

Ральф Лоренц и Кристоф Сотен
Перевод: В.Е. Сурдин

СПУТНИК, КОТОРЫЙ МОГ БЫ БЫТЬ ПЛАНЕТОЙ

Титан, крупнейший естественный спутник Сатурна, едва ли заслуживает называться просто спутником. Его атмосфера толще, чем у Земли, а поверхность почти такая же изменчивая.

Изображения, переданные с Титана, напоминают новые фотографии Марса или Земли. Действительно, некоторые люди в Центре управления узнали в них калифорнийский берег, другие — французскую Ривьеру, а кто-то даже сказал, что крупнейший спутник Сатурна выглядит точь-в-точь как двор его дома в Тусоне. Отделившись от аппарата «Кассини», зонд «Гюйгенс» три недели в дремлющем состоянии двигался в сторону Титана. С волнением наблюдая за этим экспериментом, мы чувствовали глубокую личную связь с зондом, работа над которым составила большую часть нашей карьеры. Кроме того, разрабатывая его приборы и системы, мы часто пытались представить, как ему следует функционировать в чуждом и почти неизведанном мире, и предполагали, что Титан похож на такие же крупные спутники во внешней области Солнечной системы, например на спутники Юпитера — покрытую кратерами Каллисто или изрытый канавками Ганимед.

Поэтому теперь уже давним утром 14 января 2005 г. в Европейском центре управления в Дармштадте (Германия) изображения Титана вызвали как восхищение, так и недоумение. Никто не ожидал, что ландшафт будет так похож на земной. Когда «Гюйгенс» опускался на парашюте, переданные им снимки показали разветвленную речную сеть, прорезанную дождевыми потоками. Зонд опустился на сырую, покрытую галькой равнину со следами недавнего паводка. Пейзажи Титана оказались мистическими и знакомыми.

За прошедшие годы у нас было время для анализа переданных зондом данных и включения их в большую картину, которую постоянно дополняет «Кассини», пролетев мимо Титана уже несколько сот раз по замкнутой вокруг Сатурна орбите. Своими размерами (большими, чем у Меркурия), динамизмом (активнее, чем Марс) и атмосферой (плотнее, чем у Земли) Титан вполне заслужил право называться планетой. Разнообразные геологические процессы изменяют его поверхность. Метан на Титане играет ту же роль, что вода на Земле. Он испаряется из озер, образует облака, выпадает в виде осадков, прокладывает русла по долинам и вновь стекает в озера. Если бы в атмосфере Титана было немного кислорода и температура была не -180°C , мы бы чувствовали себя там как дома.

До полета зонда «Кассини-Гюйгенс» Титан был загадкой: крупнейшее — больше планеты Меркурий — из оставшихся в Солнечной системе тел, поверхность которого никто не видел.

Пробившись сквозь туман с помощью инфракрасной камеры, радара и посадочного аппарата, экспедиция обнаружила богатый ландшафт с реками, озерами, дюнами, горами и, возможно, вуканами. Это замерзший вариант Земли, где вместо воды метан, вместо камня вода, а погодные циклы длятся столетиями.

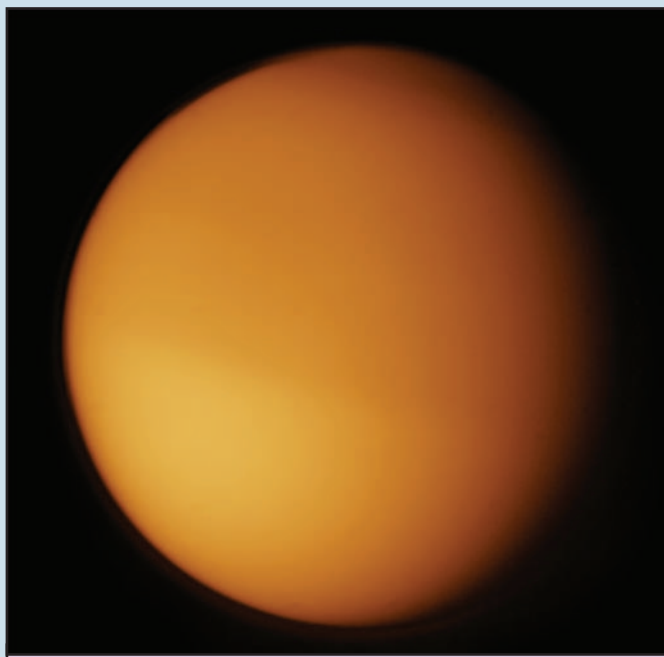
Изучение Титана уже помогает понять геологические процессы на нашей планете, такие как формирование дюн и вариации климата

