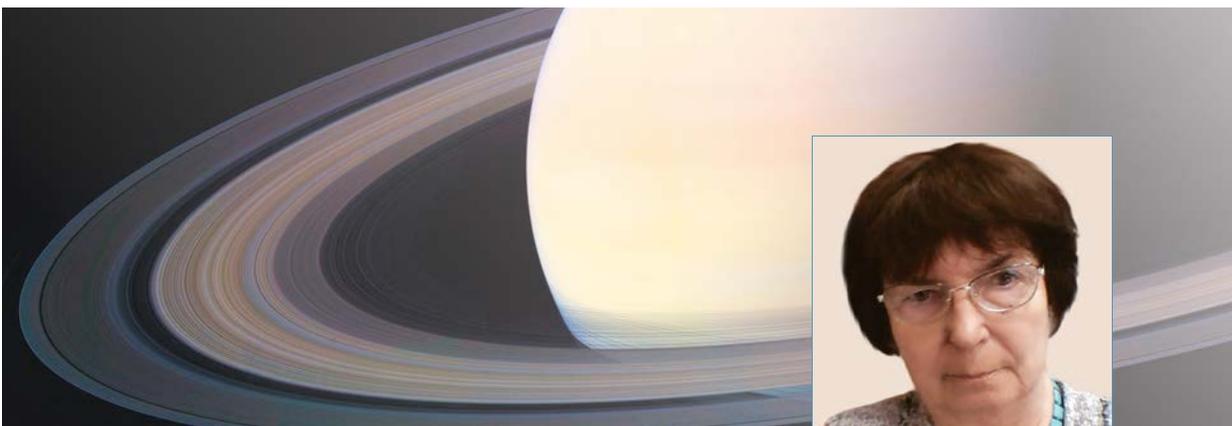


НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ МИССИИ “КАССИНИ–ГЮЙГЕНС”



В.С. УРАЛЬСКАЯ,

кандидат физико-математических наук

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (ГАИШ) МГУ

DOI: 10.7868/50044394819010031

Исследования системы Сатурна по программе “Кассини–Гюйгенс” (“Cassini–Huygens”) выполнены с помощью автоматической межпланетной станции “Кассини” (в ее создании участвовало 27 стран) по совместному проекту: NASA (Jet Propulsion Laboratory), Европейского космического агентства (ESA) и Итальянского космического агентства (ISA). На борту АМС “Кассини” (масса 5710 кг) размещались 12 научных приборов массой 336 кг и спускаемый аппарат “Гюйгенс” (масса 319 кг), оснащенный шестью инструментами.

Запуск космического аппарата был произведен 15 октября 1997 г. с мыса Канаверал с помощью мощной ракеты-носителя “Титан-4Б/Центавр”. После нескольких гравитационных маневров в поле притяжения Венеры, Земли и Юпитера АМС “Кассини” 1 июля 2004 г. вышла на орбиту искусственного спутника Сатурна. 25 декабря 2004 г. спускаемый аппарат “Гюйгенс” отделился от орбитального аппарата станции, вошел в атмосферу спутника Сатурна Титан и 14 ян-

варя 2005 г. произвел мягкую посадку на его поверхность. Успешная работа миссии продолжалась до 15 сентября 2017 г., когда станция вошла в атмосферу Сатурна и прекратила свое существование (ЗиВ, 1998, № 3, с. 48–52; 2004, № 6, с. 70–72; 2005, № 5, с. 35–40; 2006, № 1, с. 101–105; 2006, № 4, с. 104–106; 2006, № 6; 2007, № 4, с. 23, 91; 2008, № 2; 2012, № 6, с. 22–27; 2013, № 5, с. 20–23; 2017, № 4, с. 56–57; 2017, № 5, с. 40–43; 2018, № 1, с. 94; 2018, № 6).



АМС «Кассини»: а – подготовка к запуску (вверху – основная радиоантенна, в центре – спускаемый аппарат «Гюйгенс»), б – старт 15 октября 1997 г. с помощью РН «Титан-4Б/Центавр» с космодрома ВВС США, Мыс Канаверал. Фото NASA.

За 13 лет работы в системе Сатурна станция выполнила 294 орбитальных витка и 360 включений двигателей, пролетела 7884 млн км, совершила 162 сближения с 19 спутниками планеты-гиганта, передала 635 Гб информации и 453 тыс. снимков; в программе участвовали ученые из 35 стран; опубликовано около 4 тыс. статей.

Потребуется еще много лет для обработки и анализа огромного объема полученных данных, переданных на Землю «Кассини» в ходе исследований. В статье рассмотрены только некоторые из открытий, сделанных АМС «Кассини» и зондом «Гюйгенс» в ходе этой экспедиции.

ОТКРЫТИЯ НА ТИТАНЕ

Программа исследований самого большого спутника Сатурна Титан (диаметр 5152 км), выполненная с помощью

«Кассини», показала нам один из самых «земных» миров, с которыми мы когда-либо сталкивались, с погодой, климатом и геологией, которые дают нам редкую возможность (и новые способы) понять нашу родную планету.

До полета «Кассини» было известно, что Титан имеет плотную азотную атмосферу, затянутую смогом из мельчайших углеводородных частиц (дымка не позволяет наблюдать поверхность Титана в оптическом диапазоне). На радарных изображениях Титана, полученных 21 июля 2006 г. с помощью аппарата «Гюйгенс», были обнаружены области, заполненные жидкими углеводородами (метаном или этаном), они расположены, в основном, в Северном полушарии Титана: к примеру – площадь Моря Лигейи достигает 130 тыс. км² (ЗиВ, 2013, № 5, с. 22; 2017, № 4, с. 57). Это был первый случай открытия озер или морей, существующих в настоящее время вне Земли. Размеры



АМС "Кассини" на орбите вокруг Сатурна на фоне колец. Рисунок NASA/ESA.

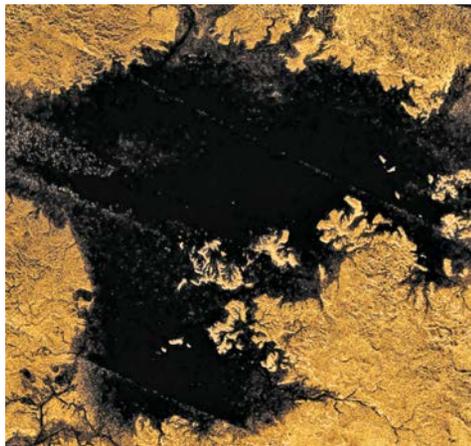
озер варьируются от километра до тысячи километров (Море Кракена). На снимках, сделанных в ходе спуска, запечатлен сложный рельеф Титана – озера, моря и заливы, горные хребты, ветвящиеся реки и бухты (ЗиВ, 2005, № 4, с. 79; 2015, № 1, с. 37–38). На Титане присутствуют отчетливые признаки вулканической активности.

