

УДК 551.21

## КРИОВУЛКАНИЗМ И ДЕГАЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ТИТАНЕ, СПУТНИКЕ САТУРНА

© 2021 г. Л. К. Малышева<sup>а, \*</sup>, А. И. Малышев<sup>а, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Акад. Вонсовского, 15, Екатеринбург, 620016 Россия

\*e-mail: malysheva@igg.uran.ru

\*\*e-mail: malyshev@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 04.08.2020 г.

После доработки 26.10.2020 г.

Принята к публикации 11.12.2020 г.

В работе рассмотрены распространение, разнообразие и особенности вулканических и дегазационных процессов на Титане, а также проанализированы максимальные газовые концентрации летучих соединений по вертикальному профилю его недр и атмосферы. Показано, что специфика вулканических и дегазационных процессов на Титане обусловлена низкими температурами, своеобразным вещественным составом и повсеместным распространением подповерхностного горизонта жидкости. Вследствие этого обычные (для Земли) формы (крио-)вулканической активности здесь редуцированы, тогда как широко распространены 1) “газлифтинговая дегазация”, формирующая многочисленные небольшие депрессии с повышенным уровнем жидкости и, возможно, являющаяся причиной появления “волшебных островов” в Море Лигеи, а также 2) лимнологические выбросы газообразного метана с последующим интенсивным облакообразованием, развитием метановых бурь и выпадением больших объемов осадков. В свою очередь и газлифтинговая дегазация, и лимнологические выбросы эндогенного метана обусловлены инверсией “конденсат → газ” на глубинах 1–2 км в недрах Титана. Ниже этого уровня эндогенные флюиды представлены практически безгазовыми конденсатами, тогда как выше — начинается их интенсивное вскипание. Сделан вывод о том, что дегазационные процессы являются важнейшим рельефообразующим фактором на Титане.

*Ключевые слова:* Титан, криовулканизм, дегазация, углеводороды, газлифтинг, лимнологические катастрофы

DOI: 10.31857/S0203030621030044

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение внеземного вулканизма и его сравнение с земными аналогами имеет большое значение для понимания природы вулканических процессов. В частности, несмотря на разнообразие внеземных проявлений вулканической деятельности, каких бы то ни было признаков тектоники плит, с которой обычно увязывают земной вулканизм, на других небесных телах Солнечной системы не обнаружено. Ранее было показано [Малышева, 2004; Малышев, Малышева, 2009], что дегазационный потенциал небесных тел, соответствующий аккумуляционному в них в процессе аккреции запасу летучих соединений, в первом приближении пропорционален объему небесных тел, а следовательно, уменьшается в кубической зависимости от размера этих тел. С другой стороны, возможность реализации этого потенциала может быть обусловлена как естественными (за счет выделения энергии при гравитационной дифференциации вещества), так и принуждающими (разогрев под воздействием

метеоритной бомбардировки или под воздействием сил приливного трения) процессами. В первом случае происходит быстрое уменьшение масштаба дегазационных процессов, так как кроме общего снижения дегазационного потенциала (в кубической зависимости от размера тел) падает и способность к реализации дегазационного потенциала (за счет уменьшения силы тяжести). Во втором случае, т.е. при развитии дегазационных процессов под внешним воздействием, масштаб этих процессов и их продолжительность зависят еще и от величины внешнего воздействия. Первый случай хорошо иллюстрирует эволюция древнего марсианского вулканизма [Малышев, Малышева, 2003], второй — современный вулканизм Ио (спутник Юпитера). Под воздействием приливного разогрева недр Ио давно потерял основную массу наиболее легко отделяемых летучих (H, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub> и т.п.), и сейчас вулканический процесс поддерживается дегазацией летучих “второго эшелона”, т.е. более тяжелых соединений (S<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, паров Na, K и т.д.) [Малышева,

2004]. Ко второму типу относится и современная активность Титана, стимулируемая приливным разогревом недр из-за его взаимодействия с Сатурном. По определению, вулканизм есть поверхностное проявление магматических процессов, однако, как сказал еще Ф.А Перре, “газ — это активный агент, и магма является его переносчиком”. Поэтому в общем случае вулканическая деятельность может рассматриваться как поверхностное проявление планетарных дегазационных процессов [Малышев, 2000, 2007, 2015; Малышева, 2004].

