



*Настоящее издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментального исследования
(проект № 07-05-07047)*

Кусков Олег Львович, Дорофеева Вера Алексеевна,
Кронрод Виктор Александрович, Макалкин Андрей Борисович

Системы Юпитера и Сатурна: Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников / Отв. ред. М. Я. Маров. — М.: Издательство ЛКИ, 2009. — 576 с.

Монография посвящена исследованию проблем формирования, внутреннего строения и химической дифференциации тел внешней части Солнечной системы, где водяной лед вместе с другими видами льдов (метановым, аммиачным, углекислым и пр.) становится главной составляющей спутников планет-гигантов, ледяных карликовых планет и астероидов, расположенных за орбитой Нептуна, а также комет. Приведена новейшая информация по системам Юпитера и Сатурна, полученная КА «Галилео» и «Кассини-Гюйгенс», астрофизические данные о газопылевых дисках вокруг звезд солнечного типа, внесолнечных планетных системах, и основанные на них современные представления об образовании и эволюции планетных тел. Дан критический обзор космохимических, геологических, геофизических и астрономических данных относительно объектов внешней части Солнечной системы. Вниманию читателей предлагаются разработанные авторами модели происхождения, состава и внутреннего строения спутников планет-гигантов. Обсуждаются интригующие проблемы, связанные с возможностью существования приповерхностных океанов под ледяной корой Европы, Ганимеда, Каллисто, Титана и Энцелада, металлических ядер в недрах ледяных спутников Юпитера и Сатурна, вулканическая активность Ио и происхождение мощной атмосферы Титана.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, аспирантов и студентов — геохимиков, геофизиков, космохимиков и астрономов, занимающихся проблемами эволюции и строения тел Солнечной системы, а также может служить справочным пособием для научных работников.

Издательство ЛКИ. 117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 9.
Формат 60×90/16. Печ. л. 36. Зак. № 61

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Полиграфический комбинат «Зауралье». 640022, Курган, ул. К. Маркса, 106.

ISBN 978-5-382-00986-5

© Издательство ЛКИ, 2009



4992 ID 67002



9 785382 009865

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

Оглавление

Предисловие редактора (М. Я. Маров)	9
Предисловие	18

Часть I Формирование регулярных спутников Юпитера и Сатурна 29

Глава 1. Строение и состав тел внешней солнечной системы	30
1.1. Планеты-гиганты и их спутники	30
1.2. Плутон — планета или транснептуновый объект?	35
1.3. Транснептуновые объекты и кентавры	36
1.4. Кометы и межпланетная пыль	40
1.5. Межзвездные облака и межзвездная пыль	45
1.6. Химический и фазовый состав межзвездных молекулярных облаков и протопланетного околосолнечного диска в зоне образования планет-гигантов	48
1.7. Заключение	56

Глава 2. Эволюция газопылевого околосолнечного диска; образование пылевых сгущений и допланетных тел 57

2.1. Образование Солнечной системы в свете новых астрономических данных об образовании и эволюции околозвездных протопланетных дисков	57
2.2. Особенности моделирования аккреционного околосолнечного диска	65
2.3. Моделирование термических условий в околосолнечном протопланетном диске	68
2.3.1. Входные параметры модели	71
2.3.2. Постановка задачи. Основные уравнения	73
2.3.3. Результаты моделирования термических условий в околосолнечном протопланетном диске	79
2.4. Эволюция газопылевого околосолнечного диска; образование пылевых сгущений и рост планет	87

2.4.1. Поведение пылевых частиц, образование и эволюция пылевого слоя в газопылевом околосолнечном диске	87
2.4.2. Расчет температуры в пылевом слое. Постановка задачи и основные уравнения	96
2.4.3. Результаты моделирования $T-P$ -условий в пылевом слое протопланетного диска	99
2.4.4. Образование пылевых сгущений и допланетных тел	103
2.4.5. Рост допланетных тел и образование планет	105
2.5. Заключение	108

Глава 3. Юпитер и Сатурн. Строение, состав атмосфер, источники летучих

3.1. Атмосферы Юпитера и Сатурна: состав, строение, особенности	110
3.2. Состав ледяных планетезималей в зоне образования планет-гигантов	117
3.3. Внутреннее строение Юпитера и Сатурна. Ограничения на валовый химический состав планет-гигантов	122
3.4. Образование Юпитера и Сатурна	129
3.5. Особенности формирования атмосфер планет	133
3.6. Заключение	139

Глава 4. Образование регулярных спутников Юпитера и Сатурна в околопланетных аккреционных дисках

4.1. Протоспутниковые аккреционные диски Юпитера и Сатурна. Обзор современных моделей. Обоснование выбора модели	141
4.2. Модели аккреционных протоспутниковых дисков Юпитера и Сатурна: основные уравнения и входные параметры	152
4.3. Космохимические ограничения на входные параметры моделей протоспутниковых дисков Юпитера и Сатурна	161
4.4. Оценка радиальной миграции регулярных спутников Юпитера и Сатурна	164
4.5. Протоспутниковые диски Юпитера и Сатурна. Результаты построения моделей	165
4.5.1. Оценка вклада различных источников в нагрев протоспутниковых дисков	165
4.5.2. Обзор рассчитанных двумерных моделей протоспутниковых дисков, удовлетворяющих космохимическим и физическим ограничениям	168

4.5.3. Распределения температуры и влияние вариаций входных параметров в моделях протоспутниковых дисков	171
4.5.4. Распределение давления, объемной и поверхностной плотности в дисках	179
4.6. Обсуждение результатов и выводы	184

Часть II

Химическая дифференциация и внутреннее строение крупных спутников

Глава 5. Фазовые равновесия и физические свойства минеральных систем при высоких давлениях	199
5.1. Основные термодинамические соотношения	200
5.2. Уравнение состояния минералов при высоких давлениях	203
5.3. Термодинамические свойства твердых растворов	208
5.4. Сейсмические свойства фазовых ассоциаций	212
5.5. Моделирование равновесных фазовых ассоциаций	216
5.6. Приложение термодинамического подхода к моделированию внутреннего строения верхней мантии Земли	227
5.7. Заключение	241

Глава 6. Моделирование химического состава и внутреннего строения крупных спутников

6.1. Введение	243
6.2. Геолого-геофизические характеристики спутников: общий обзор	244
6.3. Фазовая диаграмма H_2O и полиморфные модификации водяного льда	256
6.4. Реологические свойства льда	265
6.5. Основные положения моделей внутреннего строения спутников	272
6.6. Геохимические ограничения на состав спутников	278
6.7. Модели состава ядер планетарных тел	283
6.8. Заключение	290

Глава 7. Внутреннее строение Ио

7.1. Геолого-геофизические ограничения на модели Ио	291
7.2. Распределение плотности в мантии и размеры ядра	297

7.3. Космохимические ограничения на модели Ио	301
7.4. Оценка отношений Fe_{tot}/Si , Fe_m/Fe_{tot} и валового состава Ио	306
7.5. Заключение и выводы	307
Глава 8. Внутреннее строение Европы	310
8.1. Геолого-геофизическая информация	310
8.2. Геофизические и космохимические ограничения на модели Европы	313
8.3. Модели строения Европы по геофизическим данным	315
8.4. Модели строения Европы по геохимическим данным	317
8.5. Анализ моделей внутреннего строения Европы	326
8.6. Водно-ледяная оболочка Европы	331
8.7. Заключение и выводы	335
Глава 9. Внутреннее строение Ганимеда	337
9.1. Модели строения и тепловой эволюции Ганимеда до полетов «Галилео»	337
9.2. Геофизические и космохимические ограничения на модели Ганимеда	339
9.3. Современные модели внутреннего строения Ганимеда	343
9.3.1. Модели с водно-ледяной оболочкой	345
9.3.2. Модели с ледяной оболочкой	349
9.4. Заключение и выводы	350
Глава 10. Внутреннее строение Каллисто	353
10.1. Степень дифференциации Каллисто по геолого-геофизическим данным	353
10.2. Особенности внутреннего строения Каллисто	358
10.3. Строение водно-ледяной оболочки Каллисто	362
10.4. Современные модели внутреннего строения Каллисто	371
10.4.1. Модели с внутренним океаном	373
10.4.2. Модели с ледяной оболочкой	375
10.5. Заключение и выводы	381
Глава 11. Изохимические модели галилеевых спутников	383
11.1. Введение	383
11.2. Внутреннее строение железокаменных ядер спутников	385
11.3. Гипотеза изохимичности состава спутников	387
11.4. Модели спутников	389
11.5. Распределение температуры и физических параметров	390

11.6. Состав и внутреннее строение спутников при условиях изохимичности	391
11.7. Заключение и выводы	396
Глава 12. Сравнительные характеристики планет и спутников	398
12.1. Химический состав и внутреннее строение Луны	399
12.1.1. Геолого-геофизическая информация о строении Луны	399
12.1.2. Моделирование состава и внутреннего строения Луны	412
12.1.3. Мантия Луны: состав, строение, свойства	416
12.1.4. Ядро Луны	434
12.2. Геохимические характеристики Луны и Земли	438
12.3. Геохимические характеристики Ио и Марса	448
12.4. Заключение и выводы	451
Глава 13. Фракционирование вещества в Солнечной системе	455
13.1. Общая характеристика процессов фракционирования	455
13.2. Содержание H_2O в галилеевых спутниках	460
13.3. Отношение Fe_{tot}/Si и обедненность галилеевых спутников железом	464
13.4. Заключительные замечания	472
Глава 14. Спутники Сатурна — Титан и Энцелад	476
14.1. Экспериментальные данные по исследованию Титана космической миссией «Кассини—Гюйгенс»	476
14.1.1. Стратосфера и верхняя атмосфера Титана	476
14.1.2. Поверхность Титана	479
14.1.3. Атмосфера Титана	480
14.2. Происхождение атмосферы Титана. История вопроса и эволюция представлений	485
14.3. Модели образования Титана и его атмосферы	488
14.3.1. Модель образования Титана в теплом протоспутниковом диске Сатурна	489
14.3.2. Модель образования Титана в холодном протоспутниковом диске Сатурна	491
14.3.3. Модель с эндогенным источником метана в атмосфере Титана	493
14.3.4. Модель с поверхностным источником метана в атмосфере Титана	495

14.4. Энцелад — регулярный спутник Сатурна. Экспериментальные данные «Кассини»	496
14.5. Происхождение атмосфер Титана и Энцелада. Предварительные выводы	500
14.6. Модели внутреннего строения Титана и Энцелада	502
14.7. Заключительные замечания	508
Заключение	510
Глоссарий. Список часто употребляемых терминов	516
Литература	525

Предисловие редактора

В динамике небесных тел, населяющих Солнечную систему (планет, их спутников, малых тел), наряду с характерными природными особенностями проявляются определенные общие закономерности, обусловленные единым процессом происхождения и последующей эволюции Солнечной системы. Поэтому чрезвычайно важно попытаться сопоставить то, что нам известно о природных явлениях на Земле и о системе Земля—Луна, обусловленных, в частности, небесно-механическими факторами, с другими объектами Солнечной системы — планетами и их спутниками, включая взаимодействие с малыми телами — кометами и астероидами.

