

НАСА и ЕКА за поддержку этой замечательной миссии и всех сотрудников и сотрудниц, добившихся такого выдающегося успеха.

## Список литературы

1. Comas Sola J *Astron. Nachr.* **179** 289 (1908)
2. Kuiper G P *Astrophys. J.* **100** 378 (1944)
3. Strobel D F *Planet. Space Sci.* **30** 839 (1982)
4. Yung, Y L, Allen M, Pinto J P *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **55** 465 (1984)
5. Lunine J I, Stevenson D J, Yung Y L *Science* **222** 1229 (1983)
6. Muhleman D O et al. *Science* **248** 975 (1990)
7. Griffith C A, Owen T, Wagner R *Icarus* **93** 362 (1991)
8. Lemmon M T, Karkoschka E, Tomasko M *Icarus* **103** 329 (1993)
9. Smith P H et al. *Icarus* **119** 336 (1996)
10. Meier R et al. *Icarus* **145** 462 (2000)
11. Wilson E H, Atreya S K *J. Geophys. Res.* **109** (EG) E06002 (2004)
12. Hersant F, Gautier D, Lunine J I *Planet. Space Sci.* **52** 623 (2004)
13. Owen T, Gautier D *Space Sci. Rev.* **104** 347 (2002)
14. Atreya S K, Donahue T M, Kuhn W R *Science* **201** 611 (1978)
15. Samuelson R E et al. *Nature* **292** 688 (1981)
16. Waite J H et al. *Science* (2005) (in press)
17. Owen T *Planet. Space Sci.* **30** 833 (1982)
18. McKinnon W, частное сообщение от Waite J H et al. (2005)
19. Owen T et al. *Astrophys. J.* **553** L77 (2001)
20. Coustenis A et al. *Astron. Astrophys.* **336** L85 (1998)

PACS numbers: 96.30.Ys, 96.35.Cp, 96.50.Gn

## Малые тела солнечной системы и некоторые проблемы космогонии

М.Я. Маров

### 1. Введение

Солнечная система является нашим ближайшим космическим окружением, поэтому ее изучение вызывает первостепенный научный и практический интерес. За несколько "космических" десятилетий в исследованиях солнечной системы достигнут огромный прогресс, и ламина открытий продолжает нарастать. Телевизионная и радиолокационная съемка планет и их спутников, наблюдения особенностей поверхностей и атмосфер в различных диапазонах длин волн, изучение свойств околопланетного пространства, исследования комет, астероидов и метеорного вещества дали богатейший экспериментальный материал, что привело к пересмотру многих прежних представлений. Этому в немалой степени способствовала разработка значительно более совершенных моделей природных явлений с использованием современных вычислительных комплексов. Мощное развитие получила механика космических сред. Открылись новые возможности в изучении всего семейства небесных тел исходя из концепции сравнительной планетологии. Комплексное изучение планет земной группы, в первую очередь, Венеры и Марса как предельных эволюционных моделей Земли во взаимосвязи с динамикой процессов во всей солнечной системе заложило необходимые основы для углубленного понимания особенностей как нашей планеты, так и разнообразных природных механизмов [1].

В последние годы на более строгую научную основу поставлена планетная космогония, впечатляющие успехи которой достигнуты благодаря открытиям протопланетных дисков планет и планетных систем других звезд.

Дальнейшим важным шагом на этом пути должно стать прямое изучение внеземного вещества, прежде всего, первичного вещества малых небесных тел, с доставкой его на Землю, и на решение этой задачи уже в ближайшем будущем нацелено создание новых высокоэффективных космических средств.

Достижения в исследованиях солнечной системы заставили по-новому взглянуть на многие проблемы, остающиеся нерешенными. К числу первоочередных относятся проблемы:

1) происхождения солнечной системы и ее эволюции на ранних этапах;

2) установления причин уникальности солнечной системы с учетом изучения особенностей формирования планетных систем других звезд;

3) исследования особенностей эволюционного пути Земли, выделившего ее среди остальных планет земной группы;

4) происхождения летучих элементов на планетах земной группы, сделавших возможным формирование атмосферы, гидросферы и, в конечном итоге, создание благоприятных климатических условий для возникновения и развития земной биосферы.

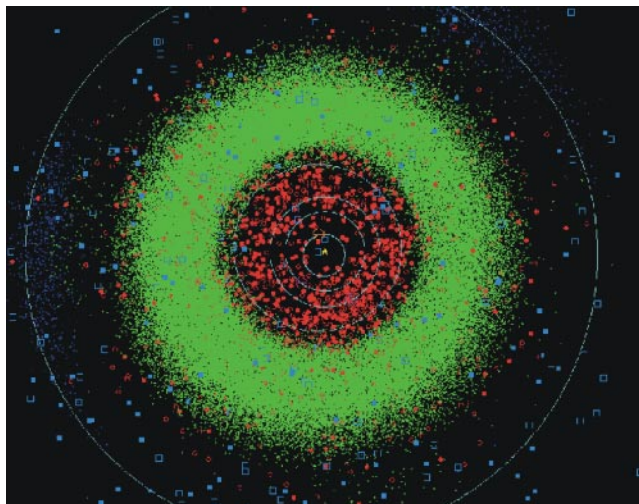
Очевидно, с проблемой происхождения жизни, остающейся дискуссионной, связаны наиболее актуальные направления в изучении природы планет, их спутников и малых тел, включая вопросы транспорта (миграции) вещества в солнечной системе и его пребиотической эволюции. Первостепенный интерес в этом отношении представляют собой Марс, спутник Юпитера Европа и спутник Сатурна Титан, на который в январе 2005 г. произведена успешная посадка космического аппарата в рамках совместного американо-европейского проекта "Кассини-Гюйгенс".

### 2. Малые тела.

#### Определения и основные характеристики

К малым телам солнечной системы относятся астероиды (малые планеты), кометы, метеороиды и межпланетная пыль. Астероид — это небесное тело нерегулярной формы размером от  $\sim 1000$  км до нескольких метров. Их основное местонахождение — Главный пояс астероидов между орбитами Марса и Юпитера, в пределах от 2,2 до 3,3 а.е. Кометы представляют собой ледяные тела поперечником  $\sim 10-20$  км, обычно находящиеся на высокоэллиптических орбитах и периодически сближающиеся с Солнцем, если речь идет о короткопериодических кометах, находящихся в пределах орбиты Плутона. Между тем основные семейства комет, среди которых есть и гораздо более крупные ледяные тела, находятся за орбитой Нептуна в поясе Эджеворта – Койпера, в котором выделяют сам пояс ( $\sim 30-50$  а.е.) и рассеянный диск, простирающийся до  $\sim 10^3$  а.е., и в облаке Оорта на границе солнечной системы ( $\sim 10^4-10^5$  а.е.), откуда лишь немногие тела заходят в ее внутренние области и тогда наблюдаются как долгопериодические кометы.

Каменные тела значительно меньших размеров, представляющие собой фрагменты многочисленных процессов столкновений астероидов, относят к метеороидам. Это, как правило, куски твердой породы размером от нескольких метров до нескольких сантиметров, находящиеся на самых разнообразных орбитах в межпланетной среде. При входе в атмосферу Земли и



**Рис. 1.** Расположение астероидов в солнечной системе. Основное семейство находится в пределах Главного пояса между орбитами Марса и Юпитера (орбиты планет показаны тонкими линиями, астероиды — точками). Во внутренней области сосредоточены астероиды, сближающиеся с Землей (NEO), — группы Амур, Аполлон, Атон.

торможении они наблюдаются в виде световой вспышки (метеора), а их несгоревшие фрагменты, выпадающие на земную поверхность, известны как метеориты. Наконец, наиболее мелкие частицы размером менее  $\sim 1$  мм составляют еще одну характерную категорию малых тел — межпланетную пыль. Они во множестве образуются при последовательных дроблениях астероидов и метеороидов, а также являются продуктами выброса из кометных ядер, проявляющих активность под действием инсоляции при сближении с Солнцем.