На Титане установлены (крио)вулканические формы рельефа, есть факты, свидетельствующие о наличии современной эндогенной активности. Однако за все время наблюдений исследователи не смогли обнаружить признаки вулканической активности и однозначно идентифицировать ни одну “горячую” точку. Поэтому работа посвящена специфике (крио)вулканических и дегазационных процессов на поверхности Титана. Ее задачи: проанализировать имеющиеся данные; выявить и устранить причины возникших затруднений в поиске признаков современной активности; в первом приближении охарактеризовать и классифицировать дегазационные и (крио)вулканические процессы на Титане и на их примере проиллюстрировать многообразие дегазационных процессов и их значение как универсальной движущей силы планетарного вулканизма.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В нашей Солнечной системе Титан — единственный спутник с существенной атмосферой, причем единственное кроме Земли небесное тело, обладающее плотной азотной атмосферой и имеющее устойчивую жидкую среду на своей поверхности. Титан — самый крупный спутник Сатурна, его радиус составляет 2575 км. Титан находится на расстоянии  $\sim 1.43$  млрд км (9.5 а. е.<sup>1</sup>) от Солнца и  $\sim 1.22$  млн км от Сатурна. Оси собственного вращения Титана и Сатурна практически параллельны и отклонены от оси их вращения вокруг Солнца примерно на  $27^\circ$ . Это обеспечивает на Титане смену времен года “зима—лето” с циклическостью, равной периоду вращения Сатурна вокруг Солнца — 29.5 земных лет. Сутки на Титане делятся 15.9 земных суток. За это время Титан делает один оборот вокруг Сатурна. По сравнению с Землей Титан получает около 1% солнечного теплового потока. При этом до поверхности Титана доходит 10% от того, что получает верхняя часть атмосферы (57% для Земли) [Hörst, 2017]. В результате температура поверхности очень низкая ( $-180^\circ\text{C}$ ). Тем не менее, годовой и суточной

изменчивости в поступлении солнечного тепла вполне достаточно для циклических климатических и метеорологических процессов, в частности для формирования атмосферных потоков, явлений испарения и конденсации как в атмосфере, так и на поверхности. Значение эксцентриситета орбиты Сатурна (0.054) обуславливает асимметрию смены времен года на южном и северном полушариях Титана — южное лето более короткое и жаркое, чем северное: в разгар южного лета полярная атмосфера получает на  $1.5 \text{ Вт/м}^2$  больше солнечного потока, чем на пике северного полярного лета [Aharonson et al., 2009].

Средняя плотность Титана равна  $1.9 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ , масса —  $1.34 \times 10^{23} \text{ кг}$  (2% массы Земли), гравитация составляет седьмую часть земной. Из-за сочетания низких температур и гравитации Титан обладает достаточно мощной атмосферой с приповерхностным давлением в полтора раза выше земного. Поверхностные  $T-P$  условия Титана близки к тройной точке метана, поэтому на Титане возможен постоянный углеводородный цикл, аналогичный круговороту воды на Земле. Большой объем информации о Сатурне и его спутниках был получен при помощи автоматической межпланетной станции (АМС) Кассини—Гюйгенс, вышедшей на заданную орбиту вокруг Сатурна 1 июля 2004 г. Спускаемый аппарат (СА) Гюйгенс 14 января 2005 г. совершил мягкую посадку на поверхность Титана в районе его экватора, однако спустя 72 мин связь с СА была потеряна. Орбитальная станция (ОС) Кассини исследовала систему Сатурна 13 лет и была разрушена в ходе финального эксперимента по изучению атмосферы Сатурна. Начало работы АМС Кассини—Гюйгенс соответствует лету в южном полушарии Титана и зиме — в северном. Длительные наблюдения, начавшиеся спустя 2 года после зимнего солнцестояния (октябрь 2002 г.), захватили равноденствие на Титане (август 2009 г.) и продолжались вплоть до летнего солнцестояния (май 2017 г.), что позволило изучить климатические изменения в обоих полушариях при смене времен года [Hörst, 2017]. Ниже изложена краткая информация об атмосфере спутника и его поверхности. Более подробный обзор имеющихся данных представлен в работе [Малышева, Малышев, 2020].