Во время спуска на Титан "Гюйгенс" исследовал состав его атмосферы. Оказалось, что она состоит в основном из азота (так же, как и на Земле). Второй по значимости газ – метан – выполняет примерно ту же функцию, что и вода на Земле. Верхняя часть облаков Титана содержит метановый лед, а нижняя – жидкий метан

и азот. Плотная метановая дымка и ярусы облаков находятся на высоте 18–19 км, где давление приблизительно 380 миллиметров ртутного столба; однако оказалось, что желтая метановая дымка присутствует на всех высотах и простирается до самой поверхности. Температура в начале спуска "Гюйгенса" составляла –202 °С, в то время как на поверх-

Самый большой спутник Сатурна Титан. Хорошо видна мощная плотная атмосфера, состоящая в основном из азота. Из-за голубой дымки, расположенной на высоте 18–19 км, только очерчены контуры континентов. Синтезированный снимок получен 16 апреля 2005 г. АМС "Кассини" в ИК- (938 и 889 нм) и видимом (420 нм) диапазонах с расстояния 173 тыс. км от Титана (разрешение – 10 км). Фото NASA/JPL-Caltech.





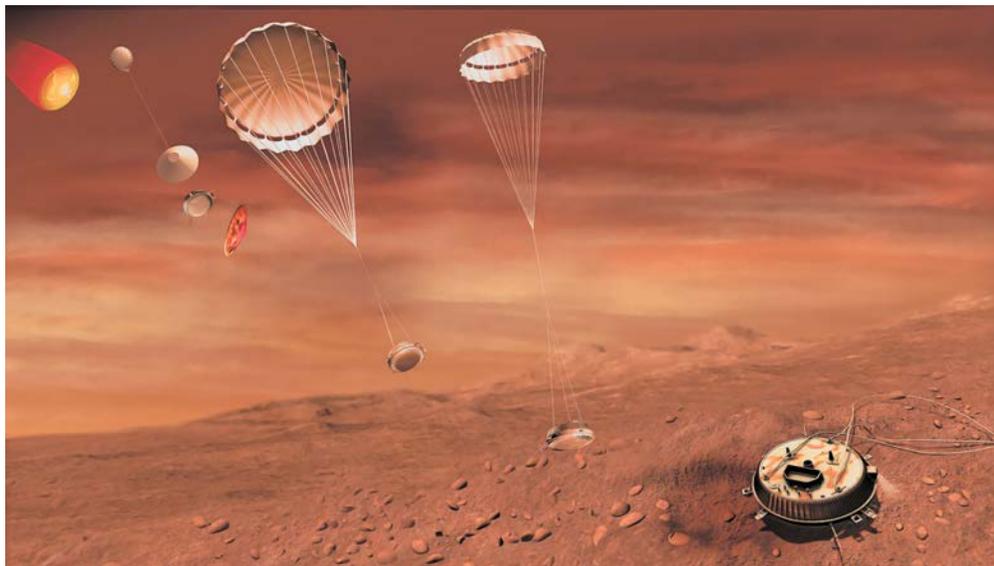
Одна из северных приполярных больших областей на Титане – Море Лигейи (Ligeia Mare), шириной 500 км и глубиной 170 м, заполненное жидкими углеводородами. Снимок получен 22 февраля 2007 г. с помощью АМС “Кассини”. Фото NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell.

ности Титана она оказалась немного выше -179°C .

Год на Сатурне, также как и на Титане, составляет 29,5 земных лет. Ось вращения Титана довольно сильно наклонена к плоскости эклиптики (примерно на $29,7^{\circ}$), что приводит к выраженной смене времен года во время движе-

ния спутника вместе с планетой вокруг Солнца. Наблюдения “Кассини”, продолжившиеся чуть больше 13 лет, охватили примерно половину этого периода, начиная с ранней зимы 2004 г. (зима в Северном полушарии Титана) и заканчивая летним солнцестоянием 2017 г. С помощью станции на протяжении многих лет проводились наблюдения за климатическим циклом Титана, его сезонными изменениями, приносящими метановые дождевые облака, из которых выпадают осадки на поверхность. “Гюйгенс” зафиксировал ясные свидетельства того, что ландшафт планеты

Схема этапов посадки (в течение 2 ч 27 мин) спускаемого аппарата “Гюйгенс” на поверхность Титана: торможение в атмосфере, раскрытие основного парашюта, сброс тормозного щита и включение научных приборов на высоте 160 км, спуск на основном парашюте до высоты 125 км, спуск на втором парашюте и посадка. Рисунок ESA/NASA.





Структура атмосфер Земли и Титана.
Рисунок с сайта Spacesim.org (Канада).

подвергается редким, но сильным наводнениям (ЗиВ, 2015, № 2, с. 16).

Несмотря на то, что Титан находится в 10 раз дальше от Солнца, чем Земля и он намного холоднее (средняя температура у поверхности составляет $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$), это единственное место в Солнечной системе с устойчивой жидкостью на поверхности и своего рода гидрологическим циклом, включающим метан, а не воду. Присутствие метана в атмосфере приводит к протеканию в ее верхних слоях процесса фотосинтеза и образованию нескольких слоев углеводородного смога. Над южным полюсом (от 75° до 85° ю.ш.) на высоте от 160 до 210 км обнаружено присутствие в тонком облаке токсичного гибридного льда из цианида водорода с бензолом, покрывающим большую площадь. Неразличимое для человеческого глаза, оно наблюдалось только в инфракрасном диапазоне с помощью ИК-спектрометра. Облако расположилось намного

Титан – это единственное место в Солнечной системе с “устойчивой” жидкостью на поверхности и своего рода гидрологическим циклом, включающим метан, а не воду

выше метановых дождевых облаков в тропосфере Титана, его граница находится на высоте 35 км. Интересно, что в 2005 г. с помощью “Кассини” выявлено накопление цианида водорода, а также других токсичных химических веществ в стратосфере на северном полюсе Титана. Ближе к концу 13-летнего цикла в системе Сатурна это же происходит над теплым

южным полюсом Титана – где лето, а циркуляция направляет его к северному полюсу. Циркуляция меняет направление вместе с изменением сезонов, что приводит к накоплению облаков в зависимости от того, на каком полюсе зима. Облако образовалось на гораздо более низкой высоте (ниже 150 км) и имело другой химический состав: состояло из цианистого водорода и цианоацетилена – одной из наиболее сложных органических молекул. Планетологи объясняют различия в двух облаках сезонными вариациями на северном и южном полюсах. Поскольку сезоны Титана длятся 7 земных лет, то вполне возможно, что смеси газов и температура были немного различны в двух случаях.