Области, занимаемые астероидами во внутренней части солнечной системы, показаны на рис. 1. Суммарное число астероидов в Главном поясе, имеющих размеры более 1 км, оценивается величиной  $\sim 10^5$ . Из них к настоящему времени обнаружено приблизительно 50000, из которых только около 25% занесено в каталоги, поскольку последнее связано с необходимостью аккуратного определения орбиты при повторных наблюдениях. Вместе с тем общая масса астероидов Главного пояса составляет лишь около 1/2000 массы Земли. Многочисленные результаты наземных наблюдений выявили существенные различия в отражательных (альbedo), спектральных и цветовых характеристиках астероидов, на которые решающее влияние оказывает положение астероидов внутри пояса. В соответствии с этими свойствами астероиды подразделяют на 18 классов, из которых наиболее известными являются классы С, S и М. По своему минералогическому составу астероиды, относящиеся к перечисленным классам, ближе всего соответственно к каменным, железо-каменным и железным (металлическим) метеоритам. Природа последних, очевидно, связана с тем, что самые крупные тела испытали частичную дифференциацию недр вследствие удержания в своем составе радиогенных изотопов, что, как и в больших планетах, привело к выделению силикатной мантии и железного ядра [1]. При последующей фрагментации этих тел в результате соударений образовались соответственно каменные и металлические астероиды. Они в основном занимают внутренние обла-

сти Главного пояса, т.е. располагаются ближе к Солнцу. В свою очередь, наиболее примитивные углистые хондриты, практически не претерпевшие эволюции и сохранившие свой изначальный состав, по-видимому, близкий к составу вещества протопланетного диска, находятся в его внешних областях, ближе к орбите Юпитера. Здесь помимо класса С дополнительно выделяют классы Q, K, P, D и Z с преобладающим содержанием глинистых минералов, угля и органики [2]. Такое различие в композиционных классах хорошо согласуется с представлениями конденсационной модели, согласно которой последовательная конденсация в протопланетном диске высоко- и низкотемпературных элементов и соединений происходила в зависимости от расстояния от Солнца.

С начала 1990-х годов были получены первые телевизионные изображения астероидов с пролетающих вблизи них космических аппаратов, которые наглядно продемонстрировали, что вследствие многочисленных соударений поверхности астероидов сильно кратерированы. У некоторых астероидов есть спутники, что, по-видимому, является следствием захвата отделившегося в результате соударений фрагмента даже при наличии слабого гравитационного поля у сравнительно небольшого тела [3].

Заметим, что, как показывают простые оценки, сильные приливные возмущения Юпитера, воздействующие на тела в зоне расположения астероидов Главного пояса, препятствуют их объединению, другими словами, образованию планеты. Наряду с различием композиционных классов и сравнительно малой суммарной массой астероидов это обстоятельство противоречит высказывавшимся предположениям о существовании древней планеты Фэтон и о том, что тела Главного пояса являются ее остатками. О сильном приливном воздействии Юпитера свидетельствует наличие здесь орбитальных резонансов (люков Кирквуда), кратных периоду обращения этой самой крупной планеты солнечной системы вокруг Солнца: в пределах этих зон нет астероидов с периодами соответствующей кратности (2:1; 3:1; 5:2 и др.). Что касается параметров орбит астероидов, то они лежат в довольно широких пределах, достигая значений эксцентриситетов  $\leq 0,3$  и наклонов  $\leq 20^\circ$ , а их периоды собственного вращения составляют величины от нескольких единиц до нескольких десятков часов.

Отдельно выделяют три группы астероидов, сближающихся с Землей или даже регулярно пересекающих ее орбиту, получивших название NEO (Near Earth Objects). Это Амур — группа астероидов, пересекающих орбиту Марса, приближающихся к орбите Земли и эволюционирующих в NEO за 100–1000 лет; Аполлон — группа астероидов, пересекающих орбиту Земли, и Атон — группа астероидов, заходящих внутрь орбиты Земли (см. рис. 1). Очевидно, что с точки зрения столкновения с Землей наибольшую опасность представляет группа Аполлон, хотя, как уже говорилось, модельные расчеты показывают, что происходит эволюция орбит астероидов разных групп. Легко видеть, что наша планета находится внутри огромного роя тел различных размеров, среди которых только астероидов размером более 1 км, согласно имеющимся оценкам, свыше 1500, хотя орбиты определены только приблизительно у двух третей из них [4]. Добавим к этому, что в астероиды NEO проявляют довольно высокую хаотичность своих орбит, что существенно затрудняет прогноз их движений.

Начиная с конца 1980-х годов, были получены высококачественные радиолокационные изображения ряда астероидов NEO размером в несколько километров. На этих изображениях видны тела сильно нерегулярной формы, что обусловлено их незначительной собственной гравитацией. В феврале 2001 г. была осуществлена первая посадка космического аппарата NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous) на один из крупных ( $33 \times 13 \times 13$  км) астероидов группы Амур–Эрос. Поверхность астероида несет на себе следы интенсивной ударной бомбардировки в виде многочисленных кратеров поперечником от нескольких метров до нескольких километров, зачастую с признаками эрозии и наличием слоя реголита. Поверхность буквально усеяна каменными блоками, размеры которых достигают нескольких десятков метров, а общее количество оценивается в несколько тысяч. Совершенно очевидно, что они образовались в результате выбросов при ударе астероидов (метеороидов) и последующем осадении на поверхность Эроса.

Размеры некоторых крупных кратеров на поверхности астероидов, зачастую сопоставимые с их размерами, свидетельствуют о том, что энергии удара было бы достаточно для разрушения консолидированного твердого тела. То, что этого не случилось, говорит о весьма неоднородной или пористой структуре, с чем согласуется значение средней плотности, которое у большинства астероидов находится в пределах от  $1,2 \text{ г см}^{-3}$  (класс C) до  $2,5 \text{ г см}^{-3}$  (класс S). К этому следует добавить, что была найдена четкая зависимость периода собственного вращения астероида от размера: оказалось, что у всех исследованных астероидов размером более 200 м период вращения составляет не менее 2,2 ч. Данное пороговое значение отвечает предельной скорости вращения, при которой немонолитное тело разрушается за счет центробежных сил. Все это дает основание предположить, что структура большинства тел размером более 200 м представляет собой конгломерат более мелких тел ("осколков"), образовавшихся вследствие высокоэнергетичных столкновений (см., например, [5]). В результате тела, приобретшие скорость убегания, покинули материнское тело, а обладающие меньшей скоростью, под действием взаимного притяжения, вновь образовали единое тело, хотя и не монолитное и, вероятно, обладающее промежутками или нишами (voids). Заметим, что в пользу такой структуры говорит и катастрофическое событие, наблюдавшееся летом 1994 г., когда ядро кометы Шумейкера–Леви 9, ранее захваченное на близкую к Юпитеру орбиту, было разорвано его мощными приливными силами на двадцать с лишним фрагментов, которые последовательно выпадали на планету, что сопровождалось огромным энерговыделением.

Обратимся теперь к рассмотрению физической природы и моделей комет. Среди малых тел кометы занимают особое место, прежде всего, как "хранилища" первичного вещества и, следовательно, как носители потенциально важной информации о самом начальном периоде формирования солнечной системы (рис. 2). Кометы можно ассоциировать с планетезималиями, выброшенными вследствие приливных возмущений из областей рождения планет юпитерианской группы на периферию солнечной системы, где образовались упоминавшиеся ранее пояс Эджеворта–Койпера и облако Оорта. В поясе Эджеворта–Койпера, имеющем форму



Рис. 2. Ледяной спутник Сатурна Феба размером  $\sim 230$  км, соответствующий по структуре поверхности и значению средней плотности кометному ядру, по-видимому, захваченному Сатурном (снимок КА "Кассини").

