppression of the magnetorotational instability and launching of the magnetocentrifugal wind // *Astrophys. J.* 2013. V. 769, article id. 76.
- Bai X.-N., Ye J., Goodman J., Yuan F.* Magneto-thermal disk winds from protoplanetary disks // *Astrophys. J.* 2016. V. 818, Is. 2. Article id. 152. 20 p.
- Blum J.* Dust evolution in protoplanetary discs and the formation of planetesimals. What have we learned from laboratory experiments? // *Space Science Reviews.* 2018. V. 214. Is. 2. Article id. 52. 19 p.
- Carrera D., Johansen A., Davies M.B.* How to form planetesimals from mm-sized chondrules and chondrule aggregates // *Astronomy and Astrophysics.* 2015. V. 579. Article id. A43. 20 p.
- Coradini A., Federico C., Magni C.* Formation of planetesimals in an evolving protoplanetary disk // *Astron. and Astrophys.* 1981. V. 98. P. 173–185.
- Cuzzi J.N., Dobrovolskis A.R., Champney J.M.* Particle-gas dynamics in the midplane of a protoplanetary nebula // *Icarus.* 1993. V. 106. P. 102–134.
- Drażkowska J., Aliber Y., Moore B.* Close-in planetesimal formation by pile-up of drifting pebbles // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 594. Article id. A105, 12 p.
- Edgeworth K.E.* The origin and evolution of the solar system // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1949. V. 109. P. 600–610.
- Goldreich P., Ward W.R.* The formation of planetesimals // *Astrophys. J.* 1973. V. 183. P. 1051–1061.
- Goodman J., Pindor B.* Secular instability and planetesimal formation in the dust layer // *Icarus.* 2000. V. 148. P. 537–549.
- 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.
- Johansen A., Blum J., Tanaka H., Ormel C., Bizzarro M., Rickman H.* The multifaceted planetesimal formation process // *Protostars and Planets VI* / Eds Beuther H., Klessen R.S., Dullemond C.P., Henning T. Tucson: Univ. Arizona Press. 2014. P. 547–570.
- Johansen A., Youdin A.N., Lithwick Y.* Adding particle collisions to the formation of asteroids and Kuiper belt objects via streaming instabilities // *Astron. and Astrophys.* 2012. V. 537. Article id. A125. 17 p.
- Kataoka A., Tanaka H., Okuzumi S., Wada K.* Fluffy dust forms icy planetesimals by static compression. *Astron. Astrophys.* 2013. V. 557. Article id. 4 p.
- Kruijer T.S., Kleine T., Fischer-Godde M., Sprung P.* Lunar tungsten isotopic evidence for the late veneer // *Nature.* 2015. V. 520. P. 534–537.
- Lissauer J., Safronov V.S.* The random component of planetary rotation // *Icarus.* 1991. V. 93. P. 288–297.

- Lodders K.* Solar System abundances and condensation temperatures of the elements // *Astrophys. J.* 2003. V. 591. P. 1220–1247.
- Makalkin A.B.* Possibility of formation of an initially inhomogeneous Earth // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1980. V. 22. P. 302–312.
- Michikoshi, S., Kokubo, E.* Dynamics of porous dust aggregates and gravitational instability of their disk // *Astrophys. J.* 2017. V. 842. Article id. 61. 15 p.
- Morbidelli A., Raymond S.N.* Challenges in planet formation // *J. of Geophys. Res. : Planets.* 2016. V. 121. Is. P. 1962–1980.
- Ogilvie G. I., Lubow S.H.* On the wake generated by a planet in a disc // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 2002. V. 330. P. 950–954.
- Rafikov R.R.* Runaway accretion of metals from compact discs of debris on to white dwarfs // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2011. V. 416. P. L55–L59.
- Rufu R., Aharonson O., Perets H.G.* A multiple-impact origin for the Moon // *Nature Geoscience.* 2017. V. 10. P. 89–94.
- Safronov V.S., Pechernikova G.V., Ruskol E.L., Vityazev A.V.* Protosatellite swarms // *Satellites / Eds Burns J.A., Matthews M.S.* Tucson: Univ. of Arizona Press. 1986. P. 89–116.
- Safronov V.S.* Kuiper prize lecture: Some problems in the formation of the planets // *Icarus.* 1991. V. 94. P. 260–271.
- Shariff K., Cuzzi J.* Gravitational instability of solids assisted by gas drag: Slowing by turbulent mass diffusivity // *Astrophys. J.* 2011. V. 738. Iss. 1. Article id. 73. 9 p.
- Takahashi S.Z., Inutsuka S.* Two-component secular gravitational instability in a protoplanetary disk: A possible mechanism for creating ring-like structures // *Astrophys. J.* 2014. V. 794. Iss. 1. Article id. 55. 7 p.
- Takeuchi T., Muto T., Okuzumi S., Ishitsu N., Ida S.* Induced turbulence and the density structure of the dust layer in a protoplanetary disk // *Astrophys. J.* 2012. V. 744. Article id. 101. 16 p.
- Toomre A.* On the gravitational stability of a disk of stars // *Astrophys. J.* 1964. V. 139. P. 1217–1238.
- Ward W.R.* Protoplanet migration by nebula tides // *Icarus.* 1997. V. 126. P. 261–281.
- Weidenschilling S.J.* Evolution of grains in a turbulent solar nebula // *Icarus.* 1984. V. 60. P. 555–567.
- Williams J., Cieza L.* Protoplanetary disks and their evolution // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 2011. V. 49. Is. 1. P. 67–117.
- 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., Chiang E.I.* Particle pileups and planetesimal formation // *Astrophys. J.* 2004. V. 601. P. 1109–1119.
- Youdin A.N., Shu F.H.* Planetesimal formation by gravitational instability // *Astrophys. J.* 2002. V. 580. P. 494–505.
- Youdin A.N., Goodman J.* Streaming instabilities in protoplanetary disks // *Astrophys. J.* 2005. V. 620. P. 459–469.
- Zharkov V.N.* The role of Jupiter in the formation of planets. *Geophys. Monograph.* 74. Amer. Geophys. Union. IUGG. 1993. V. 14. P. 7–17.

## Topical Problems in the Theory of Planet Formation: Formation of Planetesimals

A. B. Makalkin\* I. N. Ziglina, and M. E. Artyushkova

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

*\*E-mail: makalkin@ifz.ru*

Received June 18, 2018

The development of the Earth's and planets formation theory over 70 years is considered with a special focus on the history of development of this theory at the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS) where this direction of research was founded by Otto Schmidt. The state of the art of the theory is outlined. In particular, the planetesimals formation problem currently belonging to the key unsolved issues in the theory of planet formation is discussed. Recent results of the studies aimed at solving this problem at IPE RAS are presented.

*Keywords:* Earth's formation, planet formation, protoplanetary disc, planetesimals