Под действием солнечных лучей в атмосфере постоянно образуется в том числе ацетилен, однако его следов на поверхности Титана не обнаружено. На основе моделирования не-

которые специалисты этот феномен трактуют как косвенный признак существования в обширных морях жидких углеводородов экзотической формы жизни, основанной на метане (вместо воды), дышащей водородом и питающейся ацетиленом. Доказано, что Титан



Спускаемый аппарат "Гюйгенс" на поверхности Титана. Из плотных облаков идут метановые дожди, вызывающие наводнения. Вдали видны горы. Рисунок ESA/NASA.

обладает океаном воды под толстой, ледяной корой и атмосферой, изобилующей пребиотическими химическими веществами, которые возникают из неорганических молекул и могут предшествовать появлению жизни. В результате реакций гидротермальная химия в океане могла бы обеспечить энергию для жизни.

Ученые из Корнельского университета создали топографическую карту Титана (ЗиВ, 2013, № 5, с. 22–23). Основная проблема заключалась в том, что лишь около 10% поверхности было отснято в высоком разрешении, остальную долю занимают снимки невысокого качества и модели. Ученые пришли к выводу, что три моря Титана образуют общий уровень (так же, как и океаны на Земле): либо эти моря соединены подповерхностным слоем между морями, либо сообщаются между собой посредством каналов.

На поверхности Титана обнаружены геоморфологические особенности, которые в наземных условиях обыч-

но связаны с экстремальными осадками. Хотя больше всего осадков выпадает на полюсах, редкие мощные ливни происходят в основном в средних широтах. Наиболее катастрофические ливни, когда за сутки выпадает до 10 см осадков, происходят раз в 20–30 сатурнианских лет, причем именно в высоких средних широтах обоих полушарий. Мощные потоки жидкости размывают мягкую поверхность,

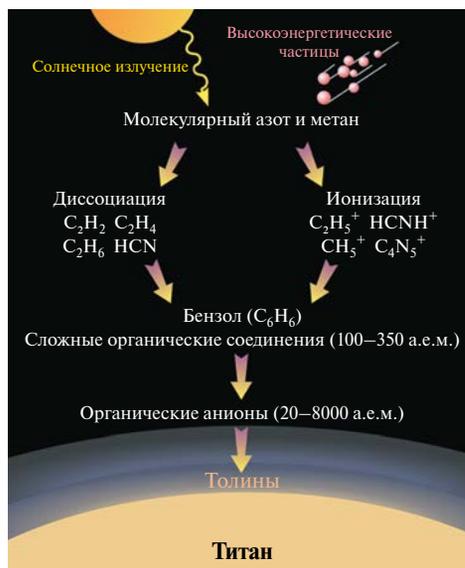


Схема образования толинов в результате фотохимических реакций в атмосфере Титана. Рисунок NASA/ESA.

несут гальку и песок вниз по течению и откладываются, формируя веерообразные формы рельефа. Радарные наблюдения, выполненные “Кассини”, подтверждают этот вывод: на снимках характерные веерообразные конусы чаще всего встречаются именно в средних широтах. В низких широтах Титана осадки выпадают редко, они не такие мощные и не способны переносить более-менее крупную гальку.

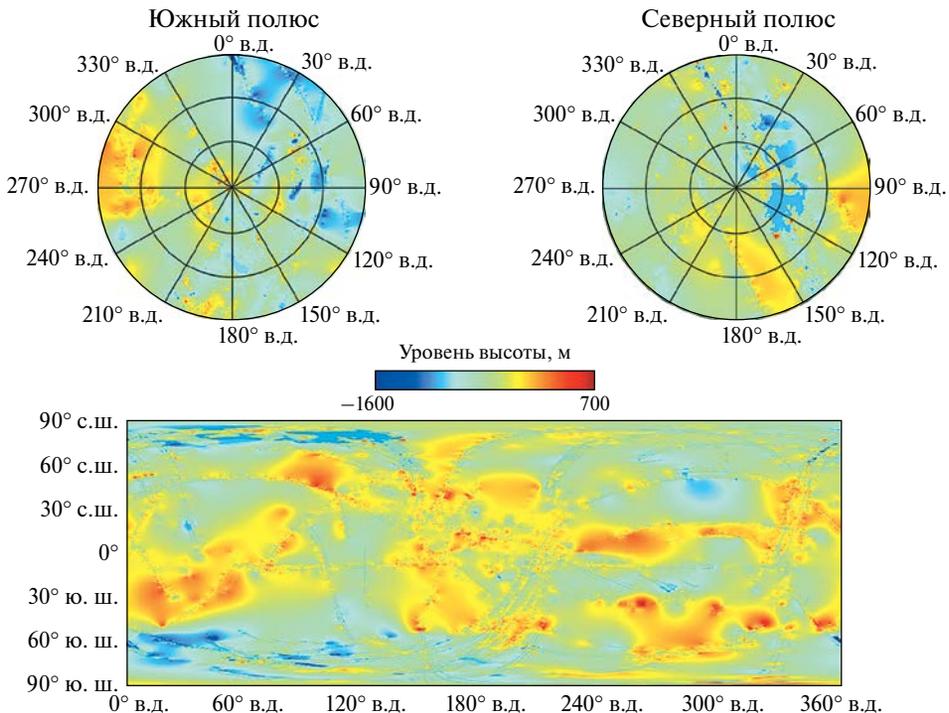
В геологии Титана существует особенность, которая стала новой проблемой для ученых: подавляющее большинство озер находятся в углублениях, подобных карстовым водоемам на Земле. Озера окружены высокими хребтами, которые в некоторых местах достигают высоты в сотни метров, они