МОРЯ ПЕСКА, МОРЯ МЕТАНА

До полета «Кассини» наши представления о Титане были в прямом смысле слова туманными. Когда в 1980 и 1981 гг. мимо него пролетали «Вояджеры», они увидели окутанный туманом оранжевый шар. Лучшее, что удалось получить наземным обсерваториям в середине 1990-х гг., была грубая инфракрасная карта, на которой видны расплывчатые темные и светлые области. Ученые рассуждали о поверхности и атмосфере Титана так, как будто бы одним числом или одной фразой можно описать всю планету. Новые данные показали, как разнообразен Титан. Теперь мы можем обсуждать низкоширотные песчаные моря, или атмосферу над северным полюсом летом, или облачный день в районе южных озер.

Низкие широты Титана покрыты яркими складчатыми холмами, среди которых выделяется обширная область Ксанаду, и темными песчаными морями, которые раньше считали жидкими. (Астрономы всегда пытаются назвать темные области «морями»; известный пример — лунные моря.) Песчаные дюны стометровой высоты похожи на самые большие дюны Земли и тянутся на десятки и сотни километров. Темный песок Титана, в отличие от земного, состоит не из силикатных минералов, таких как кварц, а из углеводородов, и похож на кофейную гущу.

Вокруг полюсов мы обнаружили жидкие углеводороды — небольшие озера в обрывистых котлованах диаметром несколько десятков километров: мелководье Онтарио чуть больше своего тезки, озера Онтарио, и море Кракен такого же размера, как и



При полете «Вояджера-1» к Сатурну в 1980 г. перед учеными встал выбор между пролетом вблизи Титана и дальнейшим полетом к Плутону. Они выбрали первое. Но увидели сплошной туман — «пушистый бесшовный теннисный мяч», как вспоминал член группы Тобиас Оуэн (Tobias Owen). Команда «Вояджера-2» решила пропустить Титан. Хотя снимки не оправдали надежд, ультрафиолетовые, инфракрасные и радиоприборы «Вояджера-1» позволили выяснить, что атмосфера Титана в основном состоит из азота, и что условия в ней благоприятны для образования метановых облаков, дождя и даже океанов. Но самое интересное, конечно, скрывал туман

Каспий. Похоже, что уровень поверхности этих озер изменяется со временем. Между пустынными тропиками и влажными полярными областями вклиниваются весьма странные средние широты с их сильно размытым ландшафтом и следами течения жидкости.

После экспедиций «Вояджер» планетологи заподозрили, что на Титане должен быть круговорот метана — с облаками, дождями и морями, — аналогичный круговороту воды (гидрологическому циклу) на Земле. Этот прогноз частично основывался на том, что температура поверхности Титана близка к тройной точке метана, подобно тому как температура земной поверхности близка к тройной точке воды. При этой температуре сосуществуют газовое, жидкое и твердое состояния. Действительно ли переход между этими тремя состояниями вещества регулирует температуру на Титане или это всего лишь совпадение? Первые факты в пользу этой идеи дали наземные наблюдения в конце 1990-х гг.: в телескопы было замечено появление облаков как раз на тех высотах, где должен конденсироваться метан. Более детальные наблюдения в телескоп, а затем и снимки «Кассини», показали эти облака «в действии»: они вздымаются вверх, точно наши кучевые облака, а затем рассеиваются, когда капли выпадают дождем. В некоторых местах «Кассини» наблюдал потемнение поверхности после прохода над ней облака: вероятно, из облака лил дождь.

