

кин, А.В. Григорьев, Ю.В. Никольский, В.Н. Гнедых, Д.В. Пацаев, А.В. Киселев (ИКИ РАН);

SPICAM: руководитель Ж.-Л. Берто (Service d'Aéronomie/CNRS, Верьер-ле-Буиссон, Франция), О.И. Кораблев, В.И. Мороз, А.А. Федорова, А.В. Родин (ИКИ РАН).

## Список литературы

- Сафронов В С *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет* (М.: Наука, 1969)
- Wetherill G W *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **18** 205 (1990)
- Гуди Р, Уолкер Дж *Атмосферы* (М.: Мир, 1975)
- Lewis J S, Prinn R G *Planets and Their Atmospheres: Origin and Evolution* (Orlando: Academic Press, 1984)
- Ahrens T J *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **21** 525 (1993)
- Шмидт О Ю *Четыре лекции о теории происхождения Земли* 3-е изд. (М.: Изд-во АН СССР, 1957)
- Ипатов С И *Миграция небесных тел в Солнечной системе* (М.: Едиториал УРСС, 2000)
- Маров М Я *УФН* **175** 668 (2005)
- Герасимов М В и др. *Вестн. АН СССР* (9) 10 (1985)
- Герасимов М В *Письма в Астрон. журн.* **5** (5) 251 (1979)
- Genda H, Abe Y *Icarus* **164** 149 (2003)
- Pepin R O *Icarus* **92** 2 (1991)
- Pepin R O *Icarus* **126** 148 (1997)
- Hunten D M *Science* **259** 915 (1993)
- Bogard D D et al. *Space Sci. Rev.* **96** 425 (2001)
- Carr M H *Water on Mars* (New York: Oxford Univ. Press, 1996)
- Donahue T M *Icarus* **66** 195 (1986)
- de Bergh C et al. *Science* **251** 547 (1991)
- Meier R et al. *Science* **168** 731 (1988)
- Зеленый Л М и др. *УФН* **175** 643 (2005)
- Sagan C, Mullen G *Science* **177** 52 (1972)
- Мороз В И *Физика планеты Марс* (М.: Наука, 1978)
- Мухин Л М, Мороз В И *Письма в Астрон. журн.* **3** 78 (1977)
- Мороз В И, Мухин Л М *Космич. исслед.* **15** 901 (1978)
- Kasting J F, Ackerman T P *Science* **234** 1383 (1986)
- Ingersoll A P *J. Atmos. Sci.* **26** 1191 (1969)
- Маров М Я, Гальцев А П, Шари В П *Астрон. вестн.* **19** (1) 15 (1985)
- Pollack J V et al. *Icarus* **103** 1 (1993)
- Афанасенко Т С, Родин А В *Астрон. вестн.* (2005) (в печати)
- Мороз В И, Хантресс В Т, Шевалев И Л *Космич. исслед.* **40** 451 (2002)
- Moroz V I *Space Sci. Rev.* **29** 3 (1981)
- Hunten D M et al. (Eds) *Venus* (Tucson, Ariz.: Univ. of Arizona Press, 1983)
- Bougher S W, Hunten D M, Phillips R J (Eds) *Venus II* (Tucson, Ariz.: Univ. of Arizona Press, 1997)
- Marov M Ya, Grinspoon D H *The Planet Venus* (New Haven: Yale Univ. Press, 1998)
- Carlson R W et al. *Science* **253** 1541 (1991)
- Golitsyn G S *Icarus* **13** 1 (1970)
- Spinrad H, Münch G, Kaplan L D *Astrophys. J.* **137** 1319 (1963)
- Мороз В И *Астрон. журн.* **41** 350 (1964)
- Kieffer H N et al. (Eds) *Mars* (Tucson, Ariz.: Univ. of Arizona Press, 1992)
- Korablev O I et al. *Icarus* **102** 76 (1993)
- Rodin A V, Korablev O I, Moroz V I *Icarus* **125** 212 (1997)
- Smith M D *Icarus* **167** 148 (2004)
- Smith D E et al. *J. Geophys. Res.* **106** (E10) 23689 (2001)
- Acuna M H et al. *Science* **284** 790 (1999)
- Boynnton W V et al. *Space Sci. Rev.* **110** 37 (2004)
- Mitrofanov I et al. *Science* **297** 78 (2002)
- Tillman J E *J. Geophys. Res.* **93** 9433 (1988)
- Mitrofanov I G et al. *Science* **300** 2081 (2003)
- Clancy R T et al. *Icarus* **122** 36 (1996)
- Родин А В, частное сообщение (2003)
- Richardson M I, Wilson R J *J. Geophys. Res.* **107** (E5) 7 (2002)
- Ксанфомалити Л В *Астрон. вестн.* **37** 397 (2003)
- Squyres S W, Kasting J F *Science* **265** 744 (1994)
- Owen T et al. *Science* **240** 1767 (1988)
- Head J W et al. *Nature* **426** 797 (2003)
- Morris R V et al. *Science* **305** 833 (2004)
- Korablev O I et al. *Proc. SPIE* **4818** 261 (2002)
- Засова Л В и др. *Космич. исслед.* (2005) (в печати)
- Bertaux J-L et al. *Science* **307** 566 (2005)
- Hansen G et al. *Planet. Space Sci.* (2005) (in press)
- Bertaux J-L et al., in *35th Lunar and Planetary Science Conf., League City, Texas, USA, March 15–19, 2004*, Abstract 2178
- Bibring J-P et al. *Nature* **428** 627 (2004)
- Byrne S, Ingersoll A P *Geophys. Res. Lett.* **30** (13) 29 (2003)
- Bibring J-P et al. *Science* **307** 1576 (2005)
- Langevin Y et al. *Science* **307** 1581 (2005)
- Formisano V et al. *Science* **306** 1758 (2004)
- Krasnopolsky V A, Maillard J P, Owen T C *Icarus* **172** 537 (2004)
- Mumma M J et al. *Am. Astron. Soc. DPS Meeting* **36** 26.02 (2004)
- Max M D, Clifford S M *J. Geophys. Res.* **105** (E2) 4165 (2000)