диска за орбитой Нептуна, находится, по оценкам,  $\sim 10^5$  тел ("ледяных карликов") размером 10–500 км и  $\sim 10^9$  комет размером около 20 км [6, 7] и суммарной массой  $\sim 0,1 M_E$ , где  $M_E$  — масса Земли. Плутон со спутником Хароном являются членами этого семейства наряду с другими недавно открытыми телами сопоставимых размеров (Кваорар и Седна), так что Плутон исторически сохраняет название планеты достаточно условно. Однако основное семейство комет ( $\sim 10^{12} - 10^{13}$ ) находится в облаке Оорта сферической формы на периферии солнечной системы, причем их суммарная масса не превышает  $(1-3) \times M_E$ . Надо заметить, что четкой границы между астероидами и короткопериодическими кометами нет: при многократных сближениях с Солнцем некоторые из комет покрываются толстой пылевой коркой, препятствующей сублимации льда, и перестают проявлять признаки кометной активности. Иногда наблюдается и обратный процесс: у астероида вдруг образуется атмосфера, что, по-видимому, объясняется растрескиванием или сбросом корки у тела, когда-то бывшего кометой, при его интенсивном прогреве.

Изучение структуры и свойств комет и их миграции во внутренние области солнечной системы представляет собой первостепенный интерес для планетной космогонии. Кроме того, по разнообразию и сложности физических процессов, сопровождающих эволюцию этих тел на различных гелиоцентрических расстояниях, кометы являются исключительно интересными объектами для математического моделирования с использованием методов механики сплошной среды и разреженного газа [8]. Первостепенное значение имеет изучение структуры пористого кометного ядра и процессов теплопереноса в нем, с чем связаны особенности образующегося у поверхности кнудсеновского слоя, сублимация ледяного конгломерата различного химического состава и формирование газопылевой комы. С этой целью нами был предложен и успешно применен в конкретных разработках модифицированный метод стохастического моделирования (физико-вероятностного аналога исходного кинетического явления и пространственно однородной эволюции состояния газа в марковской форме), обес-

печивающий моделирование таких сред и численное решение соответствующих модельных задач [9, 10]. Развитые эффективные методы решения таких систем, основой которых служат аналоговые алгоритмы Монте-Карло, позволили разработать класс структурных стохастических моделей для релаксационных систем со сложной структурой кинетических масштабов, определяющих локальную кинетику процессов, которые использовались, в частности, при осуществлении космического проекта "Вега".

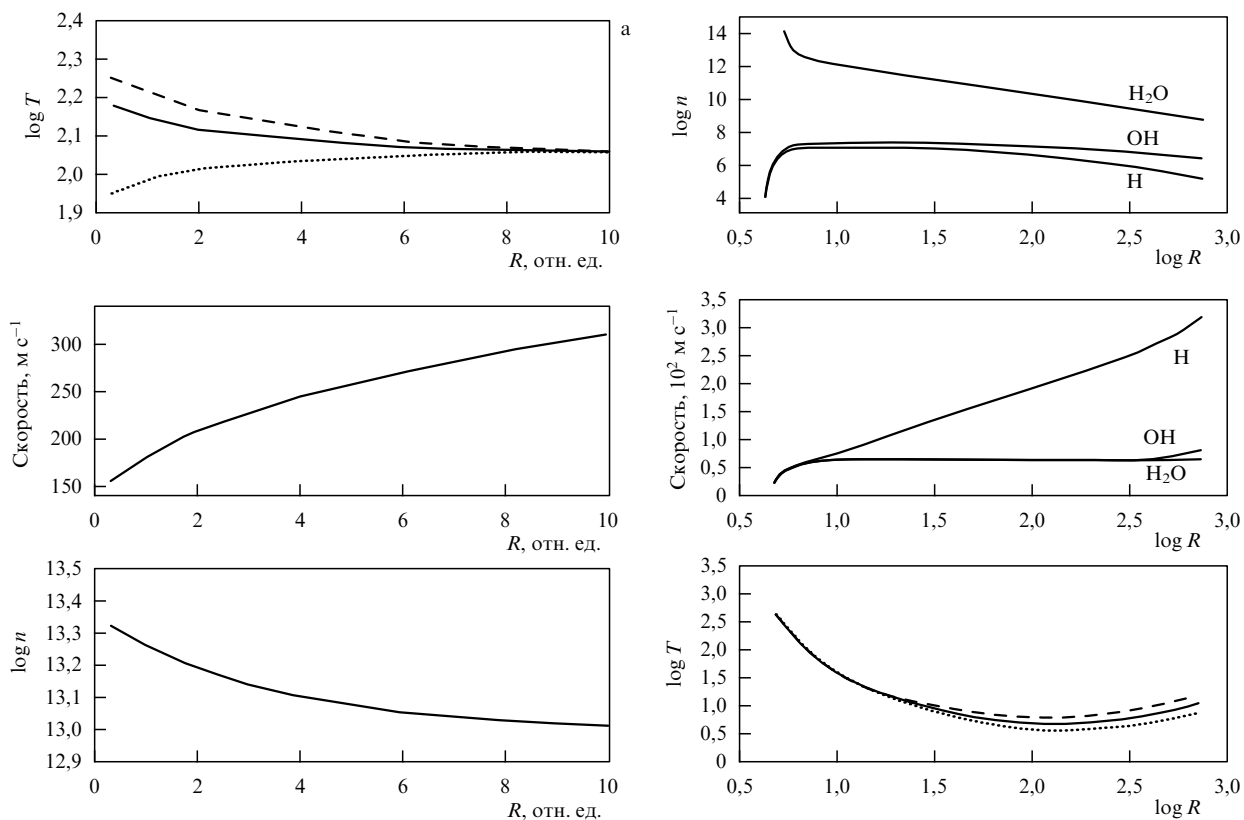
Созданные модели включают в себя кинетику процессов переноса в гетерогенных средах, анализ фазовых переходов и изучение эволюции сублимирующего многокомпонентного газа при различных условиях инсоляции. В качестве примера на рис. 3а показаны профили температуры, плотности и скорости сублимирующих частиц с поверхности ледяного ядра в пределах приблизительно десяти длин свободного пробега внутри кнудсеновского слоя, на внешней границе которого достигается скорость звука. Структура этого слоя достаточно сложна (о чем свидетельствует, в частности, температурное расслоение частиц и наличие их обратного потока на поверхность ядра), и его моделирование требует привлечения кинетических методов. С использованием аналогичного подхода рассчитаны показанные на рис. 3б профили потоков нейтральных атомов и молекул (вода, водород, гидроксил) во внутренней коме кометы Галлея на расстоянии нескольких тысяч километров от ядра [10]. Аналогичные расчеты проведены для ионизованных компонент. Методы стохастического моделирования успешно развиваются нами с использованием высокоэф-

фективных параллельных алгоритмов, что обеспечивает повышение надежности истолкования экспериментальных данных, получаемых при наземных наблюдениях и космических полетах к кометам.

### 3. Миграционно-столкновительные процессы и гетерогенная аккреция

Миграция малых тел отражает динамику регулярных и хаотических процессов в солнечной системе. Одним из следствий миграции являются столкновения комет и астероидов с планетами. Они приводят к катастрофическим событиям и транспорту вещества, что имеет важнейшее значение для эволюции планет и их атмосфер.

Исходя из современных представлений летучие элементы не могли быть удержаны в зоне формирования планет земной группы вследствие высокой температуры в этой части протопланетного диска ( $\sim 1000$  K), а также выметания первичных атмосфер солнечным ветром молодого Солнца. Относительно высокое, тем не менее, содержание летучих на этих планетах можно объяснить действием механизма гетерогенной аккреции, обусловленного их интенсивной бомбардировкой кометами и астероидами из внешних областей солнечной системы на ранней стадии эволюции. Исследование орбитальной динамики малых тел (комет, астероидов Главного пояса и тел из пояса Эджеворта – Койпера) позволяет получить количественные оценки эффективности их миграции в зону планет земной группы и тем самым найти аргументы в пользу данного механизма. Ограничение на



**Рис. 3.** Результаты моделирования сублимации газа и пыли с поверхности ядра и формирования комы. Радиальные профили: (а) макропараметров в кнудсеновском слое, (б) макропараметров нейтрального газа в газовой оболочке кометы Галлея на расстоянии 1 а.е.  $R$  — радиальное расстояние (единица измерения на рис. а — отн. ед., на рис. б — 1 км),  $n$  — плотность [ $cm^{-3}$ ],  $T$  — температура [K].