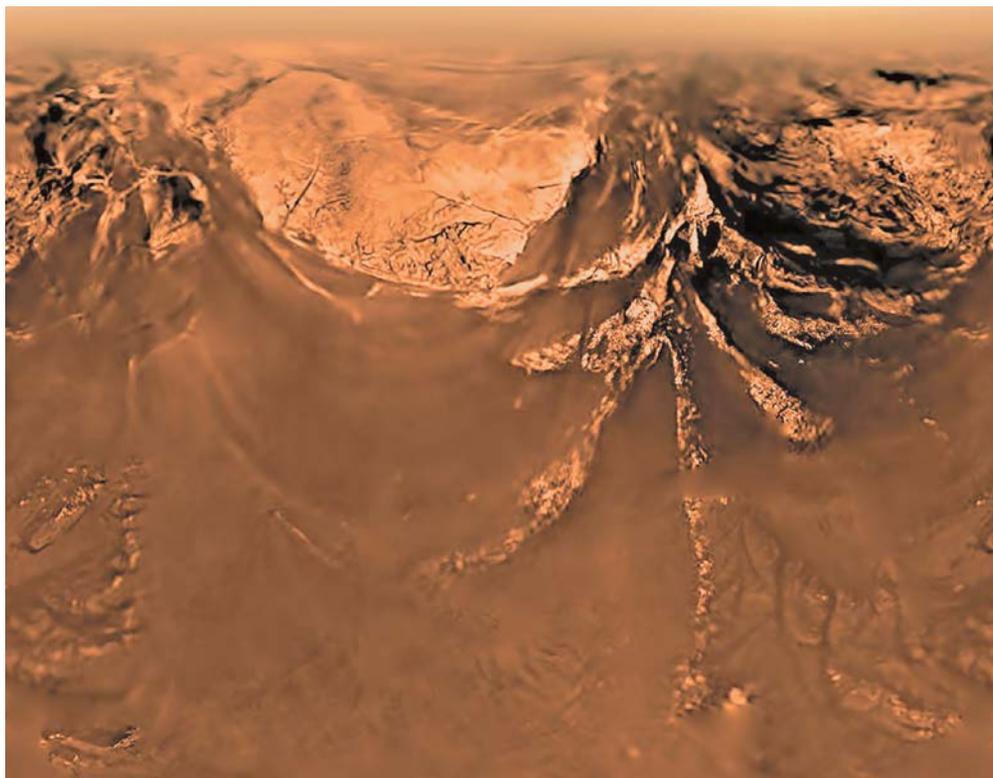
топографически закрыты – без каналов поступления или оттока жидкости (ЗиВ, 2016, № 4, с. 108). Но у земных карстовых озер нет таких резких обрывистых берегов. Причину появления таких образований предстоит выяснить в будущем.

МИР ЭНЦЕЛАДА

Другой удивительный мир был открыт при изучении Энцелада (диаметр 520 км), он казался безжизненным до наблюдений “Кассини”. Последние исследования показали, что Энцелад геологически активен: это проявляется в многочисленных гейзерах, поднимающихся на высоту до 250 км. Под его

Топографическая карта Титана составлена в 2017 г. по данным, полученным с помощью АМС “Кассини”. Три крупнейших моря – Кракена, Лигейи и Пунзи – находятся на севере (окрашены синим цветом) и связаны друг с другом, поддерживая общий уровень моря, возвышенности и горы высотой не более 700 м (желто-красный цвет). Низменности в экваториальной зоне – либо древние пересохшие моря, либо образованы криовулканами (по данным NASA/JPL-Caltech/ASI/ Cornell).



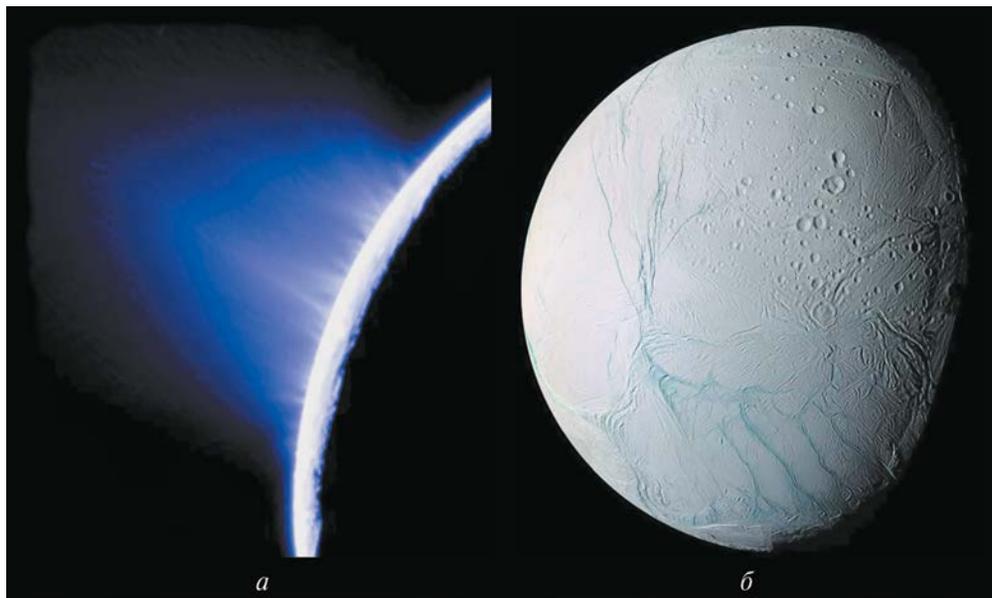


Вид горной гряды на Титане, полученный с помощью спускаемого аппарата "Гюйгенс" с высоты 10 км. Радарное изображение было сделано 14 января 2005 г. с помощью спектрального радиометра. Фото ESA/ NASA/ JPL/ University of Arizona.

ледяной коркой плещется глобальный океан, из которого выбрасываются в космос ледяные джеты. Органические соединения, обнаруженные "Кассини" в соленых гейзерах, подтверждают существование океана неглубокого залегания, сопоставимого с Марианской впадиной на Земле. Активными областями, из которых происходят извержения водяного пара и сложных углеводородов, являются разломы в коре глубиной до 500 м, шириной 2 км и протяженностью 130 км, которые назвали "тигровыми полосами"; они находятся в южной полярной области спутника (ЗиВ, 2006, № 1, с. 101–102; 2006, № 4, с. 110–111; 2007, № 4, с. 83; 2009, № 2, с. 81–83; 2012, № 6, с. 25–26; 2015,

№ 1, с. 38–39). В 2006 г. они получили собственные названия: рытвины Александрия, Каир, Багдад и Дамаск. Эти разломы, по-видимому, самые молодые детали рельефа околополярной области Энцелада.

Средняя глобальная толщина льда на Энцеладе составляет около 20–25 км. Количество воды, содержащееся в океане, равно 2% от объема океанов Земли. С помощью АМС "Кассини" обнаружено, что джеты содержат крошечные горные зерна породы, которые могут быть продуктом гидротермальной химии: реакции проходят при температуре, по крайней мере, +90° С. Энергия, требуемая для создания такой температуры, создается гидротермальной деятельностью: в этом процессе горя-



Энцелад: а – гейзеры, или ледяные джеты (в ложном цвете), выбрасываемые из области “тигровых полос” на южном полюсе; б – “тигровые полосы” прорезывают области в южных полярных широтах (искусственно окрашены в синий цвет). Снимки получены 10 октября 2007 г. и 26 июля 2005 г. с помощью АМС “Кассини”. Фото NASA/JPL-Caltech.