## АТМОСФЕРА

В составе атмосферных газов [Clark et al., 2010] преобладает азот (95–98%), присутствуют метан (5–1.4%), водород (0.1–0.4%), аргон ( $4.3 \times 10^{-3}\%$ ), этан ( $n \times 10^{-3}\%$ ), ацетилен ( $n \times 10^{-4}\%$ ), пропан ( $n \times 10^{-5}\%$ ), этилен ( $n \times 10^{-5}\%$ ), СО ( $n \times 10^{-3}\%$ ) и СО<sub>2</sub> ( $n \times 10^{-6}\%$ ), вода ( $n \times 10^{-6}\%$ ), среди атмосферных аэрозолей зарегистрированы следы ам-

<sup>1</sup> а. е. — астрономическая единица, среднее расстояние от Земли до Солнца, 149.5 млн км.

миака. В северной полярной области Титана в течение зимы образуется аэрозольное облако цианистого водорода. В небольших концентрациях обнаружены пропилен  $C_3H_6$ , диацетилен  $C_4H_2$ , бензол  $C_6H_6$ , циановодород  $HCN$ , метилацетилен  $CH_3C_2H$ , цианоацетилен  $HC_3N$ , метилцианид  $CH_3CN$ , этилцианид  $C_2H_5CN$  [Hörst, 2017, табл. 1]. При этом было установлено, что массовые отношения большинства перечисленных соединений увеличиваются с высотой, что характерно для молекул, образующихся вследствие фотохимических реакций на больших высотах. Солнечные фотоны и частицы с высоким уровнем энергии воздействуют на  $N_2$  и  $CH_4$ , запуская реакции диссоциации, ионизации и необратимого разрушения  $CH_4$  с образованием  $H_2$  и сложных органических молекул, таких как углеводороды и нитрилы [Hörst, 2017]. Последующее объединение и гетерогенные химические реакции этих молекул образуют аэрозоли, ответственные за характерный оранжевый цвет Титана и слои дымок. Образование аэрозолей происходит выше 300 км. Ниже 300 км дымка повсеместна. По мере оседания аэрозолей к поверхности, они образуют ядра конденсации для молекул  $HCN$ ,  $C_2H_6$  и  $CH_4$  в нижних слоях атмосферы. Ниже 80 км аэрозоли представляют собой комбинацию фотохимически генерируемых дымок и конденсированных органических веществ.

Медленное вращение Титана обуславливает перераспределение тепла в виде глобальной циркуляции с восходящим движением в летнем полушарии и нисходящим движением около зимнего полюса. Как и на Земле, большой наклон сатурнианской системы ( $26.7^\circ$ ) приводит к сезонным колебаниям солнечного воздействия. В отличие от Земли, Титан обычно имеет одну главную ячейку циркуляции (от полюса до полюса). Исключение составляет период равноденствия, когда при смене циркуляции временно сосуществуют две ячейки (от экватора до полюса). Одинокая циркуляционная ячейка эффективно перераспределяет тепло, приводя к относительно небольшому контрасту температуры от экватора к полюсу: температура поверхности асимметрично уменьшается от экватора к полюсам на  $3^\circ C$  в направлении зимнего полюса ( $60^\circ$  с.ш.) и на  $1^\circ C$  в направлении летнего полюса ( $60^\circ$  ю.ш.) [Cottini et al., 2012]. Скорости ветра очень низкие ( $<1$  м/с) на поверхности, увеличиваясь до 40 м/с около 60 км над поверхностью спутника, где они начинают уменьшаться, пока не достигнут минимума (5 м/с) около 75 км, потом снова увеличиваются до скоростей 200 м/с около 200 км, а затем уменьшаются до 60 м/с на больших высотах (около 450 км).