относительный вклад ледяных комет и астеродов типа углистых хондритов в доставку воды и других атмосферных элементов на эти планеты накладывают результаты изучения содержания инертных газов и изотопного состава в их атмосферах [11]. Моделирование миграции малых тел непосредственно связано также с анализом роли столкновительных процессов в солнечной системе и оценками эффективности переходов астероидов на орбиты, пересекающиеся с орбитой Земли, что вносит вклад в изучение актуальной проблемы астероидной опасности [12].

В рамках задачи  $N$ -тел нами [13–15] проводилось прямое интегрирование миграции  $2 \times 10^4$  тел из занептунового пояса, перешедших на орбиты, которые пересекаются с орбитой Юпитера (JCOs), и частично мигрирующих внутрь солнечной системы. Было показано, что средняя вероятность их столкновений с Землей составляет  $P = 6,65 \times 10^{-6}$ ; это означает, что объект диаметром  $\sim 1$  км может соударяться один раз за  $\sim 10^6$  лет. Для Венеры вероятность оказалась примерно такой же, а для Марса втрое меньшей, при этом в среднем 1 из 300 JCOs выпадает на Солнце. На рисунке 4 приведены примеры расчетов миграции JCOs, первоначально находящихся на виртуальных орбитах, параметры которых соответствуют параметрам орбит комет семейства Юпитера, в виде графиков временных вариаций их перигелийного расстояния  $q$ , афелийного расстояния  $Q$ , большой полуоси  $a$  и эксцентриситета  $e$ , наглядно иллюстрирующие весьма сложный характер эволюции при миграции во внутренние области солнечной системы. Одновременно было установлено, что доля NEOs, мигрирующих к Земле из области 5:2 резонанса Главного пояса, в 4 раза больше, чем из области 3:1 резонанса.

Миграция планетезималей и их остатков (комет, астероидов) из занептунового пояса рассматривается нами в качестве эффективного механизма поставки летучих из внешних во внутренние области солнечной системы и компенсации изначального дефицита летучих на планетах земной группы при весьма вероятной потере ими первичной атмосферы, захваченной из протопланетного облака на стадии аккумуляции планеты. Убедительным свидетельством такой потери служит тот факт,

что содержание и изотопный состав инертных газов в существующих атмосферах вторичного происхождения резко отличается от солнечного [16]. Несомненно, что дегазация из недр в процессе последующей эволюции, сопровождавшей дифференциацию планеты на оболочки, внесла значительный вклад в формирование гидросферы и атмосферы вторичного происхождения. Был ли, однако, такой источник единственным и достаточным, чтобы компенсировать потерю низкотемпературных летучих (вода, азот, углерод, сера и др.) в зоне формирования планет земной группы за счет механизма джинсовской диссипации? К тому же наряду с высокой температурой малая масса этих планет также способствовала убоганию в космос наиболее легких атмосферных элементов. Так или иначе предположение о дополнительном источнике летучих при наличии начального температурного фракционирования элементов и соединений в рамках конденсационной модели вносит значительный вклад в решение проблемы генезиса планетных атмосфер.

К сожалению, относительный вклад в образование вторичной атмосферы процессов дегазации недр (эндогенный механизм) и доставки летучих за счет миграции комет (астероидов) и их выпадения на планеты земной группы (экзогенный механизм) оценить трудно. Тем не менее малые тела могли обеспечить приток летучих, по крайней мере, сопоставимый с поступающим от эндогенного источника в процессе гетерогенной аккреции, т.е. после завершения основной фазы образования планеты. Наша модель миграции занептуновых тел в область расположения планет земной группы привела к оценке суммарной массы тел, выпавших на Землю за счет гетерогенной аккреции,  $6 \times 10^{-4} M_E$ . Допуская, что водяной лед составлял примерно половину этого количества, находим, что общая масса летучих, доставленная из зоны питания планет-гигантов, составила  $\sim 2 \times 10^{24}$  г, что в 1,5 раза больше содержания воды в земных океанах ( $\sim 1,4 \times 10^{24}$  г) [17]. Заметим, что пик процесса гетерогенной аккреции пришелся на период времени  $\sim 4$  млрд лет назад, который относят к этапу максимальной бомбардировки планет. Последнее подтверждается анализом числа и возраста кратеров на их поверхности.

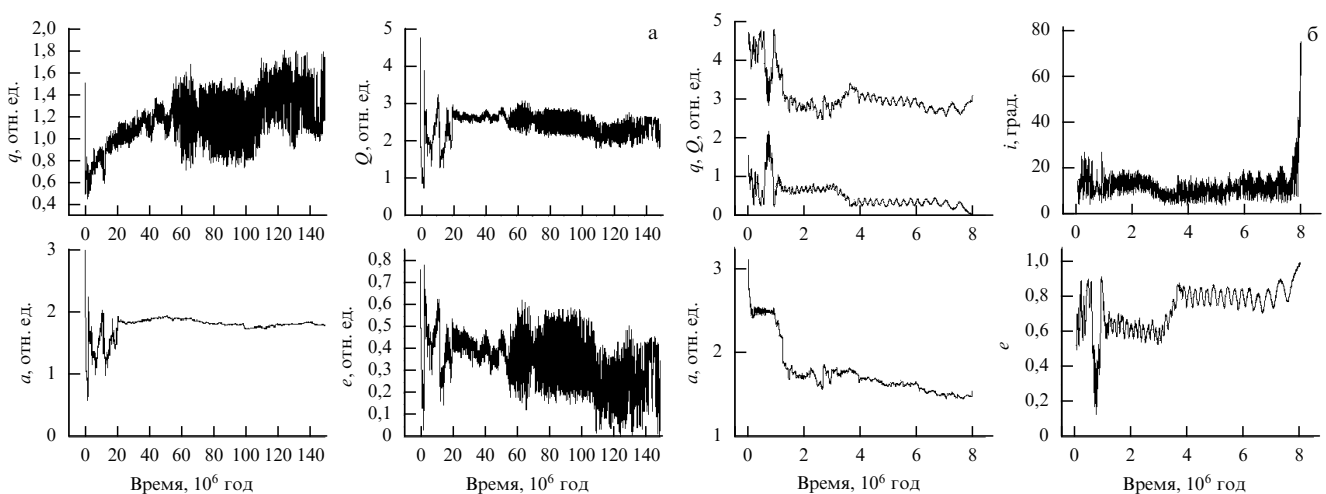


Рис. 4. Примеры расчетов миграции тел занептунового пояса, захваченных на орбиты JCO. Вариации перигелийного  $q$  и афелийного  $Q$  расстояний, большой полуоси  $a$ , наклона  $i$  и эксцентриситета  $e$  в зависимости от времени для виртуальных JCOs, находящихся на орбитах типа орбит комет семейства Юпитера 9P Tempel 1 (а) и 10P (б).

Выпавшая в последующий период масса летучих составила менее 0,1 %.