PACS numbers: 96.30. – t, 96.35. – j, 96.35.Hv

## "Внезапная догадка"<sup>1</sup>: первые результаты зондирования атмосферы Титана космическим аппаратом "Гюйгенс"

Т. Оуэн, С. Атрейа, Х. Ниман

### 1. Введение

14 января 2005 г. блестяще сбылась мечта, впервые захватившая наше воображение в 1982 г.: Европейский космический аппарат "Гюйгенс", запущенный американской ракетой-носителем, после семилетнего межпланетного странствия совершил мягкую посадку на гигантском спутнике Сатурна — Титане. Очевидно, сделаны еще далеко не все открытия, которые можно извлечь из анализа обширных данных, полученных этим аппаратом. В этом кратком предварительном отчете мы просуммируем причины, по которым Титан был выбран в качестве объекта такого интенсивного исследования, и приведем наиболее яркие экспериментальные результаты, которые были получены различными группами после первых недель анализа данных.

### 2. Почему Титан?

Титан стал объектом интенсивных исследований из-за наличия на нем плотной загадочной атмосферы. Намек на существование атмосферы у Титана был получен из оптических наблюдений уменьшения яркости к краю диска, которые проводил опытный каталонский наблюдатель Комас Сола (1908 г.) [1]. Существование атмосферы было окончательно подтверждено Дж. П. Койпером (1944 г.) [2] по наблюдениям полос поглощения метана в спектре Титана. Однако только в 1980 г. атмосфера Титана стала главнейшим объектом исследований, так как при близком пролете космического

<sup>1</sup> "Wild surmise" — слова из сонета Джона Китса "Впечатление от первого прочтения Гомера в переводе Чэпмена". Дэвид Саутвуд, руководитель научных программ Европейского космического агентства, с волнением процитировал отрывок из этого сонета на пресс-конференции по случаю успешной посадки "Гюйгенса", подразумевая, что мы вдруг увидели новый мир, подобно тем европейцам, безмолвно застывшим перед впервые открывшейся перед ними картиной Тихого океана, о которых упоминается в сонете Китса.