«Кассини» сам не наблюдал осадков, но снимки, полученные «Гюйгенсом» при его спуске на поверхность, не оставляют сомнений, что частично ландшафт Титана сформирован ливнями и быстрым течением жидкости по поверхности. Зонд опу-

стился в 10° к югу от экватора, на краю ярких ледяных холмов в середине огромного песчаного моря. На фото вдали видны длинные дюны, но само место посадки больше напоминает русло потока, заваленное булыжниками поверх песка. Пентерометр, созданный одним из авторов (Ральф Лоренц) еще в бытность студентом университета, за 12 лет до того как прибор попал к месту назначения, проник в грунт и измерил его механические свойства, показав, что грунт мягкий, но связанный, похожий на мокрый песок или глину.

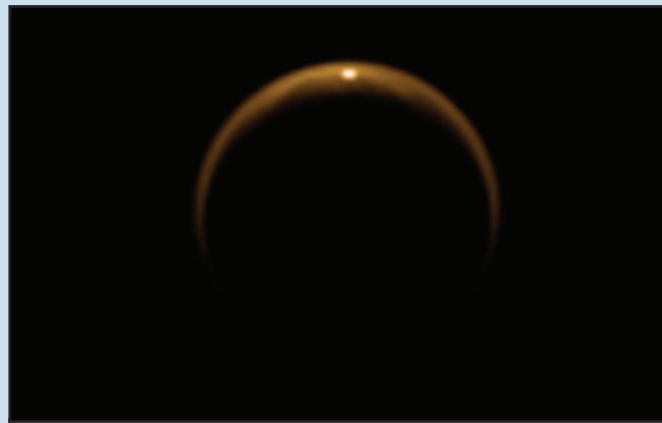
Согласно показаниям термометров, зонд очень быстро остыл: вероятно, грунт под ним был влажным; ведь если сунуть палец в мокрый песок, он покажется холоднее сухого песка. В последних работах полагают, что метановый пар из-под днища «Гюйгенса» мог сконденсироваться на холодном козырьке камеры зонда: на одном из снимков отчетливо видно отражение света от капельки росы при ее падении в поле зрения камеры. Это первый близкий снимок внеземной жидкости.

ПЛАНЕТА ВЗБЕСИЛАСЬ

В отношении гидрологического цикла Титан — то же, что Венера для парникового эффекта: в обоих случаях земные процессы доведены у них до экстремального состояния. На Земле солнечной энергии достаточно для испарения примерно 1 м воды в год. Но атмосфера может удержать только один-два сантиметра осаждаемой влаги до конденсации облаков и выпадения дождя, поэтому для земной погоды в основном характерны легкие дожди, выливающие несколько сантиметров воды каждую неделю или две.

На Титане недостаток солнечного тепла приводит к испарению всего лишь около 1 см в год. Но его атмосфера может удержать около 10 м эквивалентной жидкости. Поэтому в промежутках между вековыми периодами засухи для него должны быть характерны проливные дожди, рождающие бурные потоки. На месте приземления «Гюйгенса», вероятно, тоже было половодье, случившееся за месяц до посадки — или за тысячу лет до нее. Мощные погодные циклы Титана — это экстремальная версия того, что может случиться на Земле из-за глобального потепления. По мере нагрева земной тропосферы (нижнего слоя атмосферы) она сможет удерживать все больше влаги, поэтому ураганы и засухи у нас станут более интенсивными.

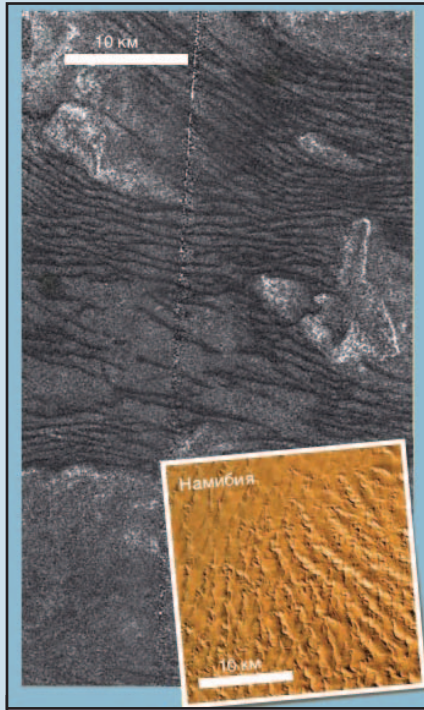
На Земле в тропиках доминирует циркуляция Хэдли. Теплый воздух поднимается на экваторе и по мере течения к полюсам сносится вращением планеты. Примерно на 30-м градусе широты воздух опускается к поверхности. Поскольку опускающийся