Как видим, гетерогенная аккреция могла сыграть ключевую роль в образовании гидросферы и атмосферы Земли и других планет. Миграционно-столкновительная модель приводит к оценке, что Венера получила немного меньше, а Марс несколько больше экзогенной воды, чем Земля (в расчете на единицу массы планеты). Это позволяет нам сделать важный вывод о наличии древних океанов на Венере и Марсе и подкрепить представления о различных путях последующей эволюции этих соседних с Землей планет. Согласно этим представлениям первоначальная венерианская гидросфера была потеряна вследствие развившегося необратимого парникового эффекта, в то время как марсианская гидросфера сохранилась в виде криосферы после коллапса атмосферы [1, 18]. К этому нужно добавить, что межпланетный перенос вещества с периферии солнечной системы кометами, состоящими почти целиком из летучих, мог быть также ответственным за приток на планеты органического и даже биогенного вещества и тем самым мог оказать заметное влияние на возникновение и эволюцию жизни на Земле. Еще больший вклад в этот процесс могло внести выпадение на планеты межпланетной пыли. Дело в том, что, хотя на планеты ее выпадает примерно на три порядка меньше, чем на малые тела [19, 20], она подвержена существенно меньшему кратковременному нагреву при входе в атмосферу вследствие интенсивного теплоотвода за счет высокого отношения площади поверхности к массе частицы. Поэтому температура частицы не превышает  $\sim 100\text{--}150^\circ\text{C}$  и, как показали лабораторные эксперименты, вероятность выживания бактерий или спор в этих условиях за время экспозиции порядка нескольких секунд достаточно высока [21]. В результате такой источник поступления на планету биоорганического вещества мог оказаться довольно эффективным.

#### 4. Некоторые проблемы космогонии

Исследование природы малых тел, сохранивших в своем составе вещество, претерпевшее наименьшие изменения в процессе эволюции, представляет собой первостепенный интерес для решения фундаментальной проблемы происхождения солнечной системы.

Основополагающие проблемы космогонии непосредственно связаны с зарождением и эволюцией протопланетной туманности, из которой, по современным представлениям, формируются планеты после коллапса центрального сгущения, в процессе аккреции газопылевого вещества к средней плоскости и образования протопланетного диска. Теория аккреционных дисков у молодых звезд имеет много общих черт с аккреционными дисками у двойных звезд, формирующимися за счет перетекания вещества на соседний массивный компакт. И в том, и в другом случае речь идет о турбулентной многокомпонентной газопылевой среде, для которой, вообще говоря, характерны кинетические процессы, т.е. разнообразные химические превращения. С учетом новых астрофизических данных расширяются возможности комплексных исследований физической структуры и эволюции газопылевого протопланетного диска вокруг молодого Солнца и многих десятков аналогичных дисков, наблюдаемых вокруг молодых звезд с малой массой (звезд Т-Тельца)

на основе разработки более строгих теоретических подходов и численного моделирования. Не меньшую роль здесь играет совокупность современных данных о планетах, кометах и астероидах, полученных с помощью космических аппаратов и лабораторных исследований метеоритов.

В отличие от предыдущих десятилетий, наблюдательные данные о протопланетных дисках у многочисленных звезд и открытие внесолнечных планет, наряду с данными о составе и свойствах тел солнечной системы, накладывают существенные ограничения на разрабатываемые современные космогонические модели. Стало очевидным, что рождение звезд, как правило, сопровождается формированием протопланетных дисков из газопылевого материала. Диски, сопоставимые по размерам с солнечной системой, обнаружены у ближайших звезд; кроме того, на сегодняшний день открыто свыше 130 внесолнечных планет с массой в пределах примерно от 0,3 до 15 масс Юпитера, в том числе планетные системы с несколькими планетами [22]. Следует при этом подчеркнуть, что планеты обнаружены только у звезд, имеющих высокую металличность (отношение Fe/H), т.е. у звезд позднего поколения.

По оценкам планетными системами, по крайней мере планетами-гигантами, обладают до 20 % звезд спектральных классов G–K. Скорее всего с уменьшением массы планет их число возрастает, и отсутствие планет типа Земли у других звезд объясняется ограничениями применяемого метода доплеровской спектроскопии, т.е. эффектом наблюдательной селекции. Можно предположить, что внутри газопылевых аккреционных дисков имеет место сильная гравитационная неустойчивость. Возможно, происходит дрейф планет-гигантов к центральной звезде, что уменьшает вероятность существования планет со значительно меньшей массой в пределах вероятной "зоны обитания" из-за сильных приливных возмущений. Опираясь на наблюдательные данные, можно прийти к выводу о том, что устойчивая конфигурация планетных систем, подобная конфигурации нашей солнечной системы, является, по-видимому, редким, если не уникальным случаем. Правда, при этом надо учитывать упомянутый выше эффект наблюдательной селекции, поскольку планеты-гиганты типа Юпитера и Сатурна на расстояниях свыше 5 а.е. от центральной звезды требуют для своего обнаружения наблюдений продолжительностью более 12 лет, которых пока не сделано (см., например, [23]). И все же, несмотря на сложности наблюдений, уже найдена одна планетная система (у звезды 47 Uma), напоминающая нашу солнечную систему.

В свою очередь, изучение структуры и вещества малых тел также накладывает вполне определенные ограничения на сценарии эволюции аккреционных дисков, образования газопылевых кластеров и твердотельной допланетной компоненты [24–27]. Эти данные особенно важны при моделировании термической структуры протопланетного диска с учетом обилия в нем химических элементов, агрегатного состояния основных компонентов допланетного вещества, расположения фронтов конденсация–сублимация, пространственного распределения пыли. Заметим, что с динамикой пылевых частиц и вероятными механизмами их укрупнения до размеров планетезималей связаны ключевые проблемы планетной космогонии, решение которых встречается со

многими трудностями и еще далеко от завершения. Следует, по-видимому, отказаться как от малореалистичных, не подкрепляемых ни экспериментальными, ни теоретическими оценками представлений о последовательном увеличении размеров частиц в газопылевой среде в результате соударений при относительно высоких скоростях [28–30]. Между тем необходимо отметить, что пока еще недостаточно исследованы поведение таких частиц в турбулентной гетерогенной среде, в частности при образовании упорядоченных структур, и эффективность происходящих в такой среде процессов коагуляции [31]. Сталкивается с определенными трудностями и другой механизм [32, 33], основанный на предположении об образовании протяженных (заполняющих всю сферу Хилла или ее значительную часть) самогравитирующих пылевых сгущений, из которых в дальнейшем образуются планетезимали. Предпринята попытка подтвердить возможность такого сценария и согласовать его с геохимическими данными на примере образования системы Земля–Луна [34, 35].

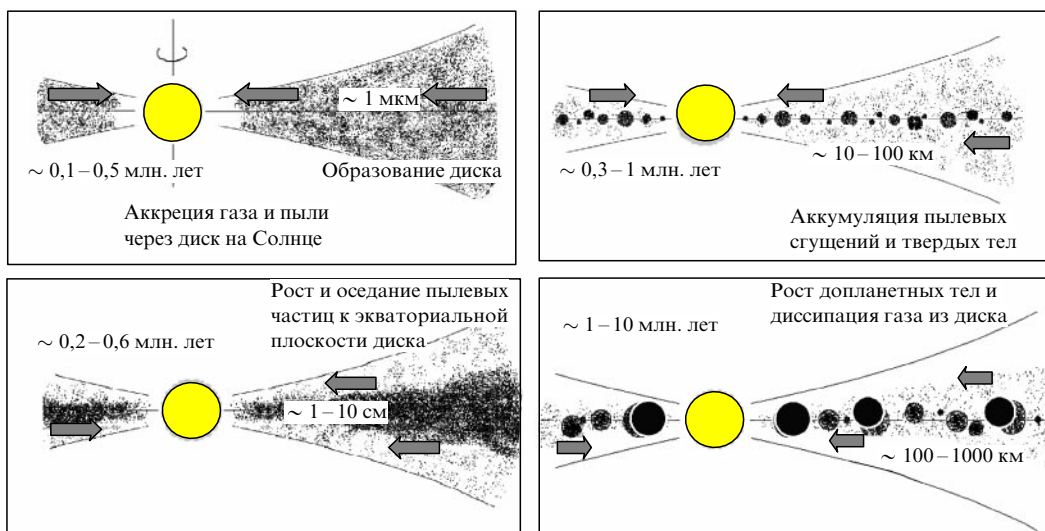
Как видим, поиск механизмов, обеспечивающих рост частиц и образование тел с размерами вплоть до размеров километровых планетезималей, остается крайне актуальным. Естественно допустить, что при оседании пылевых частиц (по координате  $z$ ) к средней плоскости вращающегося диска происходит его утоньшение и уплотнение (образование пылевого субдиска). При достижении некоторой критической плотности  $\sim 10^{-7}$  г см $^{-3}$ , отвечающей отношению плотностей пыли и газа  $\rho_p/\rho_g > 10^2$ , в нем создаются условия, необходимые для возникновения гравитационной неустойчивости за счет флуктуаций различных пространственно-временных масштабов, что приводит к образованию газопылевых сгустков (кластеров). Определенную роль в такой эволюции диска при учете эффектов самогравитации и вязкости может играть резонансное возбуждение волн плотности, оказывающих сильное влияние на особенности морфологии и поведения (динамики) нелинейных хаотических систем, что подкре-

пляется результатами численного моделирования [36, 37].