аппарата "Вояджер" было обнаружено, что она в основном состоит из азота, давление вблизи поверхности составляет 1,5 бара, а в верхней атмосфере происходят активные фотохимические процессы, при которых образуются разнообразные органические молекулы, приводящие к появлению плотных слоев атмосферной дымки (смога). Среди продуктов фотохимических реакций выделяется молекула HCN, играющая важную роль в химических реакциях, которые, как предполагается, предшествовали зарождению органической жизни на Земле.

Фотохимический смог не позволил камерам "Вояджера" сфотографировать поверхность Титана. Титан, который больше Меркурия, имеет самую большую твердую поверхность в солнечной системе. Ожидалось, что на его поверхности должны быть видны следы течения выпадающих из атмосферы аэрозолей, озера, моря и реки из жидких углеводородов, участвующих в гидрологическом цикле на этом спутнике. Фотохимическое разрушение метана означало, что на спутнике должен быть какой-то внутренний его источник, поэтому полагали, что на поверхности существуют трещины, гейзеры или, возможно, даже вулканы, которые могли бы пополнять содержание метана в атмосфере. Конечно, не исключалась возможность того, что наши измерения происходят в эпоху, когда наблюдаемый метан является исчезающим реликтом какого-то более раннего эпизода огромного пополнения атмосферы метаном. Величина средней плотности Титана  $1,9 \text{ г см}^{-3}$  означает, что он состоит по массе на 50 % из твердых пород и на 50 % из льда, подобно спутникам-гигантам Ганимед и Каллисто соседнего Юпитера. Скальные породы должны содержать калий, радиоактивные изотопы которого при распадах образуют  $^{40}\text{Ar}$ , как это имеет место на Земле, Марсе и Венере. Поэтому ожидалось, что аргон будет найден при непосредственном проникновении зонда в атмосферу Титана, так как издалека его практически невозможно обнаружить.

Все эти особенности проиллюстрированы на рис. 1, на котором сравниваются атмосферы Титана и Земли. Это единственные тела солнечной системы с плотными

атмосферами и высоким содержанием молекул  $\text{N}_2$ , и, естественно, было любопытно узнать, существует ли глубокая аналогия между ними.

### 3. Происхождение атмосфер

Планетные атмосферы состоят из летучих составляющих наиболее обильных химических элементов. Для тел небольших размеров, каковыми являются Титан и Земля, это означает, что в их атмосферах должны присутствовать соединения углерода, азота, кислорода и, кроме того, первичные инертные газы — неон, аргон, криптон и ксенон. Инертные газы должны были бы поглощаться, адсорбироваться или захватываться небольшими твердыми телами, называемыми планетези-маллями, из которых впоследствии сформировались планеты. Криптона и ксенона содержится немного, однако их большой атомный вес и химическая инертность практически гарантируют, что они останутся в атмосфере после дегазации твердых пород.

Ясно, что атмосфера Земли является аномалией, даже если не учитывать биогенный кислород, — в ней слишком много азота! Во Вселенной больше углерода, чем азота, и в межзвездной среде, а значит, и в протосолнечной системе углерод существует в виде графитовых пылинок или органических соединений. Азот же, напротив, существует в виде очень летучего газа из молекул  $\text{N}_2$ .

Планетези-маллям гораздо легче захватить твердые углеродистые соединения, чем азот, если только углерод не преобразуется в молекулы  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$  еще до формирования планетези-малей. Соответственно ожидается, что химический состав метеоритов и комет должен показывать избыточное отношение  $\text{C}/\text{N}$ , и оно действительно более чем в 5 раз превышает среднее космическое обилие. Поэтому неудивительно, что на Венере и Марсе наблюдаются атмосферы с доминированием углерода в форме  $\text{CO}_2$ . Что же случилось на Земле и на Титане?