Детально разработанные и широко применяемые точные и приближенные аналитические методы небесной механики позволяют находить решения задач определения орбит и их эволюции, в том числе устанавливать области устойчивости и неустойчивости решений для различных классов движений. Наибольшее распространение за последние десятилетия получили методы прямого численного интегрирования, которые, наряду с численно-аналитическими методами, оказались наиболее эффективными для исследования происхождения, эволюции и внутреннего строения тел Солнечной системы. В частности, они привели к выводу, что орбиты планет, обладающие малыми эксцентриситетами и наклонениями, лишь слабо хаотичны и не имеют сколь-нибудь заметной вековой составляющей на временных интервалах, сопоставимых с возрастом Солнечной системы. Наиболее сильную хаотизацию испытывают орбиты комет, с чем связаны сложности прогноза их движений и точного определения эфемерид.

В монографии открывается возможность существенно расширить наши представления о телах внешней части Солнечной системы. Эффективность сравнительно-планетологического подхода особенно наглядно проявляется при изучении многочисленного семейства спутников планет-гигантов, происхождение, внутренняя структура и свойства орбит которых существенно зависят от физико-химических особенностей газопылевых аккреционных дисков планет и в значительной степени определяются приливными взаимодействиями.

Особое внимание привлекают, прежде всего, галилеевы спутники Юпитера — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто, — которые образовались, вероятно, одновременно с самой планетой вблизи нее и в дальнейшем увеличили свои радиальные расстояния вследствие приливного воздействия Юпитера, а также Титан с его азотно-метановой атмосферой. Теория движения галилеевых спутников обладает характерной осо-

Глава 14

Спутники Сатурна — Титан и Энцелад

14.1. Экспериментальные данные по исследованию Титана космической миссией «Кассини—Гюйгенс»

В обзорах (Моррисон и др., 1990; Бернс, 1990) суммированы основные физические характеристики о 17 известных в конце XX столетия спутниках Сатурна. В настоящее время обнаружено более 150 регулярных и нерегулярных спутников планет, а в системе Сатурна — 60. Из всех спутников Титан и Энцелад являются уникальными, поскольку только они обладают собственными атмосферами.

Титан был открыт голландским физиком и астрономом Х. Гюйгенсом в 1655 г. Самый большой спутник Сатурна, Титан по своим размерам (диаметр 5150 км, средняя плотность $1,88 \text{ г}/\text{см}^3$) и, возможно, по валовому составу подобен Ганимеду и Каллисто. Температура на поверхности Титана $\sim -180^\circ\text{C}$. Основное различие между этими спутниками состоит в наличии плотной атмосферы, сохранившейся на Титане (открытой голландско-американским астрономом Петером Койпером в 1944 г.).

До пролетов КА «Вояджер» рассматривались две крайние модели состава атмосферы Титана: чисто метановая, источником которой служат моря или даже океаны глубиной в сотни метров, состоящие из CH_4 или смеси углеводородов (Люин и др., 1983) или азотная с малой примесью метана (Хантен, 1980; Моррисон и др., 1990). По результатам исследований «Вояджера-1» и «Вояджера-2» стало очевидным, что атмосфера спутника является преимущественно азотной с малым содержанием метана и некоторых других газов (Coustenis, Bézard, 1995; Lellouch et al., 1989; Samuelson, 2003). В наши дни Титан, который оставался все последующие годы одним из главных объектов изучения, стал основной целью экспедиции «Кассини—Гюйгенс».

14.1.1. Стратосфера и верхняя атмосфера Титана

К этому крупнейшему спутнику Сатурна 15 октября 1997 г. с мыса Канаверал (Флорида, США) ракетоносителем Titan 4B/Centaur был запущен американо-европейский орбитальный аппарат «Кассини—Гюйгенс». Основные задачи этой космической одиссеи — исследование атмосферы,

магнитосферы и колец Сатурна и системы его ледяных спутников. Важнейшая цель экспедиции — изучение атмосферы Титана, которая предположительно подобна атмосфере ранней Земли. «Кассини—Гюйгенс» — международный проект: НАСА построила орбитальный аппарат «Кассини» и управляет полетом, а Европейское космическое агентство разработало зонд «Гюйгенс», названный в честь первооткрывателя Титана; общая стоимость экспедиции — около 3 млрд \$ (Лунин, 2004). Орбитальный аппарат «Кассини», созданный в Лаборатории реактивного движения (Калифорния), получил имя в честь франко-итальянского ученого XVII в. Жана-Доминика Кассини, открывшего четыре спутника Сатурна и основной промежуток в его кольцах — деление Кассини.

Спустя семь лет, проделав два гравитационных маневра вокруг Венеры и по одному около Земли и Юпитера, космический аппарат вышел на орбиту вокруг Сатурна, где он выпустил зонд «Гюйгенс», который 14 января 2005 г. совершил мягкую посадку на поверхность Титана. Вся двухсоткилометровая толща его атмосферы была пройдена за два с половиной часа, при этом с помощью газового хроматомасс-спектрометра (GCMS) на разных высотных уровнях анализировался ее состав. Зонд был также оснащен аппаратурным комплексом для измерения ряда физических параметров атмосферы и изучения свойств поверхности Титана.

В результате впервые были получены изображения поверхности Титана, которые ранее путем дистанционных наблюдений получить было невозможно. Дело в том, что в верхней части атмосферы Титана, начиная с высоты ~ 1000 км (Waite et al., 2007) и вплоть до $h \approx 50$ км (Kim et al., 2005), существуют несколько оптически непрозрачных аэрозольных слоев — атмосферная дымка (haze). Они состоят в основном из сложных органических соединений, содержащих углерод (до 7 атомов углерода и более), водород, а иногда и азот. Из-за сложности и многообразия составляющих компонентов, они объединены общим названием толины (от греческого — «грязь»). До этого времени подобные соединения, которые могут свидетельствовать о возможности возникновения органической жизни, находили лишь на Земле. Однако в начале 2008 г. группа астрономов университета Карнеги сообщила, что толины впервые были обнаружены вне пределов Солнечной системы — в созвездии Центавра.

Соединения, входящие в состав толинов, вероятнее всего образуются в результате разложения метана и азота под воздействием ультрафиолетового солнечного излучения. Кроме того, их образование, возможно, связано с воздействием солнечного ветра на верхние слои атмосферы. Образующийся в фотохимических реакциях свободный водород покидает поле тяготения спутника, формируя водородное кольцо вокруг Сатурна.

Состав толинов ранее изучался как по данным «Вояджера», так и по данным наземных наблюдений (Hanel et al., 1981; Coustenis, Bézard, 1995; Coustenis et al., 2003). Но с помощью инфракрасного спектрометра «Кассини» (CIRS — Composite InfraRed Spectrometer) он был изучен наиболее

детально. Измерены вертикальные профили обилий C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CH_3C_2H , C_3H_8 , C_4H_2 , C_6H_6 и HCN в интервале высот ~ 500 – 100 км (Teanby *et al.*, 2006; Vinatier *et al.*, 2007; Teanby *et al.*, 2007). Показано, что характер распределения по высоте C_2H_2 , C_2H_6 , C_3H_8 и HCN согласуется с моделями их образования в верхней атмосфере.

Помимо углеводородов в стратосфере Титана на высотах ниже 200 км были обнаружены CO — $(4,5 \pm 1,5) \times 10^{-5}$ (Wilson, Atreya, 2004; Baines *et al.*, 2006) и CO_2 — $(1,6 \pm 0,2) \times 10^{-5}$ (de Kok *et al.*, 2007). Там же сообщается, что на этих высотах H_2O не была зафиксирована (с точностью 0,9 ppb). Сухость атмосферы Титана — одна из характерных ее особенностей.

Большое значение имело обнаружение на высотах от 100 км (10 мбар) и ниже, помимо чистых углеводородов, азот-содержащих углеводородов — HCN, HC_3N и C_2N_2 (Kim *et al.*, 2005; Teanby *et al.*, 2006). Установлено, что относительное содержание HCN зависит от широты и составляет в экваториальной области $1,5 \times 10^{-7}$, увеличиваясь к северу до 6×10^{-7} (Teanby *et al.*, 2007). С приближением к северному полюсу увеличивается также относительное содержание HC_3N . Отметим, что присутствием органических соединений, включающих в себя атомы азота, объясняется характерный оранжевый цвет Титана, каким его видно из космоса, а также оранжевый цвет его поверхности. Известно, что цианиды — важнейшие составляющие в дебиологической органической химии на ранней стадии развития Земли. Их обнаружение на Титане обусловило огромный интерес к спутнику экзобиологов как к одному из самых перспективных объектов.

Были изучены динамические процессы, протекающие в атмосфере Титана. Установлено, что в нижней части его атмосферы постоянно дуют ветры. Их направление совпадает с направлением вращения спутника, а скорость растет с высотой от нескольких метров в секунду на высоте 10–30 км до 30 м/с на высоте 50–60 км. На высотах более 120 км имеет место сильная турбулентность атмосферы — ее признаки были замечены еще в 1980–1981 гг., когда через систему Сатурна пролетали космические аппараты «Вояджер». Однако неожиданностью стало то, что на высоте около 80 км в атмосфере Титана зарегистрирован штиль — сюда не проникают ни ветры, дующие ниже 60 км, ни турбулентные движения, наблюдаемые вдвое выше. Причины такого странного замятия движений пока не удаётся объяснить.

При изучении температурного профиля атмосферы Титана оказалось, что в верхних слоях $T \sim 150$ К, в то время как на поверхности она составляет 94 К или — 179°C (Fulchignoni *et al.*, 2005). Давление атмосферы

и газообразном. Это обстоятельство позволяет предполагать существование на поверхности спутника жидкого метана.

Действительно, снимки, полученные с высоты 16 км, отчетливо показывают систему каналов, впадающих в огромный темный «бассейн», предположительно содержащий жидкий CH_4 . Кроме того, как отмечается (Оуэн и др., 2005), сразу после посадки аппарата «Гюйгенс» на поверхность Титана газовый хроматомасс-спектрометр (GCMS) зарегистрировал резкий скачок обилия газообразного метана, который означал выброс этого газа, возможно в результате испарения жидкого CH_4 с поверхности или приповерхностных слоев спутника при их нагреве вблизи горячего выпускного отверстия прибора GCMS. Это приблизительно $\sim 30\%$ -е увеличение содержания метана наблюдалось около часа, а затем уменьшилось. Особенno стоит отметить, что содержание азота при этом не изменилось.

Наконец, на полученных изображениях отчетливо виден плотный слой метановых облаков, расположенных на высоте нескольких десятков километров. С помощью спектрометра (GCMS) и радиометра (Descent Imager/Spectral Radiometer) метановый аэрозоль был обнаружен на самых низких уровнях атмосферы спутника, вплоть до самой его поверхности (Tomasko *et al.*, 2005), что позволяет говорить о метановых дождях, которые идут на Титане (Tokano *et al.*, 2006).

14.1.2. Поверхность Титана

Изучение поверхности Титана проводилось с помощью радиолокационной системы Cassini Radar Mapper во время четырех сближений со спутником в период с октября 2004 г. по октябрь 2005 г. (Elachi *et al.*, 2005; Elachi *et al.*, 2006; Stofan *et al.*, 2006). Полученные изображения свидетельствуют о том, что его поверхность молодая, с несколькими большими ударными кратерами, и имеет сложный рельеф. На поверхности обнаружены различные геологические структуры в виде русел рек, извилистых каналов, дюн и куполов, возможно, вулканического происхождения.