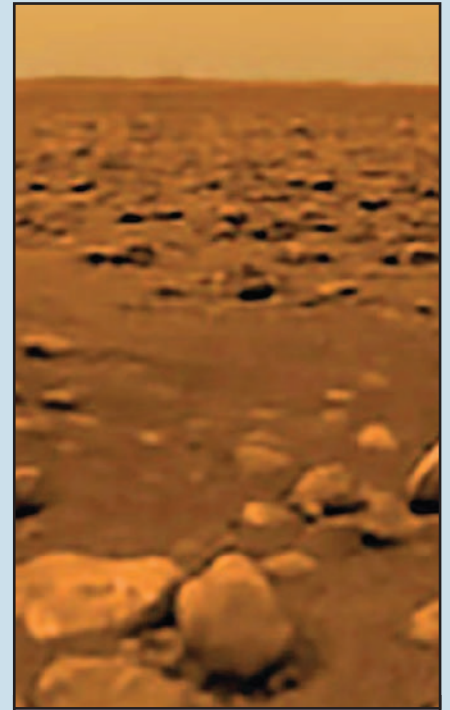
Солнечный блик в Море Кракен заметила инфракрасная камера «Кассини» в июле 2009 г. Это озеро было окутано зимней тьмой и только в августе вернулось к весеннему свету



Северная полярная область Титана; изображение получено радаром «Кассини». Темные области — это, по-видимому, озера метана и этана. Видны три крупнейших озера на Титане, получившие имена. Жидкость выглядит темной по той же причине, что и мокрая дорога ночью в свете фар: ровная поверхность отражает свет и радиоволны в сторону от источника. А сухой грунт рассеивает лучи и выглядит ярким (золотистый)



Песчаные дюны в области Белет видны на радарных снимках как темные полосы. Длинной в десятки и сотни километров, они идут вдоль среднего направления ветра, обходя светлые холмы. Этот песок, вероятно, состоит из молекул углеводородов, типа сгущенного смога. Несмотря на столь экзотический состав, эти дюны имеют такую же структуру и высоту, как крупнейшие дюны на Земле, например в пустыне Намиб, — возможно, потому, что приземный турбулентный слой атмосферы на обеих планетах имеет одинаковую толщину



«Гюйгенс» увидел ландшафт из ледяных булыжников размером с кулак, разбросанных по мокрому песку. Их округлая форма свидетельствует о том, что они обкатаны в потоках жидкости, вероятно, метана

ГЛОБАЛЬНЫЙ АПОКАЛИПСИС?

Наряду с коротким водным циклом, управляемым солнечной энергией, на Земле есть и длительный цикл, связанный с тектоникой плит. В этом цикле происходит и обмен водой между недрами Земли и ее поверхностью. С

периодичностью в сотни миллионов лет вода выходит из недр через горячие вулканические точки и подводные хребты, а затем возвращается в недра в зонах субдукции, где плиты земной коры сталкиваются и тонут. Если бы этого цикла не было, вода оставалась бы в атмосфере и в конце концов улетучилась бы в космос.

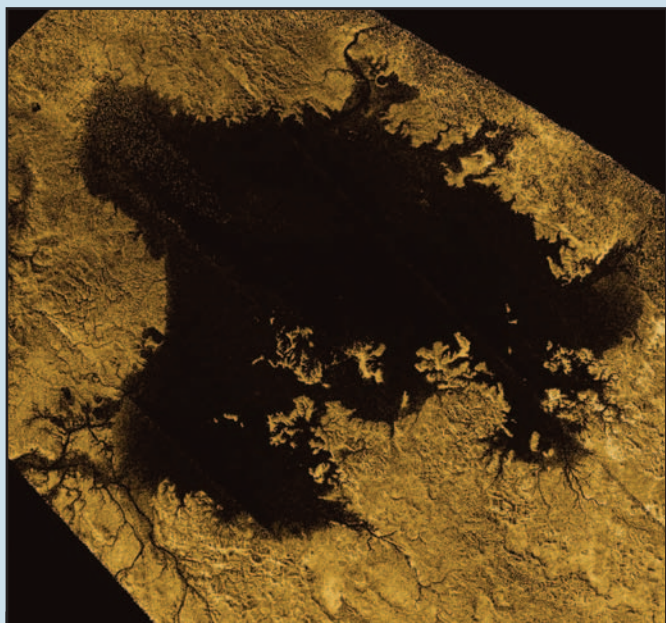
А как на Титане? Питаемые Солнцем фотохимические реакции в его верхней атмосфере с такой скоростью синтезируют тяжелую органику, что они могли бы использовать весь метан из атмосферы и с поверхности за несколько миллионов лет, если бы он не пополнялся. Значит, на Титане должны быть подповерхностные резервуары метана, которые выделяют газ в атмосферу, — по аналогии с длительным водным циклом Земли.