На Земле двуокись углерода растворялась в воде и образовывала углеродистые породы — при помощи и содействии богатой жизнедеятельности морских форм жизни. Если экстрагировать весь  $\text{CO}_2$ , содержащийся в связанном состоянии в известковых породах, то атмосферное содержание  $\text{CO}_2$  повысилось бы до 95 % при давлении в 70 бар. Земная атмосфера стала бы в точности похожей на венерианскую!

А что же Титан? Несомненно, углерод частично присутствует в органических соединениях на поверхности этого спутника. Аэрозоли, фотохимически образованные в атмосфере, должны выпадать в виде осадков и в принципе могли бы сформировать глобальный слой глубиной в 100–200 м [3]. Однако этого недостаточно, если отношение  $\text{C}/\text{N}$  в атмосфере Титана такое же, как у комет, метеоритов и в атмосферах планет земной группы. Должен быть огромный приток углерода изнутри самого спутника.

### 4. Предварительные результаты, полученные аппаратом "Гюйгенс"

#### 4.1. Поверхность Титана

Самым неожиданным результатом, полученным спускаемым аппаратом "Гюйгенс", несомненно, стало обнаружение речных долин на снимках, сделанных в процессе

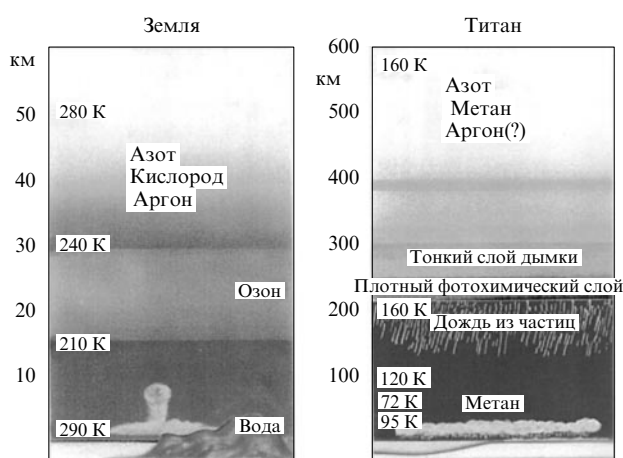
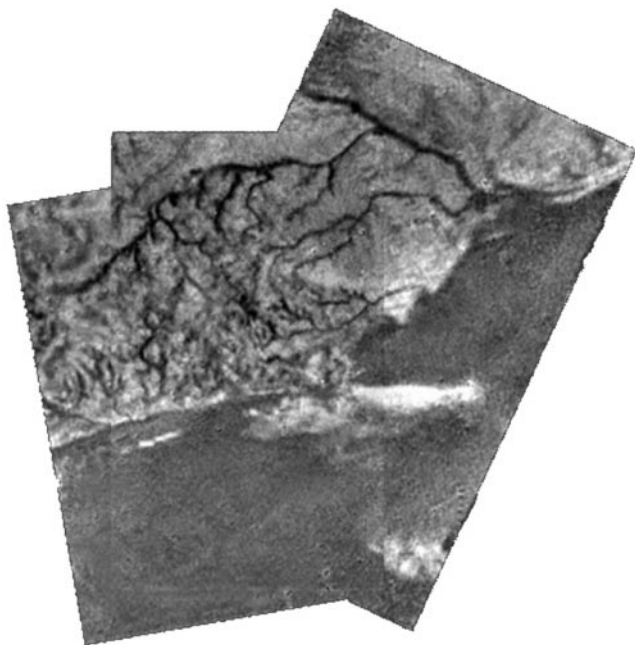


Рис. 1. Сравнение атмосфер Земли и Титана. В обеих атмосферах доминирует азот и содержится радиоактивный аргон (теперь мы можем убрать знак вопроса для аргона в атмосфере Титана!). Однако на Титане роль воды играет метан, и плотная дымка из продуктов фотохимических реакций окутывает поверхность.