Прямого подтверждения существованию вулканических процессов на Титане пока не обнаружено, хотя надежда на это неоднократно высказывалась (Sotin *et al.*, 2005; Grindrod *et al.*, 2006), но косвенные данные все же существуют. Так, в работе (Roe *et al.*, 2005) сообщается, что расположение и строение облаков, наблюдавшихся над южным полярным регионом, позволяет предположить, что их происхождение связано с извержением метана гейзером или вулканом. Результаты наблюдения за отражательной способностью в ближнем ИК спектре участка поверхности Титана площадью ~ 2800 км 2 , проводившиеся в период с июля 2004 г. по март 2005 г. или вулканом. Результаты

верхности спутника, связанного с текущей тектонической активностью, а именно, с криовулканализмом.

По оценке (Lopes *et al.*, 2007) криомагма, вероятнее всего, представляла собой подобие глинистой суспензии (slurry), предположительно состоящей из аммиака и воды, а возможно, и метанола. Масштабы криовулканализма пока не определены, так как исследована лишь малая доля поверхности спутника. Тем не менее полученный вывод очень важен, поскольку позволяет предполагать существование внутреннего источника происхождения компонентов атмосферы Титана (Sotin *et al.*, 2005; Elachi *et al.*, 2005; Porco *et al.*, 2005; Tomasko *et al.*, 2005; West *et al.*, 2005; Elachi *et al.*, 2006). Необычны и физические свойства поверхности. Так, в месте посадки зонда «Гюйгенс», по данным (Zarnecki *et al.*, 2005), поверхность оказалась не твердой, и, скорее, по своей консистенции напоминала гидросмесь (slurry) типа мокрого песка, через которую могут просачиваться газы.

Долгое время существовало представление о том, что поверхность Титана целиком покрыта жидкими углеводородами — метаном, возможно, смешанным с этаном (Griffith *et al.*, 2000; Lellouch *et al.*, 2004). Результаты миссии «Кассини—Гюйгенс» (Sotin *et al.*, 2005; Elachi *et al.*, 2005; Porco *et al.*, 2005; Tomasko *et al.*, 2005) и наземных наблюдений (West *et al.*, 2005) свидетельствуют, что исследованная часть поверхности Титана сухая. Однако, согласно недавно опубликованным исследованиям (Lunine, *et al.*, 2006; Stefan *et al.*, 2007), севернее 70-й широты радар «Кассини» обнаружил структуры размером от 3-х до 170-ти километров в диаметре, по отражательной способности и морфологическим признакам идентифицированные как озера. Предполагается, что некоторые из них частично заполнены либо жидкими углеводородами — метаном или этаном, либо твердыми соединениями — льдом CO₂ или клатратами метана. Кроме того, с помощью спектрометра VIMS (Visual and Infrared Mapping Spectrometer) на поверхности Титана были идентифицированы ряд ароматических и алифатических углеводородов, в частности бензол (C₆H₆) и ацетилен (C₂H₂) (Clark *et al.*, 2006). Таким образом, в настоящее время имеются основания полагать, что на поверхности Титана существуют участки, покрытые жидкими углеводородами.

14.1.3. Атмосфера Титана

Весьма подробно с помощью газового хроматомасс-спектрометра был исследован состав атмосферы Титана (Niemann *et al.*, 2005; Owen, 2005). Она состоит в основном из молекулярного азота (98–95 %) и метана, содержание которого увеличивается по мере уменьшения высоты. Так, по данным (Niemann *et al.*, 2005) мольная доля CH₄ в стратосфере ($h = 140$ км) составляет $(1,41 \pm 0,07) \times 10^{-2}$, а вблизи поверхности $\text{CH}_4 / (\text{CH}_4 + \text{N}_2) = (4,9 \pm 0,25) \times 10^{-2}$. Близкие значения содержания метана были получены и с помощью установленного на борту «Кассини» прибора SSP (Surface

14.1. Экспериментальные данные КА «Кассини—Гюйгенс»

Science Package): $\approx 2\%$ на высоте 10 км и увеличение до 3,5 % ниже этого уровня (Hagermann *et al.*, 2007).

Большое значение для понимания происхождения Титана и его атмосферы имеют полученные «Кассини» величины изотопных отношений D/H, ¹⁴N/¹⁵N и ¹²C/¹³C, содержаний радиогенного ⁴⁰Ar, первичного ³⁶Ar и других нерадиогенных изотопов (Niemann *et al.*, 2005).

Так, значение ¹⁵N/¹⁴N = $(5,5 \pm 0,15) \times 10^{-3}$ в молекуле N₂ свидетельствует о значительном (в 2,5 раза) обеднении современной атмосферы Титана легким изотопом ¹⁴N по сравнению с атмосферой Юпитера, для которой ¹⁵N/¹⁴N в молекуле NH₃ = $(2,22 \pm 0,52) \times 10^{-3}$ (Fouchet *et al.*, 2004). Такое обеднение могло быть обусловлено целым рядом причин, основная из которых — потеря Титаном значительного количества легкого азота (¹⁴N) в результате его диссипации.

Относительное обеднение легким изотопом ¹²C атмосферы Титана оказалось значительно меньше, чем легким изотопом ¹⁴N. В молекуле метана ¹²C/¹³C = $82,3 \pm 1$ (Niemann, 2005), что лишь на $\sim 10\%$ ниже, чем ¹²C/¹³C = $92,6 \pm 4,3$ в атмосфере Юпитера (Niemann *et al.*, 1998). Такое же значение ¹²C/¹³C было получено для молекулы дейтерированного метана (¹³CH₃D и ¹²CH₃D) в верхней атмосфере спутника ¹²C/¹³C = 82^{+27}_{-18} (Bezard *et al.*, 2007). Это может свидетельствовать о том, что метан в атмосфере Титана в своей истории не претерпел такого изотопного фракционирования, как N₂.

В то же время, учитывая скорость фотохимического разложения CH₄, которая оценивается в 10–20 млн лет (Lebreton *et al.*, 2005), можно полагать, что Титан аккрецировал значительно больше углерода, чем в настоящее время находится в его атмосфере. Есть еще один аргумент, на который обращается внимание Оуэном и др. (2005). Распространенность углерода на Солнце (Grevesse *et al.*, 2007) и в атмосферах Юпитера и Сатурна (табл. 3.2) в 4–6 раз выше, чем азота. В кометах соотношение C/N ≈ 6 (табл. 1.6), при этом до 50 % углерода находится в форме твердых органических соединений. Трудно предположить, что это соотношение в ледяных планетезималях, аккрецированных Титаном, было иным и он изначально аккумулировал углерода меньше, чем азота.

Из этого сравнения, а также с учетом небольшого отклонения значения ¹²C/¹³C от юпитерианского значения делается вывод, что на Титане

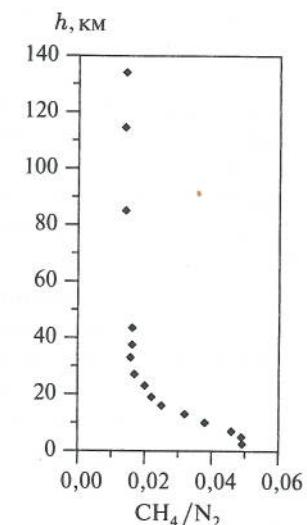


Рис. 14.1. Мольное отношение CH_4 / N_2 , экспериментально измеренное зондом «Гюйгенс», на различных высотах атмосферы Титана (Niemann *et al.*, 2005)

существует огромный резервуар углерода, соответствующий по массе его плотной азотной атмосфере. Столько углерода не может находиться в виде аэрозолей и вряд ли находится на поверхности спутника. Скорее всего, Титан обладает внутренним резервуаром углерода, постоянно пополняющим его атмосферу молекулами CH_4 .

Из всех инертных газов в атмосфере Титана количественно определены были лишь первичный легкий изотоп аргона ^{36}Ar , с мольной долей $(2,8 \pm 0,3) \times 10^{-7}$ и радиогенный ^{40}Ar , мольная доля которого составляет $^{40}\text{Ar}/(\text{N}_2 + \text{CH}_4) = (4,32 \pm 0,1) \times 10^{-5}$ (Niemann, 2005). Присутствие в атмосфере Титана радиогенного ^{40}Ar , который образуется при распаде ^{40}K , входящего в силикатную составляющую спутника, свидетельствует о дегазации его глубоких недр. Возможно, она происходила в период формирования спутника, как это предполагается в модели (Tobie et al., 2005c), а возможно и позднее. Что касается остальных инертных газов (^{38}Ar , ^{84}Kr , ^{132}Xe), то газовый хроматомасс-спектрометр зонда «Гюйгенс» не зафиксировал их присутствие в атмосфере Титана при чувствительности прибора 10^{-8} . Необходимо отметить, что эти результаты не были предсказаны ранее одной моделью образования Титана и находятся в противоречии с данными по содержанию инертных газов в атмосфере Юпитера (см. табл. 3.2). Космохимические следствия этого результата обсуждаются в следующем разделе.

В ходе эксперимента «Кассини—Гюйгенс» были проведены измерения еще одного важнейшего изотопного соотношения — D/H, с помощью которого можно было бы проверить, например, гипотезу о кометном происхождении воды на Земле. Однако полученные результаты имеют большие расхождения и не согласуются с данными последних по времени наземных измерений.

Так, наземные измерения изотопного состава атмосферы Титана (Penteado et al., 2005) дали значение D/H в молекуле CH_4 $D/\text{H}_{\text{CH}_4} = (1,25 \pm 0,25) \times 10^{-4}$. Предварительные результаты D/H, полученные «Кассини» также для молекулы метана в верхней атмосфере спутника, несколько ниже: $D/\text{H}_{\text{CH}_4} = 1,17_{-0,21}^{+0,16} \times 10^{-4}$ (Cousenit et al., 2007). С другой стороны, масс-спектрометр GCMS, находящийся на борту зонда «Гюйгенс», определил более высокое отношение D/H, но в молекуле водорода (1/2 HD/H_2), происхождение которого связано с фотодиссоциацией все того же метана: $D/\text{H}_{\text{H}_2} = (2,3 \pm 0,5) \times 10^{-4}$ (Niemann et al., 2005). Близкое значение было получено для молекулы CH_4 в стратосфере Титана: $D/\text{H}_{\text{CH}_4} = (1,32_{-0,11}^{+0,15}) \times 10^{-4}$ с помощью инфракрасного спектрометра (CIRS) «Кассини» (Bezard et al., 2007). Поэтому данные результаты можно считать предварительными. Сравнение полученных изотопных соотношений для атмосферы Титана и Земли приведено в табл. 14.1. То же, но относительно содержания на Солнце — в табл. 14.2.