В атмосфере Титана присутствуют облака, состоящие из конденсата различных летучих веществ ( $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $HCN$ ,  $HC_3N$  и т.д.). Среди них

выделяются тропосферные (высота до 35 км) конвективные метановые облака и высотные (от 30 до 300 км) стратиформные облака этана и нитрилов. Сезонный цикл существования стратосферного этан-нитрилового полярного облака обусловлен глобальной атмосферной циркуляцией. Этан и нитрилы, образующиеся под воздействием солнечного излучения в летнем полушарии, перемещаются в верхней части стратосферы, где скорость ветра достигает 200 м/с, в остывающее зимнее полушарие. Их охлаждение приводит к конденсации избыточных (по отношению к парциальному давлению насыщения) количеств этана и нитрила, за счет чего и формируется полярное облако.

Конвективные тропосферные облака наблюдались над Южным полюсом, первоначально с помощью земных телескопов с 2001 г. [Schaller et al., 2006], затем при помощи ОС Кассини с 2004 г. [Turtle et al., 2018]. Образование большого скопления облаков в октябре 2004 г. привело к выпадению осадков на Равнине Арракис (Arakis Planitia). Такая активность стала менее распространённой после 2005 г. по мере убывания южного лета. В то же время удлиненные полосы конвективных облаков постоянно наблюдались в средних (иногда в более низких) южных широтах ( $\sim 40^\circ - 50^\circ$  ю.ш.) с начала миссии ОС Кассини до конца 2012 г., т.е. значительно позже южного осеннего равноденствия. Эта летняя среднеширотная облачная активность стала неожиданной для первоначальных моделей глобальной атмосферной циркуляции. Ее удалось смоделировать лишь с применением “влажной” физики, учитывающей термодинамику конденсирующегося метана. Тем не менее, использование этих моделей пришло в противоречие с дальнейшим развитием облачной активности в северном полушарии. Вопреки прогнозам на северном полюсе в северное лето погодная картина летнего южного полюса не повторилась – вместо ожидавшейся обширной облачной активности и осадков наблюдались лишь небольшие изолированные облака.

Метановый цикл Титана во многом аналогичен гидрологическому циклу Земли. Однако имеются и существенные различия. Во-первых, несмотря на то, что метан совершает цикл между атмосферой и поверхностью, он также в значительных количествах теряется из атмосферы. Поэтому цикл стабилен в геологических временных масштабах лишь в том случае, если есть источник метана. Второе отличие состоит в том, что на Титане большая часть метана находится в атмосфере, а не на поверхности. Дефицит метана на поверхности усугубляет проблему с его источником для поддержания метанового цикла в геологическом масштабе времени. В качестве гипотетических источников метана рассматриваются: эпизодическая дегазация метана из клатрат-гидратов ледяной

оболочки Титана [Tobie et al., 2006], производство метана путем серпентинизации [Atreya et al., 2006], просачивание метана из малоглубинных подземных резервуаров [Hayes et al., 2008], гидротермальные и криовулканические процессы [Glein, 2015]. С. Хёрст [Hörst, 2017] считает, что отсутствие информации о дополнительном источнике метана ограничивает способность полностью понять метановый цикл на Титане.

В частности, утверждается, что на экваторе обычно недостаточно метана для образования осадков, так как аппаратура СА Гюйгенс определила относительную влажность метана на поверхности ~50% [Niemann et al., 2005, 2010], тогда как в моделях облаков и гроз требуется от 60% (для образования конвективных облаков) до 80% (для гроз, способных вызывать значительные осадки) относительной влажности [Hörst, 2017]. Тем не менее, в низких широтах эпизодически наблюдались сильные штормы [Schaller et al., 2009], один из которых привел к обширным изменениям поверхности, предположительно в результате выпадения большого количества метановых осадков [Turtle et al., 2011b].