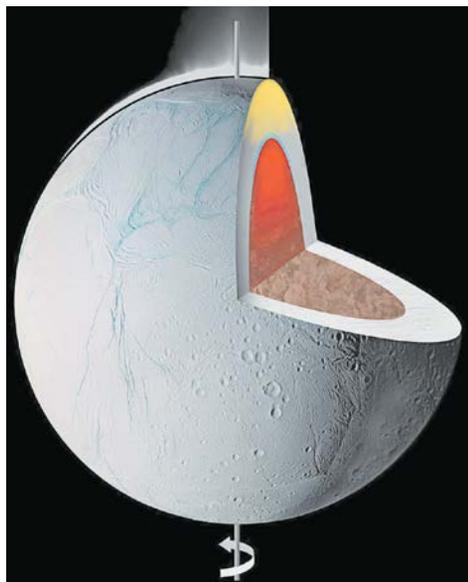
чая вода химически взаимодействует со скалистым пористым ядром на морском дне.

Структура и состав скалистого ядра, тепло от трения в очень пористом ядре могут играть ключевую роль в создании необходимой энергии. Моделирование показывает, что, по мере того как Энцелад обращается вокруг Сатурна, твердые породы в пористом ядре прогибаются и трутся друг о друга, вырабатывая тепло. Свободная структура позволяет воде из океана просачиваться внутрь, где она нагревается и химически взаимодействует со скалистыми структурами. Модели показывают, что эта активность должна быть максимальной на полюсах спутника. Плюмы теплой, наполненной минеральными

веществами воды из морского дна перемещаются вверх и делают еще более тонкой ледяную оболочку на южном полюсе – до 1–5 км. Вода затем вытесняется в космос через разломы во льду.

Ученые из Университета Нанта во Франции впервые объяснили некоторые ключевые характеристики Энцелада, наблюдаемые “Кассини”: глобальный океан, внутреннее тепло, более тонкий лед на южном полюсе и гидротермальную активность. Однако без ответа пока остается вопрос: почему северный и южный полюса настолько различны (ЗиВ, 2016, № 2, с. 110)? В отличие от геологически свежих ландшафтов юга северные области Энцелада – более древние и сильно кратерированы.

В результате исследования диффузного кольца Е (E-ring), расположенного вне ярких главных колец Сатурна, обнаружилось, что большая часть его материала содержит извергнутые в космос Энцеладом ледяные частицы и газ. Кольцо Е простирается от орбиты Мимаса до Дионы и дальше (от 180 000 до 480 000 км) – это самое протяженное из колец. Орбита Энцелада проходит по



Внутренняя структура Энцелада. Коричневым цветом обозначено скалистое силикатное ядро, белым – мантия (водяной лед), желтым и красным – куполообразные складки ядра под южным полюсом (наверху). Модель создана на основе данных, полученных АМС “Кассини”. Рисунок NASA/ESA.

самой плотной части кольца E, постоянно пополняя его частицами: при выбросах воды и пара из гейзеров и при ударах о поверхность спутника микрометеоритов (ЗиВ, 2006, № 1, с. 101).

Последние открытия особенностей спутников Сатурна Энцелад и Титан

Энцелад в E-кольце (в центре). Эта никогда ранее не видимая структура образована частицами, извергающимися из гейзеров Энцелада. Она становится видимой при определенном положении Солнца почти непосредственно за системой Сатурна. Снимок получен 19 сентября 2006 г. с помощью АМС “Кассини” с расстояния около 2,1 млн км от Энцелада. Фото NASA/JPL/Space Science Institute.

сделали “океанские миры” главным предметом изучения планетологии. Как мы знаем, жизнь возможна в стабильной окружающей среде, где присутствуют жидкая вода, определенные химические элементы и источник энергии: солнечное излучение или химические реакции. Исследования системы Юпитера с помощью АМС “Галилео” показали, что под поверхностью Европы есть подледный глобальный океан, который может быть обитаем (ЗиВ, 2001, № 2; 2004, № 3). В результате миссии “Кассини–Гюйгенс” открыто существование еще двух миров, потенциально пригодных для обитания – в 10 раз дальше от Солнца, чем Земля.

До старта “Кассини” ученые предполагали, что Энцелад слишком мал для того, чтобы генерировать и удерживать тепло, необходимое для поддержания подземных резервуаров с жидкой водой. Открытие интенсивной геологической активности в виде выбросов ледяных аэрозолей вблизи оказавшегося неожиданно теплым южного полюса спутника заставило научное сообщество более внимательно присмотреться к этим мирам. По окончании исследований ее результаты подтвердили, что в Энцеладе находится водный океан с солями и простыми органическими молекулами и, возможно даже, гидротермальными источниками на его морском дне. Благодаря исследованиям, выполненным с помощью “Кассини”, Энцелад теперь стал одним из са-



мых перспективных мест в Солнечной системе в поиске жизни за пределами Земли (ЗиВ, 2018, № 6).

ТАЙНА ЯПЕТА РАСКРЫТА

Первые пролеты АМС “Кассини” над поверхностью Япета (диаметр 1471 км) подтвердили огромную разницу в яркости двух полушарий спутника. Напомним, что Япет вращается вокруг Сатурна в резонансе 1 : 1, поэтому всегда одной стороной направлен к центральной планете. Из-за такой ориентации Япета на орбите его фигуру можно себе представить состоящей из ведущего и противоположного ему, ведомого полушарий: то есть ведущее полушарие всегда ориентировано по ходу движения Япета на орбите. Оказалось, что поверхность ведущего полушария Япета черна, как сажа, в то время как другое полушарие было ярким: так что альbedo на нем в 10 раз больше другого. Природу этого явления установили данные, полученные с помощью “Кассини”. Долгое время это было загадкой, пока ученые не пришли к выводу, что источником пыли на Япете является протяженное кольцо спутника Феба (диаметр 220 км).

Самое далекое и самое слабое пылевое кольцо Фебы было обнаружено космической обсерваторией “Спитцер” еще в 2009 г. (ЗиВ, 2018, № 2), оно впервые наблюдалось в оптическом диапазоне с помощью широкоугольной камеры АМС “Кассини” на расстоянии от 7 до 12 млн км от Сатурна. Частицы пылевого кольца создаются в результате ударов микрометеоритов о поверхность Фебы и других далеких спутников, движущихся по ретроградным орбитам. Из-за радиационного давления и, в меньшей степени, из-за эффекта

Пойнтинга–Робертсона пылевые обломки затем перемещаются внутрь, к Сатурну. Большая часть этого пылевого материала оседает на поверхность Япета, зачерняя область ведущей части спутника – так была раскрыта тайна огромного различия в яркости разных областей поверхности Япета.