14.1. Экспериментальные данные КА «Кассини—Гюйгенс»

Таблица 14.1
Значения изотопных отношений в атмосфере Титана

Отношение	Определение	Высота, км	Титан/Земля
$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ (в N_2)*	183 ± 5	40,9–35,9	0,67
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ в молекуле CH_4 *	$82,3 \pm 1$	18,2–6,14	0,915
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ в молекуле CH_3D^{**}	82_{-18}^{+27}	стратосфера	0,912
$^{36}\text{Ar}/(\text{N}_2 + \text{CH}_4)^*$	$(2,8 \pm 0,3) \times 10^{-7}$	75–77	$7,0 \times 10^{-3}$
$^{40}\text{Ar}/(\text{N}_2 + \text{CH}_4)^*$	$(4,32 \pm 0,1) \times 10^{-5}$	от 18 до поверхности	$3,61 \times 10^{-3}$
D/H в молекуле H_2 *	$(2,3 \pm 0,5) \times 10^{-4}$	124,9–66,8	1,44
D/H в молекуле CH_4 ***	$1,17_{-0,21}^{+0,16} \times 10^{-4}$		0,73
D/H в молекуле CH_4 ****	$(1,25 \pm 0,25) \times 10^{-4}$		0,78
D/H в молекуле CH_4 **	$(1,32_{-0,11}^{+0,15}) \times 10^{-4}$	стратосфера	0,78

* Масс-спектрометр GCMS зонда «Гюйгенс» (Niemann et al., 2005).

** Bezard et al., 2007.

*** Измерения, проведенные с помощью спектрометра CIRS, установленного на борту «Кассини» (Cousenit et al., 2006).

**** Наземные наблюдения (Penteado et al., 2005).

Таким образом, состав атмосферы Титана обладает рядом характерных особенностей, связанных как с происхождением спутника и его атмосферы, так и с дальнейшей ее эволюцией. Отметим наиболее существенные из них.

- Титан имеет более плотную атмосферу, нежели превосходящие его по размерам Марс и даже Земля. Кроме того, близкие ему по размеру и плотности спутники Юпитера — Ганимед и Каллисто — не имеют атмосферы. Последнее свидетельствует о существенных различиях в $P-T$ -условиях образования спутников Юпитера и Сатурна в их протоспутниковых дисках, что обсуждалось в гл. 4.
- Процессы фотохимического разложения играли огромную роль в формировании современного состава атмосферы Титана. Происхождение ее основного компонента — молекулярного азота (95–98 %) — связано с фотохимическим разложением NH_3 , а образование сложных органических соединений — с фотолизом CH_4 — второго по значению компонента атмосферы.

Таблица 14.2

Сопоставление значений относительных содержаний элементов на Солнце (по Lodders, Fegley, 1998) и в атмосфере Титана (по данным зонда «Гюйгенс»)

Элементы	Солнце	Титан
$^{36}\text{Ar}/\text{H}$	$3,05 \times 10^{-6}$	$(2,8 \pm 0,3) \times 10^{-7}$
$^{38}\text{Ar}/\text{H}$		$< 10^{-8}$
$^{84}\text{Kr}/\text{H}$	$9,20 \times 10^{-10}$	$< 10^{-8}$
$^{132}\text{Xe}/\text{H}$	$4,45 \times 10^{-11}$	$< 10^{-8}$
N/H	$1,12 \times 10^{-4}$	доминирует
C/H	$3,62 \times 10^{-4}$	(CH_4) $1,41 \times 10^{-2}$ стратосфера $4,9 \times 10^{-2}$ поверхность
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	83,3	$82,3 \pm 1,0$
$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$	271,74	183 ± 5
$^3\text{He}/^4\text{He}$	$1,66 \times 10^{-5}$	
D/H	$1,94 \times 10^{-5}$	$(2,3 \pm 0,5) \times 10^{-4}$ в молекуле H_2 $1,17_{-0,21}^{+0,16} \times 10^{-4}$ в молекуле CH_4

- Атмосфера Титана существенно обеднена изотопом ^{14}N по отношению к тяжелому изотопу ^{15}N в сравнении с атмосферой Юпитера, что, вероятно, связано со значительными потерями легкого изотопа азота в процессе эволюции Титана при фотохимическом разложении NH_3 .
- Соотношение C/N в атмосфере Титана в 4–6 раз ниже, чем в атмосферах Юпитера и Сатурна, а также чем солнечное значение. В то же время изотопное отношение в молекуле метана $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 82,3$ близко солнечному значению (83,3) и лишь немного меньше, чем в атмосферах Юпитера (92,5) и Сатурна (90,4). Все это может свидетельствовать о том, что в процессе эволюции углерод в основном не был потерян. Поэтому можно полагать, что Титан обладает значительным внутренним резервуаром углерода.
- Из всех инертных газов в атмосфере Титана количественно были определены лишь первичный легкий изотоп аргона ^{36}Ar и радиогеный ^{40}Ar , при этом другие инертные газы (^{38}Ar , ^{84}Kr , ^{132}Xe) при точности определения $\sim 10^{-8}$ обнаружены не были. Этот факт находится в противоречии с данными по содержанию инертных газов в атмосфере Юпитера и может свидетельствовать как об особенностях образования Титана, так и об особенностях его внутреннего строения.

14.2. Происхождение атмосферы Титана

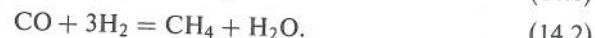
Эти особенности в той или иной мере пытаются объяснить модели происхождения Титана и его атмосферы, разработанные в последние годы. Остановимся на наиболее значимых из них.

14.2. Происхождение атмосферы Титана.

История вопроса и эволюция представлений

С начала восьмидесятых годов прошлого века, благодаря бурному развитию космических исследований, происхождение Титана и его атмосферы — один из наиболее обсуждаемых вопросов в научной литературе. На первом этапе при построении моделей авторы старались решить основную проблему состава его атмосферы — объяснить одновременное присутствие в ней молекулярного азота и метана, что не согласуется с условиями термодинамического равновесия газа солнечного состава. Как показывают расчеты, в такой системе при высоких температурах ($T > 700$ К при $P = 10^{-3}$ бар и $T > 500$ К при $P = 10^{-7}$ бар) должны присутствовать N_2 и CO , а при низких ($T < 700$ К при $P = 10^{-3}$ бар и $T < 500$ К при $P = 10^{-7}$ бар) — NH_3 и CH_4 (см. гл. 2, рис. 2.2).

Первыми это противоречие попытались преодолеть Принн и Фегли (Prinn, Fegley, 1981). Они предположили, что масса протоспутникового диска Сатурна соответствовала суммарной массе всех регулярных спутников, дополненной летучими в солнечной пропорции. Из этого предположения следует, что диск был весьма плотным: давления в нем составляли 0,1–1 бар, что на 4 порядка выше давлений, предполагаемых для околосолнечного протопланетного диска. Поэтому при охлаждении субдиска была возможна достаточно высокая степень конверсии N_2 и CO в NH_3 и CH_4 , согласно реакциям:



Как видно из стехиометрии (14.1) и (14.2), соотношение компонентов правой и левой части в состоянии реакций равновесия в значительной мере зависит от давления: при увеличении P оно сдвигается вправо. Преобладающими соединениями в газовой фазе становятся NH_3 и CH_4 .

Далее авторы полагали, что скорость остывания субдиска была медленнее, чем скорость диссипации его газовой фазы. Таким образом, газообразные аммиак и метан, взаимодействуя с образовавшимся при $T \approx 235$ К ($P \approx 0,1$ бар) льдом воды, образовывали твердые соединения — кристаллогидраты и клатраты, вошедшие затем в состав планетезималей, из которых впоследствии образовались Юпитер и Сатурн и их регулярные спутники.

Полученный вывод имел принципиальное значение, поскольку, по сути, впервые давал возможность объяснить способ вхождения летучих С-

и N-содержащих компонентов в состав Юпитера и Сатурна и их ледяных спутников. Этот вывод не потерял своей актуальности и по сей день, но представления о механизмах образования, этапах эволюции протоспутниковых дисков Юпитера и Сатурна и термодинамических условиях в них существенно изменились (подробнее см. гл. 4).

В начале 80-х гг. XX в. в результате пролетов КА «Вояджер-1» и «Вояджер-2» вблизи Сатурна впервые появились данные по изотопному составу атмосферы Титана, в частности по ее обогащению тяжелыми изотопами водорода и азота — D и ^{15}N — относительно солнечных значений (Coustonis *et al.*, 1989). Эта информация была чрезвычайно важной и оказала и по сей день оказывает большое влияние на эволюцию представлений о возможных механизмах происхождения атмосферы Титана. Известно, что ион-молекулярные реакции в межзвездных молекулярных облаках привели к увеличению примерно в 10 раз отношения D/H в различных молекулах, в том числе и органических по сравнению с величиной, которая вытекает из термодинамических моделей и оценок скоростей реакций между нейтральными молекулами. Таким образом, если это отношение оказывалось достаточно велико, как полагали (Coustonis *et al.*, 1989), и сопоставимо с D/H в кометах (см. гл. 1, разд. 1.5), то вполне обоснованной выглядела так называемая «кометная» гипотеза происхождения атмосферы Титана, предложенная в работе (Griffith, Zahnle, 1995).

Под «кометами» эти авторы понимают ледяные планетизмы, образовавшиеся в дальних регионах околосолнечного диска и содержащие льды межзвездного происхождения. Они предложили модель ударного происхождения атмосферы Титана, причем предполагалось, что $\sim 10\%$ массы атмосферы — кометного происхождения. Сила ударных воздействий была согласована с величиной кратеров, обнаруженных на других спутниках Сатурна — Ре и Япете. Также предполагалось, что ударно-генерированная атмосфера могла возникнуть только на Титане и не могла возникнуть на Ганимede и Каллисто, поскольку из-за большой разницы в массах Юпитера и Сатурна ($M_{\text{Jup}} = 3,3M_{\text{Sat}}$) для юпитерианской системы эффект эрозии был значительно сильнее. Образовывавшиеся при ударах молекулы газов обладали столь большими скоростями, что не удерживались спутниками и диссирировали. Критики «кометной» гипотезы отмечали, что остается неясным, где образовались эти ледяные тела. Следует отметить, что в модели не рассматривалась ни химическая сторона проблемы, ни термодинамические условия в околосолнечном диске и их изменение во времени.

Однако позднее значение D/H для Титана было снижено относительно того, которое приводилось в 80-х гг. XX в., до величины $D/\text{H} = 7,75 \times 10^{-5}$ при неопределенности порядка 30 % (Coustonis *et al.*, 2003; Gurwell, 2004). Теперь оно было ниже, чем определенное к тому времени для комет Haley, Hyakutake и Hale—Bopp из HDO/H₂O значение $D/\text{H} = 2,9\text{--}3,3 \times 10^{-5}$ (Eberhardt *et al.*, 1995; Bockelée-Morvan *et al.*, 1998).

На этом основании был сделан вывод, что летучие, вошедшие в состав атмосферы Титана, образовались в самом протоспутниковом диске Сатурна и генетически не были связаны с кометами.