**Рис. 2.** Руслу рек на поверхности Титана. "Порода", в которой проточены эти руслу, вовсе не скалы, а твердый водяной лед при температуре 94 К. Руслу были сформированы течением жидкого метана, остатки которого (от выпадающих в виде осадков аэрозолей) видны как темные днища каналов.

посадки аппарата на поверхность (рис. 2). Этот результат подтвердил одну из наших главных догадок о Титане: жидкие углеводороды должны были течь по его поверхности. Почему углеводороды? Потому что при низкой температуре поверхности Титана о жидкой воде не может быть и речи, и нет никаких иных космически обильных соединений кроме углеводородов, которые могли бы находиться в жидком агрегатном состоянии при температуре 94 К. В ранних исследованиях фотохимических процессов на Титане было показано, что основным конечным продуктом реакции должен быть этан ( $C_2H_6$ ) [3, 4]. Была выдвинута идея, что поверхность Титана могла быть покрыта глобальным океаном из жидкого  $C_2H_6$  [5]. Это крайнее предположение было отброшено после первых радарных измерений [6] и последующих инфракрасных (ИК) наблюдений [7–10], которые показали, что поверхность Титана неоднородна. Тем не менее до сих пор казалось вероятным, что этан может быть основным жидким соединением на его поверхности. Соответственно, самые темные области поверхности Титана, которые видны сквозь атмосферную мглу на снимках, сделанных в видимой области спектра с Земли, могли быть предположительно морями из жидкого этана.

Теперь эта гипотеза кажется крайне маловероятной. Хроматографический газовый масс-спектрометр (GCMS) аппарата "Гюйгенс" показал, что не этан, а метан является доминирующим углеводородным соединением на поверхности Титана. Действительно, сразу после посадки аппарата на поверхность прибор GCMS зарегистрировал резкий скачок обилия метана, который означал выброс этого газа предположительно в результате испарения жидкого метана с поверхности или приповерхностных слоев спутника при их нагреве вблизи горячего впускного отверстия прибора GCMS. Это приблизи-

тельно 30 %-ное увеличение содержания метана наблюдалось около часа во время передачи данных аппаратом на Землю и несколько уменьшилось к самому концу сеанса связи. Содержание азота при этом оставалось постоянным на уровне, зарегистрированном сразу же после посадки.

Так что по современным представлениям загадочные каналы на поверхности Титана были прорезаны потоками жидкого метана, а озера и моря, если они есть, заполнены именно этой жидкостью. В самом деле, на Титане метан должен играть ту же роль, что и вода на Земле, и проходить, как и на Земле, круговорот — осадки — сбор на поверхности — испарение — конденсация — осадки и т.д.

На поверхности с помощью спектрометра GCMS также были найдены следы присутствия HCN,  $C_2H_2$  и прочих простейших углеводородных соединений, из которых самым сложным оказался бензол, — все эти молекулы были обнаружены в стратосфере Титана, где они образуются в результате фотохимических реакций. Пока не обнаружены более сложные вещества, присутствие которых возможно из-за наличия плотных слоев атмосферного смога, предположительно состоящего из полимеров и больших органических молекул типа PAHS [11]. Анализ соответствующих данных продолжается.

Камера для съемки при посадке аппарата, которая обнаружила загадочные каналы, а также спектрометрические измерения показали, что непрозрачность атмосферы Титана значительно выше, чем ожидалось. Этот результат объясняет, почему съемочная аппаратура на орбитальной станции "Кассини" не смогла получить четкие изображения поверхности Титана даже на самых больших длинах волн около 1 мкм. Результаты, полученные оптическим и ИК спектрографом-картографом, и особенно радарные измерения с борта орбитальной станции, будут использоваться в дальнейшем для изучения поверхности Титана в максимально широком диапазоне спектра.