## ПОВЕРХНОСТЬ

Состав поверхности Титана остается плохо изученным. На месте посадки СА выявлены следы испаряющегося метана, этана ( $C_2H_6$ ), ацетилена ( $C_2H_2$ ), циана ( $C_2N_2$ ) и углекислого газа ( $CO_2$ ), при этом испарение метана, по мнению исследователей [Niemann et al., 2010], свидетельствует о наличии недавно выпавших метановых осадков. Проблемы изучения поверхности Титана дистанционными методами обусловлены его протяженной, плотной и туманной атмосферой, насыщенной метаном. Прямое наблюдение поверхности возможно только с помощью радара и спектроскопии на нескольких специфических частотах в ближнем инфракрасном диапазоне, где поглощение метана слабое. Тем не менее, дистанционными методами зондирования на поверхности Титана обнаружены отложения твердого бензола ( $C_6H_6$ ), твердого и/или жидкого этана ( $C_2H_6$ ) или метана ( $CH_4$ ) [Clark et al., 2010], твердого ацетилена ( $C_2H_2$ ) [Singh et al., 2016]. Еще одним вероятным материалом поверхности считается водяной лед, однако его обнаружение остается дискуссионным [Hörst, 2017]: ряд исследователей обнаруживают в спектрах признаки его присутствия [Solomonidou et al., 2018; Griffith et al., 2019], другие утверждают, что эти особенности могут быть объяснены углеводородами или нитрилами [Clark et al., 2010; Nixon et al., 2016].

Согласно недавно составленной глобальной геоморфологической карте масштаба 1 : 20000000 [Lopes et al., 2020], на поверхности Титана выде-

ляются шесть основных геологических единиц: равнины (65% поверхности), дюны (17%), холмистый (hummocky) рельеф (14%), озера (1.5%), лабиринтный рельеф (1.5%) и ударные метеоритные кратеры (0.4%). Среди равнин по данным картирования 1 : 800000 [Malaska et al., 2016] наиболее распространены недифференцированные равнины — однородные (в масштабах от сотен до тысяч километров) радар-темные области, обширные, относительно невыразительные и имеющие низкий рельеф. Отсутствие флювиальных особенностей на этих равнинах в масштабе наблюдений Кассини, по мнению исследователей [Lopes et al., 2020], свидетельствует либо об их пористой поверхности, не способной поддерживать большие интегрированные каналы, либо о захоронении старых сетей каналов под поверхностными отложениями этих равнин.

Дюны формируют обширные поля в экваториальном поясе Титана, в пределах  $\pm 30^\circ$  по широте и почти повсеместно по долготе, за исключением области Ксанаду (Xanadu,  $70^\circ$ – $140^\circ$  в.д.). Они имеют ширину 1 км, междюнное расстояние 1–3 км, длину от многих десятков до нескольких сотен километров и высоту порядка 100 м [Rodríguez et al., 2014]. Спектры дюнных полей соответствуют “песку”, в котором преобладают твердые органические вещества, в частности бензол [Clark, 2010] и ацетилен [Singh et al., 2016].

Холмистый рельеф представлен горными цепями и изолированными возвышенностями. Наибольшую площадь эта единица рельефа имеет в области Ксанаду. В других местах фрагменты этого рельефа представлены в виде локально изолированных пиков или хребтов (обычно менее  $30 \text{ км}^2$ ). Анализ спектральных данных указывает на относительно высокую водно-ледяную составляющую в породах этого рельефа, что согласуется [Lopes et al., 2020] с представлениями о холмистом рельефе, как об обнаженных остатках ледяной оболочки Титана, частично покрытых осадками органических соединений из его атмосферы.