Тем не менее роль ударных воздействий на изотопный состав атмосферы Титана продолжала обсуждаться, теперь уже применительно к вопросу обогащения ее тяжелым изотопом ^{15}N . Так, Дж. Лунин предположил, что Титан аккрецировал большое количество азота (как молекулярного, так и в форме амиака) и углерода (в форме метана) (Lunine *et al.*, 1999). Первоначально образовавшаяся атмосфера в результате импактных процессов подверглась быстрому удалению, что привело к обогащению ее остатка тяжелыми изотопами. При этом из атмосферы удалялись более легкие молекулы амиака и накапливались более тяжелые молекулы N₂. Однако большее распространение получила другая гипотеза. Она состоит в том, что азот в основном был аккрецирован Титаном в форме NH₃·H₂O, а образование молекулярного азота N₂ связано с разложением NH₃ под воздействием солнечной радиации (Atreya *et al.*, 1978). Авторы статьи (Kim *et al.*, 2001) полагали, что под ледяной корой спутника существует океан жидкой воды, который может содержать до 15 % растворенного амиака и много органических соединений.

Во время пролетов «Галилео» и по мере приближения «Кассини» к Юпитеру и Сатурну интерес к образованию планет-гигантов, и в особенности к образованию их спутниковых систем, возраспался. В течение этого периода были опубликованы работы, посвященные субдискам Юпитера и Сатурна (Дорофеева, Макалкин, 2004; Mousis *et al.*, 2002a; Mousis *et al.*, 2002b; Canup, Ward, 2002; Mosqueira, Estrada, 2003a, b; Mousis, Gautier, 2004) и моделям строения крупных спутников (Kuskov, Kronrod, 2001, 2005; Sohl *et al.*, 2003; Grasset, Pergamin, 2005; Tobie *et al.*, 2005a). Идея о существовании океана под слоем льда толщиной до 100 км (при 5–15 % содержании NH₃) нашла поддержку в моделях внутреннего строения Титана, которые подробно анализируются в последнем разделе данной главы.

В значительной мере работы по формированию спутниковых систем касались основных принципов построения моделей субдисков, а также содержали анализ их физических параметров (гл. 4). Здесь же мы более подробно остановимся на работах (Mousis *et al.*, 2002a, b) поскольку в них по сути впервые после пионерской работы Принна и Фегли (Prinn, Fegley, 1981) была предпринята попытка проследить возможные изменения состава C- и N-содержащих соединений как в околосолнечном протопланетном диске на радиальных расстояниях Сатурна, так и в его протоспутниковом диске, и оценить их влияние на состав Титана.

В работах (Mousis *et al.*, 2002a) была предложена модель образования Титана, согласующаяся с имевшимися на тот период данными по составу атмосферы спутника (Hidayat *et al.*, 1998; Lara *et al.*, 2002a, b.). Для этого на базе полукилометровой модели солнечной небулы (Dubrulle, 1993) была разработана эволюционная турбулентная модель субнебулы Сатурна,

турна. Но ученые из группы Купера объясняют этот факт тем, что, в отличие от других спутников Сатурна, аммиак на Энцеладе залегает неглубоко от поверхности и поэтому легче вступает в реакцию с кислородом. Следует отметить, что космический аппарат «Кассини» пока не обнаружил следов аммиака на Энцеладе. Поскольку единого мнения о возможных источниках вулканической деятельности на южном полюсе Энцелада выработать не удалось, этот вопрос продолжает широко обсуждаться в научной литературе (Collins, Goodman, 2007; Grott *et al.*, 2007; Nimmo *et al.*, 2007).

Существование в недрах Энцелада жидкой воды при температуре близкой к комнатной, в которой, видимо, растворены и органические соединения, а также источников тепла дают основания полагать, что этот спутник может быть благоприятным для возникновения примитивных форм жизни (Matson *et al.*, 2007). Поэтому в литературе Энцелад рассматривается как один из возможных источников возникновения биологической жизни в Солнечной системе.

14.5. Происхождение атмосфер Титана и Энцелада.

Предварительные выводы

При всем многообразии мнений и гипотез, существующих в настоящее время в литературе относительно происхождения атмосфер регулярных спутников Титана и Энцелада, можно указать некоторые положения, которые поддерживаются большинством исследователей.

- Первичным источником летучих на Титане и Энцеладе были планетезимали, состоявшие из каменной и ледяной компоненты. В состав льдов, помимо льда воды, входили клатраты различных химически активных и инертных газов, образовавшиеся при охлаждении газовой фазы околосолнечного протопланетного диска. Впоследствии некоторые низкотемпературные кратраты могли быть разрушены в протоспутниковом диске.
- Источником азота на Титане и Энцеладе был кристаллогидрат аммония ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), входивший в состав ледяной компоненты планетезималей. Неизвестно, какое начальное количество аммония было на этих спутниках, но по некоторым оценкам на Титане начальное отношение $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ могло составлять от 1 до 4 мас. %.
- Источник CH_4 на Титане и Энцеладе однозначно не определен. Но все исследователи сходятся во мнении, что происхождение метана является ключом к пониманию происхождения спутников. Кроме того, от выбора источника CH_4 в атмосфере Титана зависят температурные ограничения на модели аккреционного протоспутникового диска Сатурна. Таким образом, генезис метана в атмосфере спутников представляется одной из важнейших задач современной космохимии. Метан является важнейшим предбиологическим соединением, поскольку в стрatosфере Титана обнаружены многочисленные сложные

органические соединения, содержащие в том числе и азот, которые образовались в результате фотолиза CH_4 . Присутствие подобных соединений предполагается и в океане Энцелада, вероятно, существующем под внешним слоем льда.

- То обстоятельство, что Титан, как и Земля, имеет плотную атмосферу с преимущественным содержанием азота и что в ней есть условия для синтеза органических молекул, дает основания полагать, что условия на Титане во многом близки существовавшим на Земле ~ 4 млрд лет назад, когда на ней только зарождалась жизнь. Таким образом, Титан представляет собой мост, связывающий Землю с допланетным диском, в котором она возникла.

Учитывая сказанное выше, кратко обобщим современные гипотезы о возможных источниках метана на Титане и Энцеладе.

- (1) Клатрат CH_4 мог быть аккрецирован Титаном вместе с ледяными планетезималиями, образовавшимися в протопланетном диске (Alibert, Mousis, 2007; Tobie *et al.*, 2008). Основным контраргументом таких моделей является экспериментально доказанное отсутствие в атмосфере Титана ксенона, кратрат которого образуется при $P-T$, очень близких к условиям образования $\text{CH}_4 \cdot 5,75\text{H}_2\text{O}$.
- (2) Метан мог образоваться при окислении жидкой водой сложных органических соединений (Zolotov *et al.*, 2005), подобных тем, что были экспериментально обнаружены в кометах и в межпланетной пыли. Необходимая энергия получалась за счет радиогенного распада ^{26}Al . Этот источник CH_4 представляется вполне реальным, в особенности на ранних этапах эволюции спутника при образовании его первичной атмосферы. Однако трудно предположить, что он действует и в настоящее время, когда распад короткоживущих изотопов уже закончился. С другой стороны, на Энцеладе и сейчас существует достаточно мощный источник энергии, поддерживающий существование плumes.
- (3) Образование метана из окси углерода при ее восстановлении по схеме Фишера—Тропша с участием железного катализатора (Sekine *et al.*, 2006) маловероятно, поскольку аккумуляция CO в значимых количествах на спутниках Сатурна вряд ли происходила. Экспериментально установлено, что в нижней атмосфере Титана $\text{CO}/\text{CH}_4 = (1,8 \pm 0,9) \times 10^{-4}$ (Baines *et al.*, 2006).
- (4) Наконец, образование метана из двуокиси углерода при ее восстановлении молекулярным водородом, образовавшимся в результате реакции серпентинизации оливинов — одного из основных компонентов ядра Титана (Atreya *et al.*, 2006; Owen *et al.*, 2006). При всей привлекательности этой гипотезы не очевидно, была ли достаточной поверхность взаимодействия в системе вода — порода, чтобы образовать необходимое количество CH_4 .

14.6. Модели внутреннего строения Титана и Энцелада

В диске Юпитера образовались 4 крупных (галилеевых) спутника с массами порядка массы Луны, тогда как в системе Сатурна такой крупный спутник только один — Титан, а суммарная масса остальных спутников составляет лишь несколько процентов от его массы. Момент инерции Титана (сильное ограничение на модель внутреннего строения) пока неизвестен. Ожидается измерения гравитационного поля Титана во время последующих пролетов орбитального аппарата «Кассини» вокруг Титана. Однако плотная атмосфера препятствует пролетам на высотах ниже 1000 км, что затрудняет достоверные определения гравитационного и магнитного полей.

Титан ($R = 2575$ км, $\rho_{\text{ср}} = 1,881 \text{ г/см}^3$, $M = 1,346 \times 10^{26}$ г, $0,24 \times 10^{-3}$ от массы Сатурна) по массе и средней плотности занимает промежуточную позицию между Ганимедом и Каллисто (табл. 6.1), содержащих около 50 мас. % H_2O . Низкая плотность Титана указывает на то, что он состоит из смеси льдов и железокаменного материала в примерно равной пропорции. Вероятно, в отношении химического состава скального материала Титан подобен Ганимеду и Каллисто. Однако степень химической дифференциации, гравитационные и магнитные поля, морфология поверхности, характер аккреции и влияние источников тепла на геологическую историю спутников существенным образом различаются.

Отсутствие у Сатурна внутренних железокаменных (не ледяных) спутников, подобных Ио, указывает на более низкие температуры аккреционного диска Сатурна по сравнению с диском Юпитера. Поэтому особенности химического состава Титана должны быть связаны с составом каменно-ледяных планетезималей, захваченных в диск и в процессе его эволюции подвергшихся высокоскоростным соударениям. В рамках подобных моделей можно говорить об определенном подобии химического состава железокаменных ядер Титана, Ганимеда и Каллисто. Различие в строении спутников Юпитера и Сатурна может быть связано с двумя основными факторами. Во-первых, с разной степенью дифференциации и наличием или отсутствием металлического Fe—FeS-ядра. Во-вторых, с составом и мощностью их водно-ледяных оболочек, что является следствием различий в P — T -условиях, существовавших в протопланетном диске в зонах питания Юпитера и Сатурна и аккреционных дисках планет-гигантов.

Ограничения на особенности строения Титана можно было бы вывести из данных «Кассини» по гравитационному и магнитному полям. К сожалению, момент инерции Титана пока не определен, а магнитометры «Кассини» не обнаружили наличие собственного магнитного поля Титана (Backes *et al.*, 2005). Поэтому в отношении внутреннего строения Титана, пока нет данных по его моменту инерции, трудно сказать что-либо определенное — вопрос о наличии металлического ядра и внутреннего океана остается неясным.

По аналогии с ледяными спутниками Юпитера Титан должен состоять из водно-ледяной оболочки и железокаменного ядра, которое может быть либо дифференцированным на силикатную мантию и металлическое Fe—FeS-ядро (аналог Ганимеда), либо частично дифференцированным (аналог Каллисто). В первом случае Титан будет представлять собой тело, дифференцированное на водно-ледяную оболочку, силикатную мантию и центральное железо-сульфидное ядро, хотя его наличие остается проблематичным из-за отсутствия данных.

Во втором, более сложном, случае строение Титана будет зависеть от его термохимической эволюции, определяющей степень дифференциации спутника. Титан может представлять собой частично дифференцированное тело, подобное Каллисто, состоящее из внешней водно-ледяной оболочки, каменно-ледяной мантии (смесь льдов высокого давления и скального материала) и железокаменного ядра. В такой модели внутреннего строения Титана источником энергии не хватило на сепарацию центрального железо-сульфидного ядра и разделения каменно-ледяной мантии на скальный материал и лед. Вполне возможны и промежуточные модели, описанные для Каллисто в гл. 10.