Последовательность формирования субдиска и образования первичных сгущений и твердых тел примерно за  $10^7$  лет схематично показана на рис. 5 [29]. При анализе формирования самогравитирующих кластеров и оценке возможности образования из них в процессе дальнейшей эволюции протопланеты можно воспользоваться локальным критерием гравитационной неустойчивости относительно радиальных возмущений в тонком диске [37, 38], который записывается в виде

$$\frac{c_s \Omega}{kG\Sigma} < 1,$$

где  $c_s$  — скорость звука для газа (или, в первом приближении, для газопылевой среды),  $\Omega$  — эпициклическая частота вращения диска на данном расстоянии от Солнца (близкая при вращении, отвечающем кеплеровскому, к локальной угловой скорости,  $\Omega = 2 \times 10^{-7}$  с $^{-1}$  на 1 а.е.),  $G$  — универсальная гравитационная постоянная,  $\Sigma$  — поверхностная плотность диска (масса вещества в столбе единичного сечения, ориентированного параллельно оси вращения),  $k$  — численный коэффициент ( $k \approx 1$ ). Как видим, на заданном расстоянии от Солнца этот критерий в основном определяется соотношением критической поверхностной плотности, т.е. массовым содержанием пыли и средней скорости звука среды  $c_s$ . Легко оценить, например, что газопылевой кластер космического состава на  $\sim 1$  а.е. должен обладать начальной поверхностной плотностью  $\Sigma > 10^5$  г см $^{-2}$ , поскольку для газа  $c_s \approx 1$  км с $^{-1}$ , и, чтобы выполнить это условие при исходной массе, примерно соответствующей массе Земли, кластер должен содержать  $\sim 99\%$  пыли и лишь  $\sim 1\%$  газа; при обратном соотношении масс пыли и газа для обеспечения требуемой величины  $\Sigma$  начальная масса кластера должна была бы составить приблизительно  $10^{30}$  г ( $100 M_E$ ). В этом случае возникает проблема, как "избавиться" от столь большой избыточной массы при формировании, например, системы Земля–Луна.



**Рис. 5.** Сценарий формирования протопланетного диска — модель гравитационной неустойчивости, развивающейся за счет флуктуаций в газопылевом субдиске при оседании частиц по направлению к средней плоскости и их уплотнении. При достижении критического условия неустойчивости образуются первичные газопылевые сгущения (кластеры), в которых происходит дальнейшее уплотнение и рост частиц с образованием твердых тел и планетезималей, сопровождаемое рассеянием газа из диска.

Анализ эволюционных процессов в дисках неразрывно связан с проблемами турбулентности, которым до недавнего времени уделялось недостаточное внимание, и учет влияния турбулентности, в первую очередь, турбулентной вязкости в неоднородной среде, ограничивался введением параметризаций. Между тем сдвиговая турбулентность оказывает огромное влияние на свойства поверхности и внутреннюю структуру формирующегося пылевого слоя и его дальнейшую эволюцию, включая устойчивость диска и газопылевых сгустков. Действительно, образующиеся в субдиске вследствие гравитационной неустойчивости кольцевые сгущения, должны распадаться на отдельные газопылевые кластеры, в которых, очевидно, обеспечиваются значительно более благоприятные условия для дальнейшего уплотнения и роста частиц с образованием первоначально рыхлых (fluffy) структур. Если принять во внимание, что определение таких кластеров по своей этимологии не противоречит понятию среды, в которой эффективную роль играют как процессы объединения частиц при соударениях и коагуляции, так и самогравитация, то рассмотренные выше альтернативные механизмы образования планетезималей могут оказаться несильно различными. Надо отметить, что спектральные наблюдения дисков у молодых звезд Т-Тельца свидетельствуют о наличии в них мелкой пыли ( $\leq 1$  мкм) в течение 1–10 млн лет. В то же время, если исходить из теоретических предпосылок, то во внутренней части диска ( $r < 10$  а.е.) за это время могут вырасти крупные тела размером  $\sim 100$ – $1000$  км или еще более крупные сгущения эквивалентной массы (см. рис. 5).

Как видим, задачи моделирования газопылевых комплексов и образования протопланетных (малых) тел в процессе их эволюции теснейшим образом связаны с детальным изучением процессов теплообмена в турбулентном сжимаемом сдвиговом потоке реагирующих газов. Существенным шагом на пути совершенствования математической теории турбулентности неоднородных сред является развитие феноменологической теории неоднородной турбулентности исходя из термодинамического подхода к замыканию гидродинамических уравнений осредненного движения [30, 31, 41]. Это позволило нам получить с использованием методов неравновесной термодинамики и соотношений взаимности Онзагера определяющие соотношения для неизотропных турбулентных термодинамических потоков, которые обобщают на случай многокомпонентного химически активного континуума соответствующие результаты гидродинамики однородной жидкости и наиболее полно описывают тепло- и массоперенос в многокомпонентной турбулизованной среде. Полученная точная система уравнений высокого порядка замыкания положена в основу инвариантной теории турбулентности. В локально-равновесном приближении она сводится к  $K$ -теории турбулентности (см. [31, 41]), что позволяет получить систему алгебраических соотношений и рассчитать коэффициенты турбулентного обмена (турбулентной вязкости и температуропроводности) в стратифицированном многокомпонентном газовом потоке с поперечным сдвигом скорости.

Обобщение данной теории на гетерогенные среды открыло возможности ее применения для наиболее адекватного моделирования аккреционных газопылевых дисков. Задача сводится к исследованию в гидродинамическом приближении совместного протекания процессов

тепломассопереноса и коагуляции в двухфазной среде при наличии сдвиговой турбулентности в дифференциально-вращающемся газопылевом диске и полидисперсности взвешенных в потоке твердых частиц. Использование  $K$ -теории дало возможность, в частности, получить полуэмпирические коэффициенты турбулентного переноса для газопылевых дисков, которые являются обобщением выражения коэффициента турбулентной вязкости в газопылевых  $\alpha$ -дисках [42], и изучить взаимовлияние процессов турбулентного перемешивания и кинетики коагуляции при формировании газопылевого субдиска. Предложенный нами [31] параметрический метод моментов для решения интегро-дифференциального уравнения коагуляции Смолуховского открывает возможность в рамках модели двухфазной дисперсной турбулентной сжимаемой среды с различным объемным содержанием взвешенных пылевых частиц и функций их распределения по размерам проводить численное моделирование оседания частиц в субдиске в режиме предельного насыщения газового потока пылевыми частицами.