Лабиринтные ландшафты расположены в основном в высоких широтах, занимают возвышенное положение по отношению к окружающим территориям, повсеместно сильно рассечены флювиальной эрозией, и в составе их поверхности доминируют твердые углеводороды [Lopes et al., 2016; Janssen et al., 2016]. Лабиринты всегда соседствуют с недифференцированными равнинами, в то время как многие недифференцированные равнины никак не связаны с лабиринтами. Основной особенностью лабиринтных ландшафтов являются каналы. Однако лишь несколько каналов, наблюдаемых в лабиринтах, выходят на соседние недифференцированные равнины, где они становятся более узкими и исчезают.

Озерный рельеф включает в себя озера и моря, которые могут быть либо сухими, либо заполненными жидкостью, преимущественно углеводородной. Он имеет существенное значение для понимания особенностей дегазационных процессов на Титане и поэтому более подробно будет рассмотрен ниже.

Очень малая распространенность метеоритного кратерного рельефа свидетельствует об относительной молодости поверхности Титана [Lopes et al., 2020]. С высокой степенью достоверности на ней были идентифицированы лишь 23 кратера диаметром более 20 км. Из этого следует, что на поверхности Титана ударные кратера сохраняются в течение не более нескольких сотен миллионов лет. Распределение кратеров также показывает, что самые старые поверхности расположены вблизи экватора, а самые молодые поверхности — вблизи полюсов, где наблюдается почти полное отсутствие кратеров. Большинство кратеров имеют признаки эрозии в результате эоловых и флювиальных или плювиальных процессов. Спектры излучения с кратерной поверхности согласуются с ледяными материалами, выброшенными при ударе. Их предполагаемый состав — коровой водяной лед или смесь корового водяного льда и органических материалов.

Снимки, полученные при спуске СА Гюйгенс, не обнаружили каких-либо значительных объемов жидкости, однако рельеф поверхности явно свидетельствовал о воздействии жидкости — топографические особенности, напоминающие береговую линию с речными протоками, вырезанными на низких холмах [Tomasko et al., 2005]. Поверхность на месте посадки представляет собой окатанную гальку размером 4–15 см в мелкозернистом влажном субстрате [Niemann et al., 2005; Lorenz et al., 2008].

На Титане широко распространены флювиальные формы рельефа [Langhans et al., 2012]. В нескольких местах имеются высокоразвитые сети с длиной каналов до 1200 км и шириной до 10 км, тогда как отдельные долины неравномерно разбросаны по всем широтам. Они часто встречаются в горных районах. Экваториальные дюнные поля и недифференцированные равнины в средних широтах, напротив, почти полностью свободны от долин. Следы флювиальной активности на всех широтах Титана свидетельствуют о климатических условиях с по меньшей мере эпизодическими осадками. Данные о разветвленных (дендритных) долинах возле места посадки СА Гюйгенс [Langhans et al., 2012] уникальны тем, что получены с высоким пространственным разрешением. С орбиты они не видны. Это узкие ветвящиеся каналы, берущие начало на яркой горной местности и направленные на более темные низины. Резко очерченная граница темной области расце-

нивается как “береговая линия” бывшего моря или озера, которое со временем высохло. Ширина каналов меняется от 17 до 250 м при длине до 15 км.

Радарное зондирование поверхности Титана с борта ОС Кассини выявило в полярных регионах порядка 580 пятен, сильно поглощавших радиоволны, имевших круглые или неправильные очертания и морфологическое сходство с озерами. Эта совокупность данных позволила подтвердить наличие на Титане углеводородных озер [Stofan et al., 2007]. Наиболее крупные, заполненные жидкостями депрессии, назвали морями — Море Кракена (Kraken Mare), Море Лигеи (Ligeia Mare) и Море Пунги (Punga Mare). Крупные озера и моря Титана обладают дендритными контурами и связаны с речными каналами. Северные моря Титана имеют береговые линии, которые включают неглубокие заливы с хорошо развитыми затопленными речными долинами [Stofan et al., 2007].