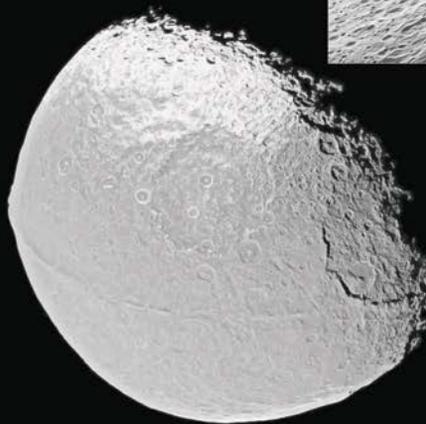
В 2005 г. была обнаружена еще одна уникальная особенность Япета – экваториальный горный хребет высотой 13–20 км и шириной 20 км, протянувшийся по темному полушарию Япета примерно на 1600 км и занимающий более 70% половины длины экватора спутника (ЗиВ, 2008, № 2). В светлом полушарии хребет разделен на отдельные горы. Такая характерная особенность наблюдалась на спутниках Солнечной системы впервые, она вызвала появление множества различных гипотез: от вулканического происхождения хребта – до падения на Япет ледяного кольца. Однако ни одна гипотеза не была доказана, и не проводилось сравнение теории с наблюдениями.

Наблюдаемая картина подробно исследована профессором Б.П. Кондратьевым (ГАИШ МГУ), изучившим строение Япета и его эволюцию, связанную с сильным замедлением его вращения. Использование модели Клеро позволило рассчитать размеры каменного ядра спутника и толщину его мощной ледяной оболочки. Средний радиус каменного ядра внутри Япета равен 318,75 км, толщина оболочки – 415,74 км (что больше радиуса каменного ядра и составляет 56,6% от полного среднего радиуса). Нынешнее сжатие поверхности спутника равно 0,046, оно не соответствует значению угловой скорости его вращения. Вследствие этого Япет отклоняется от динамического равновесия и стремится принять внешний вид (с меньшим сжатием), то есть его ледяная оболочка

В Энцеладе находится водный океан с солями и простыми органическими молекулами и, возможно, даже гидротермальными источниками на его морском дне



а



б

Япет. Мозаика из 60 снимков, полученных 10 сентября 2007 г. в трех диапазонах (752, 568 и 338 нм) во время пролета АМС "Кассини" на расстоянии 73 тыс. км от Япета (разрешение – 426 м): а – светлое западное полушарие с 504-км кратером Анжелье; темная область справа покрыта веществом, принесенным спутником Феба; в результате влияния солнечных лучей темное вещество перешло на ведущее полушарие; б – протянувшийся вдоль экватора на 1600 км горный хребет "стена Япета", почти совпадающий с географическим экватором. Снимок получен 7 января 2005 г. с помощью АМС "Кассини" с расстояния 172 400 км (разрешение – 1 км). Фото NASA/JPL.

приближается к округлой форме; все это приводит к процессу стекания масс льда вне экватора под действием силы тяжести. На экваторе механическое сопротивление внутреннего каменного ядра Япета делает невозможным движение несжимаемых масс льда по направлению к центру спутника. Массы льда на экваторе задерживаются под влиянием давления от ядра и остаются практически на прежнем расстоянии от него. Вне экватора сопротивление ядра быстро уменьшается, происходит "проседание" соседних масс льда относительно экваториальной гряды на поверхности Япета. Именно данный процесс "оседания" соседних с экватором масс льда и привел к появлению мощного кольцевого экваториального горного хребта на Япете.

Построенная Б.П. Кондратьевым модель предсказывает также, что на тем-

ном, и поэтому более теплом полушарии спутника, где лед более пластичен, образование горного хребта происходило интенсивно, что полностью совпадает с наблюдаемой картиной. Действительно, на более холодном противоположном полушарии Япета горный хребет вырождается в отдельные горы. Большая кратерированность горного хребта, прослеживаемая на фотографиях, означает, что хребет на Япете – очень древнее образование.

ОТКРЫТИЕ НОВЫХ СПУТНИКОВ

С помощью АМС "Кассини" были открыты 7 новых спутников: в 2004 г. – Мефона (Methone), Паллена (Pallene) и Полидевк (Polydeuces), в 2005 г. – Дафнис (Daphnis), в 2007 г. – Анфа (Anthe),

в 2008 г. – Эгеон (Aegaeon) и в 2009 г. – S/2009 S1 (ЗиВ, 2009, № 4, с. 15). Эгеон, Мефона, Анфа и Паллена – четыре малых спутника Сатурна, обнаруженные “Кассини” в окрестностях Мимаса (415 км), который находится в среднем на расстоянии 185 600 км от планеты. Ученые провели исследование, которое может пролить свет на возможное начальное число малых тел, близких к Мимасу, и помочь лучше понять их динамическое происхождение. Обнаружено, что они устойчивы длительное время. Орбиты спутников Эгеон, Мефона и Анфа могут оставаться неизменными в течение полумиллиона лет, учитывая современную конфигурацию системы и их резонанс с Мимасом. Спутник Паллена находится на нерезонансной орбите, и она более устойчива, по крайней мере, 64 млн лет. Однако на нее влияет квазирезонанс с Мимасом, индуцирующий долгосрочные орбитальные колебания эксцентриситета и наклона Паллены.

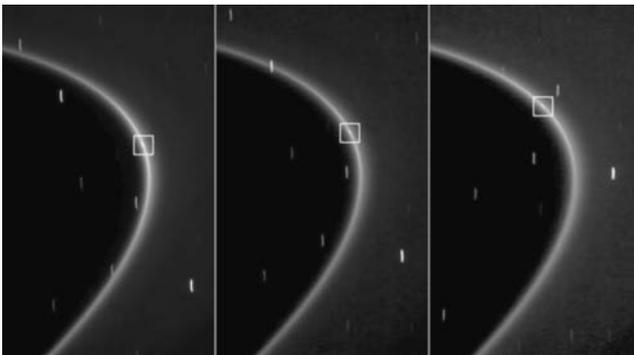
На снимках, полученных “Кассини”, можно увидеть арки, связанные со спутниками Мефона и Анфа, и наклоненное кольцо на орбите Паллены. Источником частиц тора Паллены, который находится на орбите спутника на расстоянии 212 000 км от центра Сатурна, служит сам спутник, его пылевые частицы

Уникальная особенность Япета – экваториальный горный хребет высотой 13–20 км и шириной 20 км

выбрасываются с поверхности путем микрометеороидной бомбардировки. Кольцо Паллены может быть образовано из частиц малого эксцентриситета, ниже 0,006. Несмотря на большой размер Паллены (4 км), по сравнению с Эгеоном (0,5 км), Мефной (3 км) или Анфой (1 км), эта маленькая луна не может эффективно “очищать” свою орбиту из-за малых размеров и большого наклона орбиты. Средний конечный наклон кольцевых частиц составляет $0,001023^\circ$, что при-

водит к вертикальной толщине кольца примерно 3,8 км. Напротив, материал, связанный с Анфой и Мефной, лежит в продольно ограниченных дугах. Дуга Мефоны простирается примерно на 10° по долготе вокруг положения спутника, а дуга Анфы достигает 20° в длину. Размеры этих дуг ограничиваются соседними резонансами с Мимасом.