«Кассини» не заметил горячих вулканических точек и признаков тектонических плит, но обнаружил по крайней мере две области (Арка Хотей и Область Туи), которые выглядят как замерзшие вулканические потоки. В ближнем инфракрасном диапазоне они смотрятся ярче других областей Титана, что говорит об их ином составе. Некоторые полагают, что яркое вещество — это лед из изверженной двуокиси углерода или аммиака, но все же его состав и происхождение остаются загадкой. Еще один признак геологической активности — почти полное отсутствие ударных кратеров. Вероятно, их стерли вулканические или какие-то схожие процессы. Исходя из ожидаемой частоты

воздух сух, большинство пустынь на Земле расположены вблизи этой широты. Но Титан вращается очень медленно — один оборот за 15 суток. Поэтому соответствующая циркуляция простирается от летних средних широт до зимнего полюса, и в результате вся экваториальная область становится засушливой; вот почему большие песчаные моря концентрируются вблизи экватора.

Атмосфера Титана, хотя и намного более холодная, имеет температурный профиль, похожий на земной. Тропосфера нагревается за счет парникового эффекта, на высоте температура снижается. Над тропосферой лежит стратосфера, которая греется, поглощая солнечные лучи; на Земле их вбирает озон, а здесь — плотный туман, окутывающий весь спутник. Это основная тема современных исследований Титана — знакомая физика незнакомого вещества.

Для анализа тумана «Кассини» собрал его образцы в верхней атмосфере, на высоте около 1 тыс. км, когда проносился мимо Титана. До этого мы ожидали, что туман состоит из довольно легких углеводородных молекул, таких как этан с молекулярным весом 30. Но «Кассини» обнаружил неожиданное обилие тяжелых органических молекул, включая бензол, антрацен и макромолекулы с молекулярными весами 2 тыс. или более. Это вещество формируется из атмосферного метана под действием солнечного света. Вероятно, оно постепенно слипается в более крупные частицы и опускается на поверхность, образуя песчаные моря, но детали данных процессов не ясны.



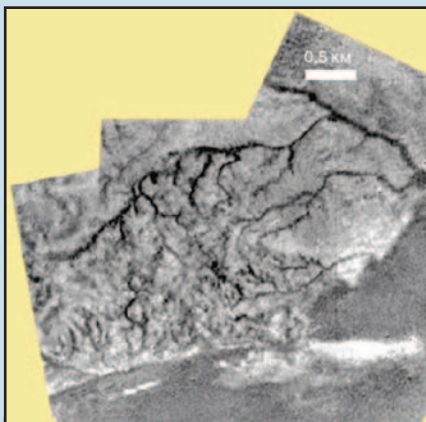
На детальном изображении Моря Лигея видны острова, рифы и другие структуры, характерные для морей Земли

метеоритных ударов, возраст поверхности оценивается от 200 млн до 1 млрд лет.

Поскольку на Титане нет тектоники плит, круговорот вещества в его недрах может происходить не постоянно, как на Земле, а рывками. В одном из вариантов истории Титана выход метана из его недр в атмосферу происходил трижды: в период формирования Титана 4,5 млрд лет назад, в эпоху начала конвекции в ядре 2,5 млрд лет назад и в эпоху начала конвекции в ледяной коре в последний миллиард лет. Последний эпизод должен был запустить глобальную вулканическую катастрофу, которая затронула всю поверхность и напоминала такой же масштабный катаклизм, случившийся на Венере около миллиарда лет назад. Сразу после выброса метана поверхность могла быть даже более влажной, чем сейчас. Между эпохами активности Титан был тектонически спокоен, а выход метана из недр был незначительным. Эта модель объясняет не только малое число кратеров, но и изотопный состав атмосферы.