Успехи на этом пути позволяют на новой основе строить численные модели структуры протопланетного аккреционного диска вокруг молодой звезды солнечного типа на стадии его формирования, учитывающие перенос тепловой энергии излучением и турбулентностью, изменение непрозрачности вещества, эффективность испарения и конденсации основных компонент пылевого вещества и их химического состава. Согласовать механические и геохимические аспекты проблемы позволяют расчеты  $(r, z)$ -распределения  $T$ – $\rho$ – $P$  параметров и положения излучающей поверхности диска, области частичного испарения магнезиальных силикатов и железа внутри диска, соответствующей внутренней границе зоны формирования планет земной группы, и координат фронта сублимация–конденсация водяного льда, определяющего внутреннюю границу зоны формирования планет-гигантов и комет [43]. При этом необходимо самосогласованно учитывать нагрев диска вследствие диссипации энергии турбулентности изнутри и излучением центральной звезды извне при варьировании таких входных параметров, как аккреционный поток массы через диск на Солнце, турбулентная вязкость, соотношение плотностей пылевой и газовой компонент, размеры и пространственное распределение пылевых частиц, вклад тепловой конвекции в турбулентность и теплоперенос в диске. В результате открывается возможность более корректно обосновать механизм возникновения джинсовской гравитационной неустойчивости в пылевом субдиске и рассчитать динамическую модель взаимодействия диска с окружающей аккреционной оболочкой, включая структуру и потоки массы на поверхности диска, в экмановском пограничном слое и во внутренней зоне. Дальнейшим развитием такого подхода служат модели динамического взаимодействия пылевых частиц между собой внутри турбулентной среды газопылевых кластеров и с образующимися там более крупными телами — гравитирующими планетезималиями.

## 5. Перспективы космических исследований

Разработка моделей непосредственно связана с проведением детального экспериментного изучения малых тел



как носителей первичной космогонической информации. Первостепенную роль здесь играют космические полеты к малым телам с целью изучения структуры и состава астероидов в разных зонах Главного пояса, астероидов, сближающихся с Землей, и, конечно, прямые исследования вещества комет. Одновременно необходимо комплексное осмысление всей совокупности экспериментальных данных, лежащих в основе современных представлений о солнечной системе.

Космические исследования планет и малых тел в современном мире переживают настоящий бум, что, к сожалению, сильно контрастирует с ситуацией, сложившейся в России. На фоне резкого сокращения финансирования работ по космосу возникла общая недооценка важности осуществления научных космических программ. Огромное негативное влияние на планетные исследования оказала неудача с запуском в 1996 г. аппарата "Марс-96", которая остро поставила задачу поиска принципиально новых подходов при изучении дальнего космоса.

Возродить нашу программу планетных исследований, имеющую замечательные традиции и крупнейшие достижения, получившие мировое признание, призвана реализация проекта космического аппарата (КА) нового поколения "Фобос-Грунт" (рис. 6), включенного в Федеральную космическую программу [44, 45]. Этот проект, предусматривающий доставку на Землю образцов вещества со спутника Марса Фобос, имеет важное научное значение и одновременно служит необходимым заделом для решения других актуальных целевых задач, а благодаря использованию передовых технологий и прорывных технических решений является значительно более дешевым по сравнению с его предшественниками. Сюда относятся: применение модульно-блочного принципа конструирования КА с использованием композитных материалов, значительное уменьшение массы при широ-

кой унификации бортовых систем, достижение высокой степени автономии при проведении операций на разных этапах полета, обеспечение высокой надежности функционирования отдельных систем и выполнения задачи в целом. При необходимости КА может оснащаться электрореактивными двигателями (ЭРД) малой тяги на основе высокоэффективных солнечных батарей и функционировать по принципу системы SEP (Solar Energy Propulsion), что повышает энерговооруженность аппарата.

Выбор в качестве актуальной научной задачи планетных исследований полета к одному из малых тел — Фобосу — не случаен. Образцы пород с Фобоса представляют собой особый интерес ввиду остающейся до конца не решенной проблемы его происхождения как спутника планеты: реликтовое тело со времени аккреционной стадии или астероид, позднее захваченный гравитационным полем Марса? В любом случае доставленные образцы станут самыми первыми образцами пород, слагающих такое малое астероидоподобное тело. Наряду с этим предполагаемые длительные исследования с помощью комплекса разнообразных инструментов в окрестности Фобоса и на его поверхности дадут неоценимые сведения о природе, особенностях внутреннего строения и собственного движения этого тела, физических условиях околопланетной среды в окрестностях Марса и Фобоса. Будут также получены данные о самом Марсе как при его длительных дистанционных наблюдениях, так и с помощью малых станций, отделяемых от КА при его выходе на околомарсианскую орбиту и совершающих мягкую посадку на поверхность Марса.

Проект удачно вписывается в международную стратегию изучения солнечной системы и вместе с тем не дублирует проекты других стран, в частности амбициозную марсианскую программу американского НАСА. На основе создаваемого многофункционального базового модуля возможно решение других актуальных задач изучения планет и малых тел. Планируемые полеты к кометам и астероидам удовлетворяют существующим энергетическим ограничениям при использовании носителей среднего класса типа "Союз-Фрегат" и ЭРД, обеспечивая требования к удешевлению космических миссий. В то же время сохраняют большую актуальность, в том числе с точки зрения решения проблем космогонии, исследования Луны, которые могут рассматриваться в качестве одной из ветвей общей стратегической линии планетных исследований, в том числе с использованием конверсионных носителей.

## 6. Заключение

Солнечная система — это уникальная природная лаборатория с огромным разнообразием небесных тел, природных механизмов и взаимодействий. Малые тела — астероиды, кометы, метеороиды, межпланетная пыль — представляют собой важные компоненты солнечной системы, физически и эволюционно находящиеся в тесном взаимодействии с большими планетами. С этими телами, сохранившими в своем составе вещество, претерпевшее минимальные изменения в процессе эволюции, непосредственно связано также решение фундаментальных проблем происхождения и эволюции солнечной системы, происхождения жизни. Поэтому исследования малых тел, разработка их физико-химиче-



Рис. 6. Проект космического аппарата нового поколения "Фобос-Грунт", являющегося базовым КА, на основе которого планируются полеты к другим малым телам солнечной системы.

ских моделей играет ключевую роль в решении проблем космогонии и астробиологии.

Миграционные и столкновительные процессы отражают динамический характер взаимодействий в солнечной системе, который проявляется в постоянном транспорте вещества, обмене материалами между различными телами. В раннюю эпоху (на рубеже ~ 4 млрд лет назад) этот механизм, получивший название гетерогенной аккреции, был, вероятно, ответственным за доставку летучих элементов вследствие выпадения комет и астероидов, близких по составу к углистым хондритам, на планеты земной группы и тем самым за формирование (по крайней мере частичное) их атмосфер и гидросфер. Таким образом, можно полагать, что гетерогенная аккреция сыграла важную роль в эволюции Земли, Венеры и Марса. Изучение миграционно-столкновительных процессов имеет также самое непосредственное отношение к привлекающей все большее внимание проблеме астероидной опасности и проектам ее предотвращения.

Изучение малых тел накладывает вполне определенные ограничения на существующие сценарии эволюции аккреционных дисков, образования газопылевых кластеров и твердотельной допланетной компоненты. С динамикой пылевых частиц и вероятными механизмами их укрупнения до размеров планетезималей в образующихся газопылевых сгущениях разного масштаба связаны ключевые проблемы планетной космогонии, решение которых еще далеко от завершения. Наиболее вероятным представляется сценарий образования в средней плоскости аккреционного диска плотного пылевого субдиска и возникновения в нем при достижении некоторой критической плотности условий, необходимых для появления гравитационной неустойчивости, ответственной за образование газопылевых кластеров в широком спектре пространственных масштабов. В процессе последующей эволюции из них, вероятно, формируются первичные твердые тела — планетезимали, дающие начало образованию планет.