Предварительные модели термической эволюции предсказывают частичную дифференциацию Титана (Lunine, Stevenson, 1987; Grasset *et al.*, 2000). В работах (Sohl *et al.*, 2003; Sotin, Tobie, 2004; Tobie *et al.*, 2005a, b) океан находится между льдом-I и плотными фазами льдов высокого давления, причем железокаменное ядро не дифференцировано на силикатную мантию и железо-сульфидное ядро. В этом случае структура Титана становится близкой (но не подобной) Каллисто. Принципиальное различие здесь заключается в том, что в Каллисто под водно-ледяной оболочкой находится слой каменно-ледяной мантии (подробнее см. гл. 10). Наличие каменно-ледяной мантии в Титане пока в литературе не рассматривалось.

Другая проблема связана с агрегатным строением водно-ледяной оболочки и составом океана — многокомпонентного водного раствора, содержащего растворенные в воде летучие, способствующие понижению температуры замерзания раствора (Leliwa-Kopystynski *et al.*, 2002; Grasset, Pargamin, 2005). Плотная азотно-метановая атмосфера позволяет предположить, что недра спутника, помимо водяного льда и, вероятно, жидкой воды (оceania), обогащены кристаллогидратами $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и $\text{CH}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, которые по плотности близки к водяному льду. Более низкие температуры менее массивной субнебулы Сатурна по сравнению с таковыми в более массивном аккреционном диске Юпитера способствовали сохранению, возможно частичному, гидратных форм аммиака на орбитальных расстояниях спутника ($\sim 20,6$ радиусов Сатурна) и их вхождению в состав Титана.

Кристаллогидрат $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ образуется при взаимодействии газообразного аммиака с конденсирующимся льдом H_2O при $T \sim 160$ К при $P \sim 1$ бар или $T \sim 100$ К при $P \sim 10^{-5}$ бар (Mousis, Gautier, 2004). Содержание NH_3 в океане неизвестно. Оно зависит от отношения N_2/NH_3 .

в протоспутниковом диске Сатурна, которое оценивается в интервале от 0,1 до 10 (*Mousis et al.*, 2002a). В предположении, что весь азот находился первоначально в форме NH_3 , соотношение летучих в Титане должно отвечать космическим распространенностям: $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O} \sim 1/6$ и $\text{NH}_3/\text{CH}_4 \sim 1$, а водно-аммиачная смесь может содержать 5–15 % NH_3 , что слабо сказывается на плотности океана $\sim 0,95 \text{ г}/\text{см}^3$ (*Sohl et al.*, 2003; *Grasset, Pergamin*, 2005).

Понижение температуры замерзания водного раствора приводит к понижению температуры ледяной коры из льда-I, что должно отражаться на реологии льда (увеличение вязкости) и процессах теплопереноса (*Grasset, Sotin*, 1996; *Grasset et al.*, 2000; *Durham, Stern*, 2001). Более высокая вязкость льда замедляет конвекцию, что может способствовать существованию океана вплоть до настоящего времени.

Поскольку момент инерции Титана пока не определен, модели его внутреннего строения имеют предварительный характер. Согласно одной из таких моделей, основанной на предположении теплового и механического равновесия, спутник состоит из железокаменного ядра хондритового состава, окруженного водно-ледяной оболочкой, содержащей растворенный в воде аммиак. Тепловой поток из ядра определяется распадом радиоактивных элементов. Центральное металлическое ядро отсутствует. Внешняя водно-ледяная оболочка состоит из нескольких слоев, ее агрегатное состояние зависит от тепловой эволюции спутника, реологии льда и механизмов переноса тепла. Если под поверхностью Титана существует океан, то растворенный аммиак, действующий как антифриз, удерживает ее от замерзания.

Золь и др. (*Sohl et al.*, 2003) рассмотрели следующее строение внешней оболочки: (1) ледяная кора из чистого льда-I при температуре 94 K, соответствующей температуре на поверхности Титана, и с плотностью $0,917 \text{ г}/\text{см}^3$, в которой транспорт тепла осуществляется посредством теплопроводности; (2) нижележащий вязкоупругий конвектирующий субслой из более теплого, возможно, подплавленного льда-I («астеносфера»); (3) слой водно-аммиачной смеси с 5–15 мас. % NH_3 (оcean) под слоем конвектирующего льда; (4) слой льда-VI с плотностью $1,31 \text{ г}/\text{см}^3$, который простирается до границы с железокаменным ядром с плотностью $3,5\text{--}4,5 \text{ г}/\text{см}^3$. Химически двухслойная модель Титана, состоящего из водно-ледяной



Рис. 14.2. Схематическая модель внутреннего строения Титана (не в масштабе) при валовом отношении лед/порода = 45/55 и с океаном, содержащим 15 мас. % NH_3 , по (*Sohl et al.*, 2003)

14.6. Модели внутреннего строения Титана и Энцелада

Таблица 14.3

Мощность водно-ледяных оболочек спутников

Мощность водно-ледяных оболочек, км	Каллисто	Ганимед (модель с внутренним океаном)	Ганимед (модель без океана)	Титан (<i>Sohl et al.</i> , 2003)	Тритон (<i>Ruiz</i> , 2003)
H (лед-I)	150	30–120	—	70	130
H (оcean)	150–300	140–230	—	70–220	130–?
H (смесь воды и/или льдов высокого давления)	0	260–590*	—	290–900***	?
H (полная мощность водно-ледяной оболочки)	300	850	880–940**	900	?

* Смесь воды и льдов.

** Ледяная оболочка из льда-I и высокобарных модификаций льда.

*** Слой льдов высокого давления.

оболочки (в разном агрегатном состоянии) и сухого железокаменного ядра, представлена на рис. 14.2. В зависимости от параметризации авторы получили довольно большой разброс значений для радиуса железокаменного ядра и мощности водно-ледяной оболочки. Приведем один из вариантов модели внутреннего строения Титана с массовым отношением лед/порода = 45/55 и океаном, содержащим 15 мас. % NH_3 (рис. 14.2).

В представленной модели кондуктивная кора из чистого льда-I имеет мощность около 70 км; конвектирующий субслой отсутствует. Океан простирается до глубин порядка 220 км и подстилается высокобарным слоем льда толщиной около 600 км. Железокаменное Fe-Si-ядро со средней плотностью $3,8 \text{ г}/\text{см}^3$ имеет радиус 1670 км. Безразмерный момент инерции Титана оценен равным 0,304, что меньше, чем момент Ганимеда (0,3105). Тепловой поток составляет $3,35 \cdot 10^{11} \text{ Вт}$, что соответствует поверхностному тепловому потоку $4 \text{ мВт}/\text{м}^2$. Модель строения Титана с внутренним океаном интересно сопоставить с таковыми для Каллисто (гл. 10), Ганимеда (гл. 9) и спутника Нептуна — Тритона (табл. 14.3).

В трехслойной модели Ганимеда без океана (модель А на рис. 9.2) полная мощность ледяной оболочки составляет 880–940 км. В модели Ганимеда с внутренним океаном (модель В на рис. 9.2) до глубин 30–120 км находится ледяная литосфера из льда-I, далее — внутренний океан мощностью 230–140 км, а на глубинах от 260 км до границы с железокаменным ядром — смесь воды и фаз льда высокого давления.

В гл. 10 было показано, что для теплового потока с поверхности Каллисто $3,3\text{--}3,7 \text{ мВт}/\text{м}^2$ мощность кондуктивной ледяной литосферы из льда-I равна $\sim 150 \text{ км}$, а мощность водного слоя, составляющая $\sim 150 \text{ км}$, простирается до глубин 300 км (табл. 10.2, рис. 10.6), ниже которых находится каменно-ледяная мантия, состоящая из гомогенной смеси льдов высокого давления и железокаменного материала. Каменно-ледяная мантия подстилается центральным железокаменным ядром, не содержащим льда (Kuskov, Kronrod, 2005).

Из табл. 14.3 видно, что модели строения водно-ледяных оболочек Титана, Ганимеда и Каллисто заметно различаются. Первое отличие — суммарная мощность водно-ледяной оболочки Каллисто — около 300 км , в то время как для Ганимеда и Титана она составляет $850\text{--}950 \text{ км}$. Второе — двухслойная модель Каллисто, состоящая из ледяной литосферы и сухого железокаменного ядра, противоречит ограничениям на момент инерции (Кусков, Кронрод, 2005). Напротив, двухслойная модель Титана состоит из водно-ледяной оболочки, которую подстилает железокаменное ядро, не содержащее льда.

Модели строения водно-ледяных оболочек Ганимеда в общих чертах можно считать подобными таковой для Титана. Однако Ганимед имеет металлическое ядро, в то время как о существовании Fe—FeS-ядра Титана ничего неизвестно. Поскольку экспериментальный момент инерции отсутствует, то крайне сложно оценить степень достоверности модели внутреннего строения Титана, построенной в работе Sohl *et al.* (2003).

В модели строения Тритона с внутренним океаном рассмотрена кондуктивная водно-ледяная оболочка, состоящая либо из водяного, либо аммиачного (дигидрат $\text{NH}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) льда (Ruiz, 2003). В обоих случаях тепловой поток с поверхности оказался значительно выше, нежели оцененный по обилиям радиоактивных элементов в железокаменном ядре хондритового состава $\sim 3,3 \text{ мВт}/\text{м}^2$. При таком тепловом потоке океан существует на глубине менее 30 км под ледяной корой из льда $\text{NH}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и менее 130 км под корой из льда-I (табл. 14.1).

В настоящее время планетологи активно разрабатывают гипотезы механизмов действия водяных вулканов на Энцеладе. Проблема внутренней активности Энцелада обсуждается со временем пролетов аппаратов «Вояджер» (Morrison *et al.*, 1990). Новые данные «Кассини» выявили высокую геологическую активность Энцелада в районе южного полюса, где по снимкам спутника с высоким разрешением видны эруптивные выбросы водяного пара (плюм или гейзер) и обновление поверхности за счет процессов криовулканизма (Porco *et al.*, 2007; Matson *et al.*, 2007). Высокая активность столь малого по размерам спутника с радиусом всего около 250 км представляется загадочной, ибо источники энергии не вполне ясны. Но, как и в случае Европы, существование приповерхностного океана объясняется тем, что приливный нагрев и радиогенные источники предотвращают замерзание.

14.6. Модели внутреннего строения Титана и Энцелада

Южная полярная область Энцелада имеет необычный рельеф, связанный с разломами длиной около 100 км и получивший название «тигровых полос». Большинство исследователей полагают, что источником энергии извержений служит разогрев недр спутника, обусловленный приливными напряжениями. Источником плюма может быть насыщенный газом приповерхностный океан или залегающие на глубине коровые карманы жидкой воды в равновесии с $\text{CO}_2\text{--CH}_4\text{--N}_2$ -клатратами. По масс-спектрометрическим данным состав газового плюма — $91\% \text{ H}_2\text{O}$, $3,2\% \text{ CO}_2$, $1,6\% \text{ CH}_4$ и $4\% \text{ N}_2$. Присутствие летучих, растворенных в воде, также препятствует замерзанию океана.