Математическая модель, описывающая эволюцию недр Титана, предсказывает, что наряду с глубинными запасами метана там может быть и подпочвенный океан жидкой воды. Проведенные «Гюйгенсом» электрические измерения намекают на существование электропроводящего слоя на глубине около 45 км, и вода здесь — главный кандидат. Радарные измерения «Кассини» показывали, что кора вращается быстрее ядра, как если бы жидкий слой действовал подобно смазке, позволяющей этим двум частям двигаться с разной скоростью; однако недавний пересмотр измерений поставил этот вывод под сомнение.

К сожалению, атмосфера Титана не позволяет «Кассини» приблизиться к поверхности и поискать наведенное магнитное поле, которое Сатурн мог бы возбудить в океане. Такие поля были решающими при поиске океанов у спутников Юпитера.



Речные русла могли быть прорезаны потоками жидкого метана, стекающими с окрестных гор (высотой около 200 м) вниз к озерной впадине (сейчас сухой). Сеть притоков указывает, что на поверхность выпадают метановые дожди. «Гюйгенс» сделал этот снимок с высоты 6,5 км, когда снижался на парашюте

Ученые пытаются выяснить, можно ли будет обнаружить это вторичное поле, и планируют на ближайшее десятилетие поиск магнитного сигнала и искажений гравитационного поля Титана.

ЛЕДНИКОВЫЕ ПЕРИОДЫ ТИТАНА

Наряду с явлениями погоды, имеющими сезонный цикл, и колебаниями состава атмосферы, происходящими за геологическое время, на Титане и на Земле происходят изменения климата с цикличностью от десятков до тысяч миллионов лет. Сначала в XIX в. шотландский ученый Джеймс Кролл (James Croll), а затем в начале XX в. сербский геофизик Милутин Миланкович (Milutin Milankovic) предположили, что гравитационные силы других планет медленно меняют наклон земной оси и форму ее орбиты, изменяя интенсивность солнечного нагрева и вызывая ледниковые периоды.

В южном полушарии Титана лето короче, но жарче, чем в северном, из-за того, что Сатурн (а с ним и Титан) движется вокруг Солнца по эллиптической орбите. В середине южного лета он примерно на 10% ближе к Солнцу. Такая несимметричность сезонов может быть причиной перекачивания летучих соединений типа метана и этана с юга на север, где сейчас значительно больше озер и морей. Но со временем меняется относительная

ориентация полюса Титана и эллиптической орбиты Сатурна. Через 30 тыс. лет лето в северном полушарии станет более теплым. Озера на севере высохнут, а на юге образуются новые. Так что и в этом смысле Титан больше похож на планету земного типа, чем на ледяной спутник.

Открытие «Кассини» экзотического, но все же знакомого ландшафта заставило ученых по-новому взглянуть на Землю. Например, поля с длинными песчаными дюнами на Титане напоминают пустыни Намиб и Сахару, где дюны вытянуты вдоль средней линии между двумя основными направлениями ветра. При моделировании атмосферы Титана пока не удается воспроизвести ориентацию дюн. Это может означать, что специалисты не до конца понимают, как формируются такие дюны, или же при моделировании не учитываются те факторы, которые управляют ветрами на Титане. Кроме того, наблюдения за озерами на Титане показали, что их поверхность мертва: нет и намека на волны, хотя при низкой гравитации и плотном воздухе волнение должно возрастать. Следует ли нам уточнить теорию ветровой генерации волн? Скорость вращения

Титана может слегка меняться от сезона к сезону, поскольку атмосфера и поверхность тормозят и ускоряют друг друга как огромные маховики: в более слабом виде это явление заметно и у Земли.

Таким образом, как это часто бывает при изучении планет, открытия «Кассини» вызвали новые серьезные вопросы. Научные проблемы, связанные с Титаном и вообще с взаимодействием поверхности и атмосферы планет, требуют новых экспедиций, подобных марсианской программе NASA, подразумевающих использование посадочных и самоходных аппаратов и даже аэростатов.