Чувствительные датчики научной аппаратуры для изучения поверхности аппарата "Гюйгенс" показали, что консистенция поверхности Титана напоминает мокрый песок. Другое часто употребляемое сравнение для поверхности, на которую опустился зонд, — "грязь". Эта грязь должна состоять из уплотненных составляющих органических аэрозолей, выпадающих в виде осадков из атмосферы, на которых естественным образом конденсируются молекулы метана. Эта модель согласуется с впрыском метана, обнаруженным спектрометром GCMS при посадке на Титан. Она также объясняет присутствие бензола и других органических веществ около поверхности Титана, которые, по-видимому, испарились из почвы при контакте с нагретым при посадке впускным клапаном спектрометра.

#### 4.2. Атмосфера Титана

Еще более удивительным оказалось отсутствие в атмосфере Титана заметного количества тяжелых благородных газов (аргона, криптона и ксенона). Эти газы есть в атмосферах Венеры, Земли, Марса, Юпитера и были обнаружены в метеоритах. Как показывают лабораторные эксперименты, они могут захватываться при образовании льда либо путем адсорбции при температурах ниже 100 К, либо в виде клатратов (т.е. вкраплений) гидратов, если лед образуется в кристаллическом состоя-

нии при более высоких температурах, а потом остывает до температур, при которых клатраты устойчивы [12]. Титан имеет азотную атмосферу, которая в расчете на 1 г вещества планеты в 10 раз массивнее земной. Отсутствие в его атмосфере заметного количества первичных инертных газов показывает, что этот азот должен был образовываться из таких молекул, как  $\text{NH}_3$ , а не из  $\text{N}_2$ , и установление этого факта являлось одной из конкретных задач проекта [13]. Причина здесь заключается в том, что захват молекул  $\text{N}_2$  твердыми частицами, образующими Титан, говоря более конкретно, его ледовой составляющей, также неизбежно сопровождался бы захватом молекул тяжелых инертных газов. Напротив, соединения типа молекул  $\text{NH}_3$  должны были испаряться, и в результате их фотодиссоциации могли образоваться наблюдаемые сейчас молекулы  $\text{N}_2$  [14]. Существующие верхние пределы отношения обилий  $\text{Xe}/\text{N}$  на порядки величины ниже земных значений, которые, в свою очередь, гораздо меньше соответствующего значения на Солнце.

Как это понять? Простейшее объяснение состоит в том, что ледяные планетезимали Титана формировались в теплом окружении ( $T > 75 \text{ K}$ ), и в этом случае благородные газы не захватывались бы в форме клатратов и не адсорбировались бы твердыми частицами. Тогда точно также не захватились бы молекулы  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$ , а молекулы  $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$  сконденсировались бы в виде льда вместе с  $\text{H}_2\text{O}$ . В таком случае молекулы  $\text{CH}_4$  могли бы образоваться внутри твердых частиц, поскольку свободный водород может выделяться из пород в результате серпентизации воды, а углерод может взаимодействовать с водородом путем реакций типа Фишера – Тропша и в результате редукции карбонов. Метан также частично мог бы образоваться при нагреве макромолекулярного углерода, оставшегося на Титане от планетезималей, из которых он сформировался. Как было предложено в работе [15],  $\text{CO}$  впоследствии мог образоваться при взаимодействии молекул  $\text{OH}$  с  $\text{CH}_4$ .