Большинство озер Титана представляют собой небольшие депрессии с четким контуром (sharp-edged depressions, SED), которые морфологически отличаются от крупных широких депрессий с пологими склонами [Hayes et al., 2017]. SED имеют относительно ровное дно, значительную глубину (до 600 м) и не имеют видимых (на уровне разрешения) каналов притока или оттока. Почти все SED с площадью более 750 км<sup>2</sup> (как заполненные, так и пустые) имеют края, приподнятые на высоту порядка сотни метров [Hayes, 2016; Hayes et al., 2017]. Это обрамление имеет крутые склоны (более 45° снаружи и практически вертикальные внутри) и ширину 1–5 км. Отсутствие идентификации подобного обрамления для более мелких депрессий, как считают исследователи, может быть следствием недостаточного разрешения наблюдений (1 км и более). Часть небольших депрессий имеет почти круглую форму диаметром от 10 до 30 км, с заглубленным дном, часто на разных уровнях. Этот морфологический тип признаков интерпретируется как карстовые воронки [Cornet et al., 2015] или вулканические кратеры [Wood, 2015]. Почти всегда рядом с кратероподобными депрессиями находятся другие, имеющие неправильную форму. Присутствуют также депрессии сложной формы, некоторые с кратероподобными краями. Исследователи [Wood, 2015] считают, что эти неправильные депрессионные формы рельефа образовались из множества меньших оригинальных депрессий. Часто соседние депрессии связаны друг с другом вмещающими жидкостями. Это дает основания исследователям считать, что стенки депрессий состоят из рыхлого легко разрушающегося материала.

Моря Титана по площади представляют 80% всех заполненных жидкостью поверхностей (Море Кракена — 500 тыс. км<sup>2</sup>, Море Лигеи — 130 тыс. км<sup>2</sup>,

Море Пунги – 61 тыс. км<sup>2</sup> [Hayes, 2016]). Вблизи южного полюса расположены четыре широкие депрессии, подобные северным морям, но преимущественно сухие. В пониженной части одной из них расположено Озеро Онтарио (Ontario Lacus), самая большая наполненная жидкостью депрессия на юге. Интерпретируемые береговые линии пустых морей показывают аналогичную северным морям морфологию – большие дренажные каналы и палеоостровные структуры по их периметру [Birch et al., 2017]. Совокупность этих фактов позволяет [Hayes et al., 2014; Birch et al., 2017] считать, что широкие депрессии юга представляют собой палеоморя.

Аппаратный комплекс ОС Кассини позволил измерить глубину озер и морей Титана. Наибольшая глубина Моря Лигея составила около 160 м [Mastrogiuseppe et al., 2014], Озера Онтарио – 90 м. По предварительным оценкам [Hayes, 2016] состав Моря Лигеи соответствует смеси 71% CH<sub>4</sub>, 11% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> и 18% N<sub>2</sub>, Озера Онтарио – 47% CH<sub>4</sub>, 40% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> и 13% N<sub>2</sub>. Измерения ОС Кассини показали, что поверхности жидкости всех трех морей соответствуют одному эквипотенциальному уровню, находящемуся на расстоянии 2.57 тыс. км от центра масс Титана. Единый уровень поверхности свидетельствует о наличии гидравлической связи жидкости в морях Титана [Hayes et al., 2017]. Более того, дно пустых бассейнов в непосредственной близости от моря всегда выше единого уровня жидкости морей. В более удаленных районах донные поверхности пустых бассейнов находятся выше уровня местных заполненных жидкостью озер. Эти наблюдения позволили [Hayes et al., 2017] предположить, что присутствие или отсутствие озера контролируется поверхностью жидкого горизонта, а возможные отклонения этого уровня от уровня морей Титана могут быть обусловлены наличием локальной непроницаемой границы в пределах данного региона. Сведения о связи между региональными топографическими бассейнами отсутствуют.