Анализ эволюционных процессов в дисках неразрывно связан с проблемами турбулентности, оказывающей определяющее влияние на свойства, внутреннюю структуру и устойчивость диска и газопылевых сгущений. Задачи моделирования газопылевых комплексов и образования протопланетных (малых) тел в процессе их эволюции требуют детального изучения процессов теплообмена в турбулентном сжимаемом сдвиговом потоке. Значительный вклад в это направление вносит теория турбулентности неоднородных сред, распространение которой на гетерогенные среды открыло возможности ее применения для наиболее адекватного моделирования аккреционного дифференциально-вращающегося газопылевого диска вокруг молодой звезды солнечного типа. Ключевое значение имеет развитие модели, на основе которой можно было бы обосновать механизм достижения гравитационной неустойчивости в пылевом субдиске, с дополнительным учетом переноса тепловой энергии излучением и турбулентностью, изменения непрозрачности вещества, эффективности испарения и конденсации основных компонент газа и пыли различного химического состава.

Проблемы моделирования непосредственно связаны с прямыми исследованиями малых тел как носителей первичной космогонической информации. Начаты запу-

ски космических аппаратов к астероидам и кометам, и этому направлению исследований уделяется возрастающее внимание в мире. Наше отставание в этой области может быть частично компенсировано запуском КА нового поколения "Фобос-Грунт" и полетами к малым телам аппаратов, создаваемых на его основе. Такие проекты находятся в стадии разработки и их осуществление планируется начиная с 2009 г.

**Благодарности.** Я признателен своим коллегам А.В. Колесниченко, А.Б. Макалкину, С.И. Ипатову, В.А. Дорофеевой и В.И. Шематовичу, вместе с которыми проводился ряд исследований, нашедших отражение в докладе.

## Список литературы

1. Маров М Я *Планеты Солнечной системы* 2-е изд. (М.: Наука, 1986)
2. Britt D T, Lebofsky L A, in *Encyclopedia of the Solar System* (Eds P R Weissman, L-A McFadden, T V Johnson) (San Diego: Academic Press, 1999) p. 585
3. Белецкий В В, в сб. *Современные проблемы механики и физики космоса: К 70-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН М.Я. Марова* (М.: Физматлит, 2003) с. 27
4. Harris A W, in *Collisional Processes in the Solar System* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 261, Eds M Ya Marov, H Rickman) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001) p. 323
5. Asphaug E *Sci. Am.* **13** (3) 44 (2003)
6. Stern A, Yelle R V, in *Encyclopedia of the Solar System* (Eds P R Weissman, L-A McFadden, T V Johnson) (San Diego: Academic Press, 1999) p. 499
7. Levison H F, Weissman P R, in *Encyclopedia of the Solar System* (Eds P R Weissman, L-A McFadden, T V Johnson) (San Diego: Academic Press, 1999) p. 557
8. Маров М Я *Астрон. вестник* **28** (4–5) 5 (1994)
9. Маров М Я, Шематович В И, Бисикало Д В *Математическое моделирование разреженного газа в задачах астрономии* (М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1990)
10. Marov M Ya et al. *Nonequilibrium Processes in the Planetary and Cometary Atmospheres: Theory and Applications* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 217) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1997)
11. Owen T C, Bar-Nun A, in *Collisional Processes in the Solar System* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 261, Eds M Ya Marov, H Rickman) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001) p. 249
12. Asphaug E et al. *Nature* **393** 437 (1998)
13. Marov M Ya, Ipatov S I, in *Collisional Processes in the Solar System* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 261, Eds M Ya Marov, H Rickman) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001) p. 223
14. Marov M Ya, Ipatov S I, in *34th Lunar and Planetary Science Conf. League City, Texas, USA, March 17–21, 2003*, Abstract 1099
15. Marov M Ya, Ipatov S I, in *Bioastronomy 2002: Life Among the Stars: Proc. of the 213th Symp. of the IAU, Australia, 2002* (Eds R P Norris, F H Stootman) (San Francisco, Calif.: Astron. Soc. of the Pacific, 2004) p. 295
16. de Pater I, Lissauer J J *Planetary Sciences* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001)
17. Виноградов А П *Введение в геохимию океана* (М.: Наука, 1967)
18. Marov M Ya, Grinspoon D H *The Planet Venus* (New Haven: Yale Univ. Press, 1998)
19. Marov M Ya, Ipatov S I, in *36th Lunar and Planetary Science Conf. League City, Texas, USA, March 14–18, 2005*, Abstract 1268
20. Grün E, in *Encyclopedia of the Solar System* (Eds P R Weissman, L-A McFadden, T V Johnson) (San Diego: Academic Press, 1999) p. 673
21. Адушкин В В, Частное сообщение
22. Marcy G W et al., in *Bioastronomy 2002: Life Among the Stars: Proc. of the 213th Symp. of the IAU, Australia, 2002* (Eds R P Norris, F H Stootman) (San Francisco, Calif.: Astron. Soc. of the Pacific, 2004) p. 11

23. Butler R P et al. "Statistical properties of extrasolar planets", in *Planetary Systems in the Universe: Observation, Formation and Evolution* (IAU Symp., 202, Eds A Penny, P Artymowicz, A-M LaGrange) (San Francisco, Calif.: Astron. Soc. of the Pacific, 2004)
24. Сафронов В С *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет* (М.: Наука, 1969)
25. Cuzzi J N, Dobrovolskis A R, Champney J M *Icarus* **106** 102 (1993)
26. Hartmann L et al. *Astrophys. J.* **495** 385 (1998)
27. Weidenschilling S J *Space Sci. Rev.* **92** 295 (2000)
28. Wurm G, Blum J, Colwell J E *Phys. Rev. E* **64** 046301 (2001)
29. Макалкин А Б, в сб. *Современные проблемы механики и физики космоса: К 70-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН М.Я. Марова* (М.: Физматлит, 2003) с. 402
30. Дорофеева В А, Макалкин А Б *Эволюция ранней Солнечной системы: Космохимические и физические аспекты* (М.: Едиториал УРСС, 2004)
31. Marov M Ya, Kolesnichenko A V *Mechanics of Turbulence of Multicomponent Gases* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 269) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001)
32. Энеев Т М, Козлов Н Н *Астрон. вестник* **15** (2) 80; (3) 131 (1981)
33. Энеев Т М *Астрон. вестник* **27** (5) 3 (1993)
34. Krivtsov A M, in *Proc. of the 32nd Intern. Geological Congress, Florence, Italy, August 20–28, 2004* (Firenze: Field Guide Book, 2004) p. 20
35. Галимов Э М, в сб. *Основные направления геохимии: к 100-летию со дня рождения академика А.П. Виноградова* (Отв. ред. Е М Галимов) (М.: Наука, 1995) с. 8
36. Фридман А М и др., в сб. *Современные проблемы механики и физики космоса: К 70-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН М.Я. Марова* (М.: Физматлит, 2003) с. 12
37. Fridman A M, Choruzhii O V, Polyachenko E V, in *Observational Manifestation of Chaos in Astrophysical Objects: Invited Talks for a Workshop, Moscow, Russia, 22–29 August 2000* (Eds A M Fridman, M Ya Marov, R H Miller) (Dordrecht: Kluwer Acad., 2002) p. 51
38. Toomre A *Astrophys. J.* **139** 1217 (1964)
39. Goldreich P, Ward W R *Astrophys. J.* **183** 1051 (1973)
40. Kolesnichenko A V, Marov M Ia *Arch. Mech. (Warszawa)* **37** (1–2) 3 (1985)
41. Колесниченко А В, Маров М Я *Турбулентность многокомпонентных сред* (М.: Наука, 1998)
42. Shakura N I, Sunyaev R A *Astron. Astrophys.* **24** 337 (1973)
43. Макалкин А Б *Астрон. вестник* **38** 559 (2004)
44. Авдучевский В С и др., в сб. *Современные проблемы механики и физики космоса: К 70-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН М.Я. Марова* (М.: Физматлит, 2003) с. 520
45. Marov M Ya et al. *Adv. Space Res.* **33** 2276 (2004)