Модели внутреннего строения и активности Энцелада, основанные на данных о его массе и плотности и предположениях о динамике ледяной оболочки, активно обсуждаются в работах (Porco *et al.*, 2006; Kargel, 2006; Hurford *et al.*, 2007; Nimmo *et al.*, 2007; Rappaport *et al.*, 2007; Mitri, Showman, 2008). Источником энергии извержений считается нагрев из-за приливных деформаций; выделение энергии может быть связано как с вязким трением в недрах спутника, так и с сухим трением краев ледяных плит в коре Энцелада.

Предполагается, что Энцелад имеет силикатное ядро, сложенное водосодержащими минералами, с радиусом $170\text{--}190 \text{ км}$ и внешнюю водно-ледяную оболочку мощностью $\sim 80 \text{ км}$, состоящую из клатратов, жидкой воды, насыщенной газами, и льда H_2O . Примерно те же параметры получены и в модели (Schubert *et al.*, 2007): железокаменное ядро радиусом $150\text{--}170 \text{ км}$, с содержанием силикатной составляющей $\sim 50\%$ или более, которое окружено оболочкой из жидкой воды и льда. Такое внутреннее строение делает Энцелад в некоторой степени похожим на Европу с той лишь принципиальной разницей, что Европа обладает железосульфидным ядром с радиусом, вдвое превосходящим радиус Энцелада (табл. 8.2).

Сравнительный анализ возможности возникновения водяных плюмов на Европе и Энцеладе обсуждается в работе (Manga, Wang, 2007). Авторы приходят к выводу, что движущей силой извержения является избыточное давление, образующееся при замерзании внутреннего водного слоя, поскольку плотность жидкой воды превышает плотность льда. Но в случае Европы внешний ледяной слой слишком велик ($100\text{--}150 \text{ км}$, рис. 8.1), и избыточное давление недостаточно, чтобы разрушить его и дать возможность воде изливаться на поверхность. На Энцеладе ледяная кора много тоньше, вероятно, не превышает 10 км , поэтому давление замерзающего океана оказывается достаточным, чтобы взломать ее и вызвать извержение большого количества жидкой воды. С другой стороны, нельзя исключать и другие источники энергии, о чем говорилось выше. Очевидно, что для более детальной проработки этих гипотез существующей информации недостаточно.

14.7. Заключительные замечания

Орбитальный аппарат «Кассини» продолжает исследование атмосферы, магнитосферы и колец Сатурна и системы ледяных спутников. Не закончена и важнейшая цель экспедиции — изучение атмосферы Титана. Предстоит новые сближения с Титаном и Энцеладом, в результате которых будет получена и новая информация о составе атмосфер и водных плюмов.

Полученные данные в отношении атмосферы Титана, имеющие пока предварительный характер, сводятся к следующему. Молекулярный азот — основная составляющая атмосферы. Помимо N_2 , в атмосфере обнаружен метан: 1,5 % в верхней части атмосферы и около 5 % вблизи поверхности. В верхней атмосфере спутника обнаружены различные органические молекулы (C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_4 , C_2H_2 , HCN), в том числе содержащие азот. Некоторые из них (C_6H_6 и C_2H_2) были идентифицированы на поверхности Титана. Но в атмосфере отсутствуют первичные инертные газы — ксенон и криптон, а содержание нерадиогенного аргона и CO зафиксировано лишь в микроколичествах — и это самый неожиданный результат, полученный зондом «Гюйгенс». Отсутствие первичных инертных газов показывает, что азот образовался из NH_3 , так как захват молекул N_2 каменно-ледяными частицами сопровождался бы захватом молекул тяжелых инертных газов. Источником азота предполагается гидрат аммония ($NH_3 \cdot H_2O$), который вследствие термического или фотохимического разложения привел к образованию N_2 . Значения измеренного изотопного отношения $^{14}N/^{15}N$ оказались в два с половиной раза ниже, чем на Юпитере, и это свидетельствует о потере спутником в ходе эволюции значительной части легкого (^{14}N) азота.

Напротив, в атмосфере Титана измеренное значение $^{12}C/^{13}C$ в молекуле метана оказалось лишь немногим ниже, чем в атмосферах Сатурна и Юпитера, т. е. существенных потерь углерода не происходило. Это, наряду с ростом концентрации метана вблизи поверхности, позволяет говорить о дегазации углерод-содержащих соединений из недр спутника. Метан на Титане играет такую же роль, как и вода на Земле. Вследствие ультрафиолетового излучения Солнца и космического излучения фотолиз метана в атмосфере приводит к образованию сложных органических соединений. Источник CH_4 на спутниках Сатурна не определен. Большинство исследователей полагает, что присутствие метана является ключом к пониманию происхождения Титана, поскольку позволяет найти температурные ограничения на модели аккреционного диска Сатурна на заключительной стадии образования планеты.

Гипотеза о том, что ранняя атмосфера Земли имела восстановленный характер и также состояла из метана, аммиака и водяного пара, и практически не содержала кислорода, позволила Стенли Миллеру (Miller, 1953) смоделировать процесс возникновения биологически важных молекул, включая аминокислоты. В настоящее время атмосфера Земли содержит

14.7. Заключительные замечания

78 % азота и около 21 % кислорода, а атмосфера Титана, на 95 % состоящая из азота, кислорода не имеет. Первичная атмосфера Титана, состоявшая в основном из NH_3 и CH_4 (см. (14.2)), могла соответствовать условиям, существовавшим на ранней Земле до возникновения жизни. Затем на Титане NH_3 был конвертирован в N_2 в результате солнечного фотолиза или под воздействием высоких температур и давлений, возникающих при ударных процессах.

Вопрос о химическом составе первичной атмосферы Земли (атмосфера могла иметь сильно восстановленный (CH_4-NH_3) или слабо восстановленный (CO_2-N_2) состав) активно обсуждается в литературе (Галимов, 2001; Kasting, Howard, 2006). Э. М. Галимов в книге «Феномен жизни» отмечает, что сильно восстановленное состояние аммиачно-метановой атмосферы на ранней стадии эволюции Земли имеет принципиальное значение для условий образования аденоэозинтрифосфата (АТФ — переносчик энергии в живых клетках) и создает благоприятную обстановку для возникновения жизни (Галимов, 2001). Метан является важнейшим предбиологическим соединением, поскольку в стратосфере Титана обнаружены многочисленные сложные органические соединения, образовавшиеся в результате фотолиза CH_4 . Присутствие подобных соединений предполагается и в океане Энцелада. Поэтому генезис метана в атмосфере спутников представляется одной из важнейших задач современной космохимии. Установив источник CH_4 на Титане и Энцеладе, многое можно понять в эволюции и зарождении жизни на планетах и спутниках Солнечной системы.

Все это дает основания полагать, что условия на Титане во многом близки существовавшим на нашей планете ~ 4 млрд лет назад, когда на ней только зарождалась жизнь. Руководители проекта «Гюйгенс» с европейской и американской стороны Ж.-П. Лебретон и Д. Мэтсон полагают, что изучение атмосферы Титана и органических соединений чрезвычайно важно с точки зрения понимания физико-химических процессов, протекавших на ранней стадии эволюции Земли (Lebreton, Matson, 2007). В этом смысле изучение состава и происхождения атмосферы Титана можно сравнить с путешествием на древнюю Землю.

Сопоставление моделей внутреннего строения Ганимеда, Каллисто и Титана показывает, что строение водно-ледяной оболочки Ганимеда в общих чертах близко к таковой для Титана, в то время как модели внешних оболочек Титана и Каллисто заметно различаются. Однако Ганимед имеет металлическое ядро, а о существовании Fe—FeS-ядра Титана ничего неизвестно. Поскольку момент инерции Титана пока не определен, модели его внутреннего строения имеют предварительный характер.

Материал этой главы охватывает анализ научной литературы, опубликованной на март 2008 г. Окончательные выводы пока делать рано. Поступление новых данных по исследованию атмосферы Сатурна и системы ледяных спутников с помощью КА «Кассини» ожидается в самое ближайшее время.

Заключение

Изучение систем Юпитера и Сатурна, содержащих более 92 % массы всей нашей планетной системы и представляющих естественные лаборатории для исследования проблемы происхождения и эволюции планет Солнечной системы, было начато космическими аппаратами серии «Пионер» и «Вояджер». Результаты этих экспедиций воодушевили исследователей и привели к реализации двух еще более амбициозных проектов «Галилео» и «Кассини—Гюйгенс».

Телекамеры, спектрометры, радиолокационные и другие приборы орбитальных аппаратов передали уникальную информацию об особенностях ударного кратерообразования, тектонической активности, морфологии поверхности и составе атмосфер планет-гигантов и их спутников, о характеристиках тепловых, магнитных и гравитационных полей безводной Ио и водно-ледяных Ганимеда, Каллисто, Европы, Титана, Реи, Япета, Энцелада и др.

Одним из наиболее удивительных результатов миссии «Галилео» является открытие возмущений магнитного поля в окрестностях Европы и Каллисто, которые могут быть связаны с конвективными движениями в океане, расположенном под ледяной оболочкой этих спутников. Имеются признаки существования океана также и в Ганимеде. Международный космический аппарат «Кассини—Гюйгенс», выйдя на орбиту вокруг Сатурна, выпустил зонд «Гюйгенс», совершивший мягкую посадку на поверхность Титана в январе 2005 г. До этой космической экспедиции о химическом составе и внутреннем строении этого спутника — единственного в Солнечной системе, обладающего устойчивой атмосферой, практически ничего не было известно. С помощью зонда были проведены измерения ряда физико-химических параметров атмосферы и изучены ее состав, а также свойства поверхности Титана.

В результате этих межпланетных путешествий была накоплена уникальная информация о тектонической, вулканической и криовулканической активности спутников планет-гигантов, наличии металлических ядер и океанов на ледяных спутниках, специфике состава азотно-метановой атмосферы Титана. Выяснилось, что атмосфера Титана помимо азота и метана содержит сложные органические соединения, образовавшиеся в результате фотолиза метана, но в которой отсутствуют первичные инертные газы — ксенон и криpton, — и это один из самых неожиданных результатов, полученных космическим тандемом «Кассини—Гюйгенс».

В настоящей книге изложены современные представления по фундаментальным проблемам происхождения и эволюции внешней части Солнечной

системы, где водяной и другие виды льдов (метановый, аммиачный, углекислый и др.) становятся главными составляющими спутников планет-гигантов, ледяных карликовых планет и астероидов, расположенных за орбитой Нептуна, а также комет. Проведен комплексный анализ этих проблем и детально разработаны модели формирования, внутреннего строения, тепловой эволюции и химической дифференциации крупных спутников Юпитера и Сатурна, объединенные общим физико-химическим подходом и согласованные с современными данными космохимии, геохимии, геофизики и астрофизики. Были привлечены новейшие астрономические наблюдения газопылевых протопланетных дисков вокруг молодых звезд солнечного типа, геохимико-геофизические данные об образовании и эволюции планетных тел, а также лабораторные и теоретические данные по уравнениям состояния минералов, воды, льдов высокого давления и метеоритного вещества. Решение стоящих перед нами задач было реализовано с помощью комплекса компьютерного моделирования эволюции планетарного вещества в системах Юпитера и Сатурна.