Спутник Эгеон (LIII Aegaeon), обнаруженный вблизи яркой арки кольца G (G-ring), движется вдоль него, то есть он встроен в кольцо. Кольцо G (165 800–173 800 км от Сатурна) находится в области между орбитами Януса–Эпиметей (большая полуось 151 410 км) и Мимаса (большая полуось 185 500 км), так что источником малых частиц в яркой дуге и в самом кольце G может быть Эгеон.



На последовательно полученных с помощью АМС “Кассини” (в течение 10 мин) трех снимках показано движение в кольце G вновь обнаруженного спутника Эгеон (указан в квадрате). Снимки получены 3 марта 2009 г. Фото NASA/JPL/Space Science Institute.

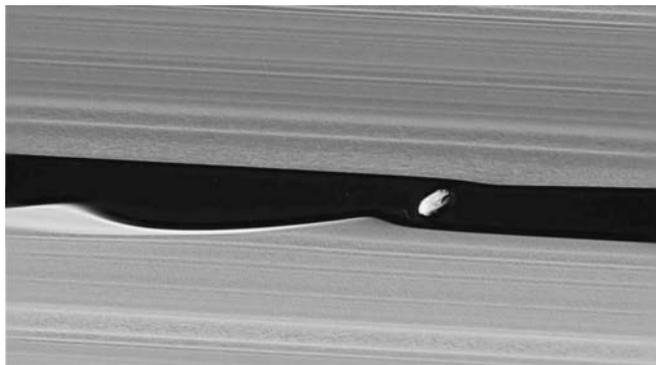
В 2009 г. был открыт спутник S/2009 S1 во внешнем кольце В (B-ring) по его тени длиной 36 км на поверхности колец. В момент открытия его расстояние от центра Сатурна было 117 тыс. км, его размер оказался равным 300 м. Это – самый ближний спутник Сатурна, следующий, спутник Пан, находится на расстоянии 133 600 км от планеты.

Основные элементы структуры колец Сатурна

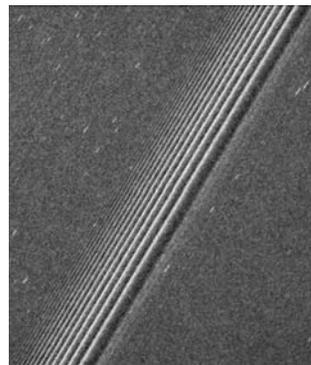
Название	Расстояние до центра Сатурна, км	Ширина, км
Кольцо D	67 000–74 500	7500
Кольцо C	74 500–92 000	17 500
Щель Колombo	77 800	100
Щель Максвелла	87 500	270
Щель Бонда	88 690–88 720	30
Щель Дейвса	90 200–90 220	20
Кольцо B	92 000–117 500	25 500
Деление Кассини	117 500–122 200	4700
Щель Гюйгенса	117 680	285–440
Щель Гершеля	118 183–118 285	102
Щель Рассела	118 597–118 630	33
Щель Джефриса	118 931–118 969	38
Щель Койпера	119 403–119 406	3
Щель Лапласа	119 848–120 086	238
Щель Бесселя	120 236–120 246	10
Щель Барнарда	120 305–120 318	13
Кольцо A	122 200–136 800	14 600
Щель Энке	133 570	325
Щель Килера	136 530	35
Деление Роша	136 800–139 380	2580
R/2004 S1	137 630	300
R/2004 S2	138 900	300
Кольцо F	140 210	30–500
Кольцо G	165 800–173 800	8000
Кольцо E	180 000–480 000	300 000
Кольцо Фебы	7 700 000–12 500 000	4 800 000

НОВЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ В КОЛЬЦАХ САТУРНА

Самым удивительным было открытие особых структур в кольцах Сатурна – сгущений, называемых “пропеллерами”, имеющих характерную “двуручную” форму винта самолета, вызываемую притяжением маленьких тел, которые трудно различить среди камней и пыли (ЗиВ, 2011, № 4, с. 27). Сами спутники слишком малы и не видны на снимках “Кассини”, однако их присутствие проявляется формированием двух лопастей из отклоненных частиц кольца. Прогнозы таких структур в кольцах Сатурна были сделаны еще в 2000 г., причем авторы Франк Шпан (Германия) и Миодраг Сремчевич (Югославия) указали, что некоторые вариации плотности в кольцах Сатурна могут быть вызваны наличием крохотных спутников (moonlets). Подобные структуры (длиной в несколько сотен километров и толщиной приблизительно в 1 км) впервые обнаружены с помощью “Кассини” в 2006 г. в центральной части кольца А (A-ring) – той области, которая сейчас известна под названием “пояс пропеллеров” (“Propeller Belts”). Крошечные спутники расталкивают материал колец на несколько километров в плоскости, перпендикулярной плоскости колец. Объекты, находящиеся внутри, недостаточно велики для того, чтобы расчистить от вещества орбиту, как это сделали спутники Пан и Дафнис (размером 30 и 8 км), движущиеся в пустом пространстве внутри колец. Мелкие луны (поперечником до 1 км) генерируют вокруг себя “пропеллеры” из мелких частиц кольца. В радиальном направлении возмущения такого потока достигают 5 км. Вдоль орбиты кольца и микроспутника большой “пропеллер” вытягивается, порой, на 1100 км (если считать по темной ленте возмущений окружающего материала) или на 110 км (если учитывать только сильно выступающую полосу



а



б

Гравитационное влияние малых тел на вещество колец Сатурна: а – спутник SXXXV Дафнис (Daphnis) размером 8 км внутри 42-км щели Килера (Keeler Gap); б – область “Propeller Belts” в средней части кольца А Сатурна. “Пропеллеры” – маленькие яркие черточки; выглядят как двойные тире, видимые с обеих сторон волны, которая пересекает кольца. Снимки получены 16 января и 10 мая 2017 г. с помощью АМС “Кассини”. Фото NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.