### 4.3. Изотопы

Хотя первичные благородные газы не были обнаружены в атмосфере Титана, изотоп  $^{40}\text{Ar}$ , который рождается в результате радиоактивного распада  $^{40}\text{K}$ , был надежно зарегистрирован. Он был обнаружен масс-спектрометром ионов и нейтралов с борта орбитальной станции "Кассини" при ее прохождении через верхнюю атмосферу Титана [16], и его наличие подтверждено измерениями спектрометра GCMS на спускаемом аппарате "Гюйгенс". Присутствие этого газа не стало неожиданностью, так как половина массы скальных пород Титана должна содержать калий. Измеренное содержание этого изотопа оказалось меньше максимального значения, соответствующего такой массе скальных пород [17, 18], что может просто отражать сложность проникновения газа из толщи породы на поверхность. Такая затрудненная дегазация может также объяснить отсутствие значительного количества  $\text{CH}_4$  в атмосфере Титана.

В результате наблюдений с Земли было найдено, что большая часть изотопов азота на Титане находится в молекулах  $\text{HCN}$  (примерно в 4 раза больше, чем в других формах), что говорит об испарении его массивной атмосферы на ранних стадиях эволюции. Однако по данным масс-спектрометра "Кассини-Гюйгенс" дефицит изотопа  $^{14}\text{N}$  в молекулах  $\text{N}_2$  гораздо

меньше, что приводит к оценке отношения  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N} \sim 1,5 \times (^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{Терр}}$ . Поскольку земное значение этого отношения является репрезентативным для всех изотопов азота во всех соединениях, а в молекулах  $\text{NH}_3$  — для всей солнечной системы [19], то представляется правомерным использовать его для сравнения с другими величинами. В результате мы ожидаем, что на масштабах геологических времен масса атмосферы Титана уменьшилась примерно в 5 раз.

Этот вывод согласуется с недостатком изотопа  $^{16}\text{O}$  в молекулах  $\text{CO}$  [19], что несколько удивительно ввиду притока  $\text{O}$  в виде молекул  $\text{H}_2\text{O}$  из внешней атмосферы Титана.

В отличие от такого большого дефицита легких изотопов, отношение  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  согласуется в пределах 10 % с земным значением [16]. Этот результат особенно подчеркивает необходимость существования источника молекул  $\text{CH}_4$  в атмосфере Титана. Как упоминалось выше,  $\text{CH}_4$  постоянно разрушается в фотохимических реакциях в верхней атмосфере Титана, так что его современное количество исчезнет примерно за 20 млн лет [3]. Если метан, который наблюдается сегодня, является остатком гораздо большего количества этого газа, который к настоящему времени почти исчез, отношение изотопов углерода в молекулах  $\text{CH}_4$  должно быть близким к тому, что измеряется для азота и кислорода. Поскольку этого не наблюдается, метан должен постоянно возобновляться. Требование источника возобновления молекул метана вместе с учетом наличия изотопа  $^{40}\text{Ar}$  в атмосфере Титана означает, что на Титане в каком-то виде должна присутствовать геологическая активность. Дальнейшие орбитальные наблюдения за Титаном, включая съемку поверхности и спектроскопические измерения, могут обнаружить конкретные следы этой активности.

## 5. Заключение

Как подчеркивалось во введении, мы находимся на начальной стадии обработки данных, полученных аппаратом "Кассини-Гюйгенс", и много новых данных должно быть получено в течение ближайших трех лет работы аппарата на орбите. Но уже сейчас ясно, что Титан является удивительным миром сам по себе, и его изучение потенциально может оказаться весьма ценным для понимания происхождения и эволюции атмосферы нашей планеты.

При различных попытках распространить результаты исследования Титана на проблему происхождения жизни на Земле должны приниматься во внимание крайне низкая температура на Титане и, следовательно, отсутствие воды как в жидком, так и газообразном состоянии. Таким образом, на Титане не только нет никакой возможности изучать химию водных растворов (знаменитый дарвиновский "маленький теплый пруд"), но даже не существует сколько-нибудь значительного резервуара кислорода, который является ключевым элементом земной биохимии. Тем не менее понимание химии органических соединений на Титане, несомненно, поможет при анализе химических реакций, которые происходили на Земле еще до возникновения жизни.

**Благодарности.** Т. Оуэн благодарит Л.М. Зеленого за приглашение прочесть этот доклад. Авторы благодарят

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