В результате проделанной работы:

(1) Построены математические модели газопылевого протопланетного аккреционного диска вокруг молодого Солнца и исследованы термодинамические (термобарические) условия, оказавшие существенное влияние на химический состав Юпитера и Сатурна. С помощью современных астрономических и космохимических данных получены ограничения на основные физические характеристики протопланетного диска, являющиеся входными параметрами моделей. К ним относятся начальное значение углового момента и масса диска, аккреционный поток массы через диск на Солнце, турбулентная вязкость диска и непрозрачность его вещества. В моделях учтены современные наблюдения дисков молодых звезд солнечного типа, свидетельствующие о росте пылевых частиц за время жизни дисков $\lesssim 10$ млн лет. При расчете распределения температуры и поверхностной плотности в диске на ранней стадии образования планет использованы новейшие данные о химическом составе атмосфер Юпитера и Сатурна по данным «Галилео» и «Кассини». Представлен обзор моделей образования и внутреннего строения Юпитера и Сатурна. Дан критический обзор космохимических и геолого-геофизических данных по объектам внешней части Солнечной системы: планетам-гигантам, регулярным спутникам, телам пояса Койпера, кентаврам и кометам.

(2) Построены численные модели термобарической структуры протоспутниковых аккреционных дисков Юпитера и Сатурна, в которых формировались спутники на заключительной стадии акреции планет. Модели удовлетворяют космохимическим ограничениям на обилия летучих элементов в атмосферах планет-гигантов и Титана по данным экспедиций «Галилео» и «Кассини—Гюйгенс» и ограничениям на содержание H_2O в спутниках, выведенным из моделей их внутреннего строения. В моделях протоспутниковых дисков учтены основные источники нагрева вещества

дисков и растущих протоспутниковых тел: диссипация энергии турбулентных движений в диске, акреция газа и твердого вещества на диск из областей солнечной туманности, окружавших эти планеты, нагрев излучением молодых Юпитера и Сатурна и тепловым излучением окружающей области солнечной туманности. Получены ограничения на основные параметры дисков во время акреции спутников: размеры пылевых частиц, турбулентную вязкость и акреционный поток массы из диска на планету. Рассмотрены столкновения с телами протопланетных дисков и оценено воздействие этих процессов на акрецию спутников и содержание в них льда воды.

(3) На основе решения системы уравнений (сохранения массы и момента, теплопереноса, термодинамического и гидростатического равновесия) построены современные модели химического состава и внутреннего строения регулярных спутников Юпитера и Сатурна. В качестве опорной информации использованы геофизические ограничения, геохимические данные по составу хондритов, а также термодинамические данные и уравнения состояния метеоритного вещества и льдов высокого давления. Исследована степень дифференциации спутников на оболочки (кора, астеносфера, ледяная литосфера, водный океан, мантия, ядро), оценены их мощности и распределения физических параметров. Определены массы и размеры металлических Fe—FeS-ядер. Ио, Европа и Ганимед — дифференцированные спутники. Ио имеет силикатную кору, астеносферу, под которой находятся твердая или частично расплавленная мантия и Fe—FeS-ядро. Европа и Ганимед состоят из водно-ледяной оболочки, силикатной коры, мантии и железо-сульфидного ядра. Каллисто представляет особый случай не полностью расслоенного планетарного тела, состоящего из водно-ледяной оболочки, каменно-ледяной области (мантии), в которой не произошло разделение льда и скального материала, и железокаменного ядра (свободного от льда). Модели Титана могут иметь внутреннее строение промежуточное между Ганимедом и Каллисто.

Оценено распределение железа между силикатами, металлом и сульфидом, количество металлического железа и отношение $(\text{Fe}_{\text{tot}}/\text{Si})$ в железокаменных ядрах (силикатная кора и мантия + Fe—FeS-ядро) спутников Юпитера. Из сопоставления геохимических параметров спутников и хондритов сделан вывод, что валовый состав безводной Ио и железокаменных ядер ледяных спутников (Европы, Ганимеда и Каллисто) близок к составу обыкновенных L/LL-хондритов, но существенно отличается от геохимических характеристик H-хондритов и углистых хондритов. Изохимичность железокаменного материала, формирующего спутники, подразумевает отсутствие Fe/Si-фракционирования по радиусу акреционного диска Юпитера. Состав лишенной воды Ио совпадает с составом нелетучей фракции ледяных спутников и акреционного диска Юпитера. Реконструкция химического состава регулярных спутников Юпитера позволяет сделать вы-

вод, что их формирование происходило из вещества, близкого по составу к родительским телам обыкновенных L/LL-хондритов.

Железокаменный материал, из которого формировались спутники, должен отражать химический состав околосолнечного протопланетного диска на орбите Юпитера. Этот материал, вероятно, испытал значительную потерю металла и одновременно восстановление в результате ударной переработки вещества планетезималей, происходившей в зоне планеты-гиганта на завершающей стадии ее акреции, когда скорости соударения тел значительно возрастили под действием мощного гравитационного поля Юпитера. В результате акреция спутников Юпитера и Сатурна проходила из относительно восстановленного железокаменного материала (Fe—Ni сплава, сульфида железа, силикатов и досолнечных пылевых частиц), водяного льда, клатратов и органического вещества.

(4) Исследована возможность существования внутреннего океана, образовавшегося в процессе термохимической дифференциации ледяных спутников Юпитера и Сатурна, и оценена мощность их водно-ледяных оболочек. Предложены и проанализированы модели строения и агрегатного состояния водно-ледяных оболочек Европы, Ганимеда, Каллисто и Титана. На основе диаграммы состояния H_2O рассмотрены модели со сплошной ледяной оболочкой, состоящей из полиморфных модификаций льдов I, III, V и VI, и модель с внутренним океаном под ледяной корой из льда-I. Акреционная энергия и последующий радиоактивный нагрев сыграли решающую роль в дифференциации Европы и Ганимеда, в результате чего произошла сепарация льда, скального материала и металлического сплава. Дифференцированные спутники — Европа и Ганимед — состоят из водно-ледяной оболочки мощностью 120–140 км для Европы и 800–900 км для Ганимеда, сухой силикатной мантии L/LL-хондритового состава и железо-сульфидного ядра. Каллисто — частично дифференцированный спутник. Модель Каллисто с внутренним океаном состоит из ледяной коры, подледного океана, каменно-ледяной мантии, состоящей из смеси льдов и скального материала, и центрального железокаменного ядра, не содержащего льда. Геофизически допустимая мощность водно-ледяной оболочки Каллисто оценена в 270–315 км; мощность ледяной коры составляет 135–150 км, а толщина подстилающего водного слоя 120–180 км. Возмущения магнитного поля, зарегистрированные во время пролетов «Галилео» вблизи Европы и Каллисто, могут быть связаны с конвективными движениями в океане.

Содержание H_2O в галилеевых спутниках возрастает с увеличением расстояния от Юпитера — от нуля в безводной Ио, до 6–9 % в Европе и 46–48 % в Ганимede, и до 49–55 % в Каллисто. Сопоставление моделей показывает, что строение водно-ледяной оболочки Титана близко к таковой для Ганимеда, но заметно отличается от Каллисто. Однако Ганимед имеет металлическое ядро, а о существовании Fe—FeS ядра Титана ничего неизвестно. Поскольку момент инерции Титана пока не определен, моде-

ли его внутреннего строения имеют предварительный характер. Наличие океанов предполагается на Тритоне, Плутоне и ледяных объектах из пояса Койпера.

(5) Орбитальные аппараты «Галилео» и «Кассини—Гюйгенс» изменили наши представления о системах Юпитера и Сатурна. В книге проведена теоретическая интерпретация полученных данных о наличии азота, углеводородов и других газов в атмосфере Титана, гидрологическом цикле на основе метана на Титане, вулканической активности Ио и Энцелада, а также о возможности существования приповерхностных океанов под ледяной корой Европы, Ганимеда, Каллисто, Титана и Энцелада. На основе численных моделей проведено сравнение условий формирования Ганимеда и Титана и возможности образования первичных атмосфер на спутниках. Из измерений КА «Кассини—Гюйгенс» следует, что молекулярный азот — основная составляющая атмосферы Титана. Помимо N_2 , в атмосфере обнаружены метан $\sim 1,5\%$ в верхней части атмосферы и $\sim 5\%$ вблизи поверхности, а также различные органические молекулы, но не зафиксированы первичные инертные газы — ксенон и криpton. Источником азота предполагается гидрат аммония ($NH_3 \cdot H_2O$), который вследствие термического или фотохимического разложения привел к образованию N_2 . Источник метана не определен. Метан является важнейшим предбиологическим соединением и ключом к пониманию происхождения Титана и его атмосферы, по многим параметрам схожей с ранней атмосферой Земли. Генезис метана и других летучих в атмосфере этого спутника Сатурна представляется одной из важнейших задач современной космохимии, а изучение состава атмосферы и органических соединений чрезвычайно важно с точки зрения понимания физико-химических процессов, протекавших на ранней стадии эволюции Земли. Одновременное существование азота, сложных соединений углерода, жидкой воды, содержащей растворенные соли и летучие компоненты, а также различных энергетических источников создает предпосылки для возникновения примитивных форм жизни на некоторых спутниках планет-гигантов.

Материал монографии охватывает оригинальные разработки авторов и анализ научной литературы по системам Юпитера и Сатурна, опубликованной на март 2008 г. Поступление новых данных по исследованию Сатурна и его спутников ожидается в самое ближайшее время в связи с новыми пролетами КА «Кассини».

Аэрокосмические агентства разных стран планируют на период с 2015 по 2025 гг. направить к Юпитеру экспедицию из нескольких космических аппаратов для исследования Европы, Ганимеда и Каллисто. Главной задачей Международного проекта, получившего название «Лаплас», является исследование поверхности Европы. Задачи миссии пока уточняются. Однако уже ясно, что планируется дальнейшее изучение физических полей, морфологии поверхности галилеевых спутников и их внутреннего строения, определение толщины водно-ледяных оболочек и наличия или

отсутствия океана под ледяной корой. Особая роль будет отведена и астробиологическому контексту миссии, поскольку предполагается, что спускаемый аппарат займется поисками простейших форм жизни на Европе.

Исследование регулярных спутников планет-гигантов становится все более важным и для понимания природы внесолнечных планетных систем. Еще недавно подавляющее большинство обнаруженных планетных систем существенно отличалось от Солнечной системы наличием массивных «горячих Юпитеров», движущихся на круговых орбитах с гораздо меньшим радиусом, чем орбита Меркурия, или же на сильно вытянутых орbitах. Однако с увеличением точности и длительности наблюдений находят все больше планетных систем, похожих на нашу, таких как система у звезды 55 Сп. У нее обнаружена не только планета-гигант с массой около 4 масс Юпитера на круговой орбите, сходной с орбитой Юпитера, но и планета с массой, в 45 раз большей массы Земли, расположенная, по-видимому, в зоне обитаемости, где температурные условия допускают существование жидкой воды. Изучение внесолнечных аналогов Солнечной системы позволит лучше понять происхождение подобных систем и поможет в изучении особенностей Солнечной системы, к которым относятся и спутниковые системы планет-гигантов.