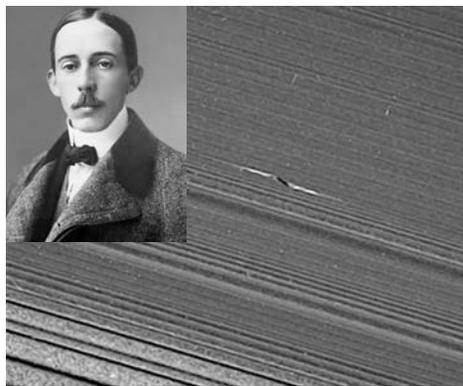
ярко освещенных частиц). Внедренные в кольцо спутники поднимают материал на 0,5 км выше (и ниже) плоскости кольца, что значительно превышает типичную толщину колец – около 10 метров.

В относительно узкой полосе в середине кольца А оказались три пояса “пропеллеров” (“Trans-Encke”) на расстоянии между 127 000 и 132 000 км от центра Сатурна с общим количеством “пропеллеров” от 7000 до 8000, с радиусом микроспутников, составляющим примерно 0,15 км. Дальнейшие наблюдения показали, что популяция “пропеллеров” также существует во внешней части кольца А, между щелью Энке и внешним краем кольца А (то есть между 133 700 и 136 700 км от центра Сатурна). Они малочисленны, но значительно больше по размеру, чем те, что видны в поясе “Propeller Belts”. Некоторые из “пропеллеров” в “Trans-Encke” были зафиксированы несколь-

ко раз, что указывает на их орбитальную устойчивость. В области между “Propeller Belts” и щелью Энке (Encke Gap) “пропеллеры” не найдены.

Исследователи обнаружили и сфотографировали 11 гигантских “пропеллеров”. Индивидуальные “пропеллеры” получили имена пионеров авиации: в частности, “пропеллер Сантос-Дюмон” назван в честь бразильско-французского авиатора Альберто Сантос-Дюмона (Santos-Dumont; 1873–1932). “Пропеллер Блерио” – крупнейшая структура в кольцах Сатурна, которая появлялась на снимках “Кассини” более 100 раз –

Гигантский “Пропеллер Сантос-Дюмон” в кольце А Сатурна. Снимок сделан 22 марта 2017 г. с помощью АМС “Кассини” с расстояния 111 340 км (разрешение – 620 м). Во врезке – портрет А. Сантос-Дюмона.





Пан



Дафнис



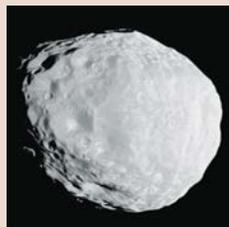
Атлас



Прометей



Пандора



Янус



Эпиметей



Мефона



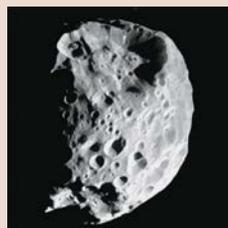
Телесто



Калипсо



Елена

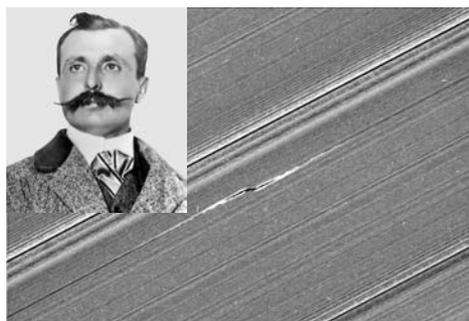


Феба

Малые спутники Сатурна. Снимки получены в 2004 – 2016 гг. с помощью АМС “Кассини” во время близких пролетов около спутников. Фото NASA/JPL

названа в честь французского авиатора начала XX в. Луи Блерио (Bleriot; 1872–1936), первым перелетевшим через Ла-Манш. Более массивный спутник внутри “пропеллера Блерио” примерно на 60% больше микроспутника из “пропеллера Сантос-Дюмона” и в четыре раза его массивнее. “Пропеллер Эрхарт” достигает

в длину 60 км (считая только светлую часть) и генерируется микроспутником примерно километровой поперечника; он назван в честь знаменитой американской летчицы Амелии Эрхарт (Earhart;



“Пропеллер Блерио” в кольце А – самый большой из таких структур в кольцах Сатурна. Яркая узкая полоса материала непосредственно связывает крошечный спутник (не виден) с кольцом; продольная тень вдоль “пропеллера” представляет собой темный разрыв, образованный спутником. Яркие полосы, обрамляющие зазор шириной 2 км, – области повышенной плотности частиц (имеют вид снежного кома) диаметром около 1 км. Снимок получен 10 мая 2017 г. с помощью АМС “Кассини”. Фото NASA/JPL–Caltech/ Space Science Institute. Во врезке – портрет Л. Блерио.

1897–1937), первой женщины-пилота, перелетевшей Атлантический океан.

Микроспутники, находящиеся внутри “пропеллеров” в кольцах Сатурна, являются первыми объектами, которые имеют свои орбиты и движутся не в пустом пространстве, а внутри диска. За орбитами этих структур ученые наблюдали на протяжении нескольких лет, и было замечено отклонение в их движении от теории небесной механики И. Кеплера. Их отклонение по долготе от постоянной угловой скорости составляет около $0,2^\circ$ долготы, причем мгновенное среднее движение было немного быстрее среднего с 2005 по 2007 г., медленнее среднего с 2007 по 2009 г. и ускоряется снова в начале 2009 г. Двухнаправленный характер эволюции исключает применение простых моделей, в которых крутящий момент применяется только в одном направлении, но не ясно, меняется ли направление крутящего момента квазипериодически или из-за детерминированного колебания. Большинство теорий, предложенных для объяснения движения спутников внутри “пропеллеров” основаны на гравитационных взаимодействиях или

столкновениях микроспутников с окружающим диском.

Итак, изучение движения такого рода спутников дает возможность непосредственного наблюдения за процессами, которые важны в протопланетных сценариях и в других дисковых системах.

Будущие исследования Титана и Энцелада планируются с помощью совместного проекта “Titan Saturn System Mission” американского и европейского космических агентств, намеченного на 2020-е годы. Два спутника являются уникальным исключением среди спутников Сатурна, оба они демонстрируют присутствие атмосферы. Плотная атмосфера Титана и слабая разреженная атмосфера Энцелада, которую спутник из-за слабой гравитации не способен удержать, ставят новые вопросы перед исследователями. Необходимо определить источники постоянного пополнения метана на Титане и элементов атмосферы на Энцеладе. Основной задачей будущих миссий будет исследование общих закономерностей и существенных различий в геологической, химической и эволюционной истории Титана и Энцелада.