Сухие или заполненные жидкостью моря и озера, а также речные каналы свидетельствуют о наличии активного “гидрологического” цикла на Титане, аналогичного циклу Земли, с обменами между недрами (грунтовые жидкости), поверхностью (озера, моря и речные каналы) и богатой метаном атмосферой Титана, где с помощью приборов ОС Кассини были обнаружены конвективные облака и единичные интенсивные ливни [Turtle et al., 2011b]. Несмотря на то, что метан совершает цикл между атмосферой и поверхностью, он в значительных количествах расходуется в атмосфере в фотохимических реакциях, формируя углеводородное многообразие отложений на поверхности Титана. В геологических временных масштабах “гидрологический” цикл на Титане

возможен лишь в том случае, если есть постоянный источник метана, восполняющий его потери. Этим источником мог бы быть первоначально предполагавшийся азот-метан-этановый океан на поверхности. Однако основная масса метана сконцентрирована именно в атмосфере. Поэтому исследователи вынуждены предполагать поступление метана в атмосферу из гипотетических глубинных резервуаров углеводородов [Tobie et al., 2006; Choukroun, Sotin, 2012; Faulk et al., 2019]. Вещным предположениям придают имеющиеся данные о дегазационных процессах на Титане.

## ДЕГАЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

О сохраняющейся активности недр Титана свидетельствует наличие в составе атмосферы метана, радиогенного аргона, а также, возможно, избыток водорода относительно фотохимических моделей его образования, отмечаемый исследователями [Hörst, 2017] в верхних частях атмосферы. Метан участвует в необратимых химических реакциях фотолиза и должен был распадаться в течение ~10–100 млн лет [Yung et al., 1984 и др.]. Однако он не только присутствует в атмосфере, но имеет устойчивое увеличение концентрации к поверхности, что рассматривается как подтверждение его поступления из недр [Niemann et al., 2005] вследствие эндогенной дегазации. Помимо этого, в тропосфере ниже 18 км был обнаружен радиогенный <sup>40</sup>Ar, представляющий собой продукт распада <sup>40</sup>K с периодом полураспада 1.28 млрд лет. Поскольку сам калий не обнаружен ни в составе атмосферных соединений, ни на поверхности, то единственным источником атмосферного радиогенного аргона, присутствующего в концентрации 43 г/т, могут служить недра Титана [Niemann et al., 2005].

Криовулканизм – одно из проявлений современных дегазационных процессов на объектах Солнечной системы. Наблюдения ОС Кассини [Iess et al., 2012] показывают наличие приливных деформаций коры Титана, которые можно объяснить существованием под поверхностью слоя с высоким содержанием жидкости, основным компонентом которой, по мнению исследователей, является вода. Этот слой рассматривается в качестве источника для криовулканических процессов. Более того, на поверхности Титана присутствует большое количество объектов потенциально криовулканического происхождения [Lopes et al., 2013]. В частности, убедительным свидетельством криовулканизма могут служить особенности в регионе Сотра Патера (Sotra Patara) и потоки в Области Хотей (Hotei Regio). В регионе Сотра Патера в качестве криовулканических объектов рассматриваются две вулканические горы – Дум (диаметр ~70 км, высота 1.45 км) и Эребор (Erebog, диаметр 40 км, высота более 1000 м), глубокая

некруговая депрессия (Сотра Патера), Поток Мохини (Mohini Fluctus) протяженностью ~180 км, который, по-видимому, вытекает из горы Дум, а также ряд неправильных депрессий, интерпретируемых как структуры обрушения между двумя горами, и потоки, окружающие Эребор. Депрессия Сотра Патера (18 × 30 км) морфологически напоминает кальдеры и другие вулканические отрицательные формы рельефа, такие как маары и кратерные ямы, но она очень глубокая (1700 м). Криовулканические формы рельефа распространены на поверхности Титана не повсеместно, а локализуются в основном между 30° и 60° с.ш. [Lopes et al., 2010].

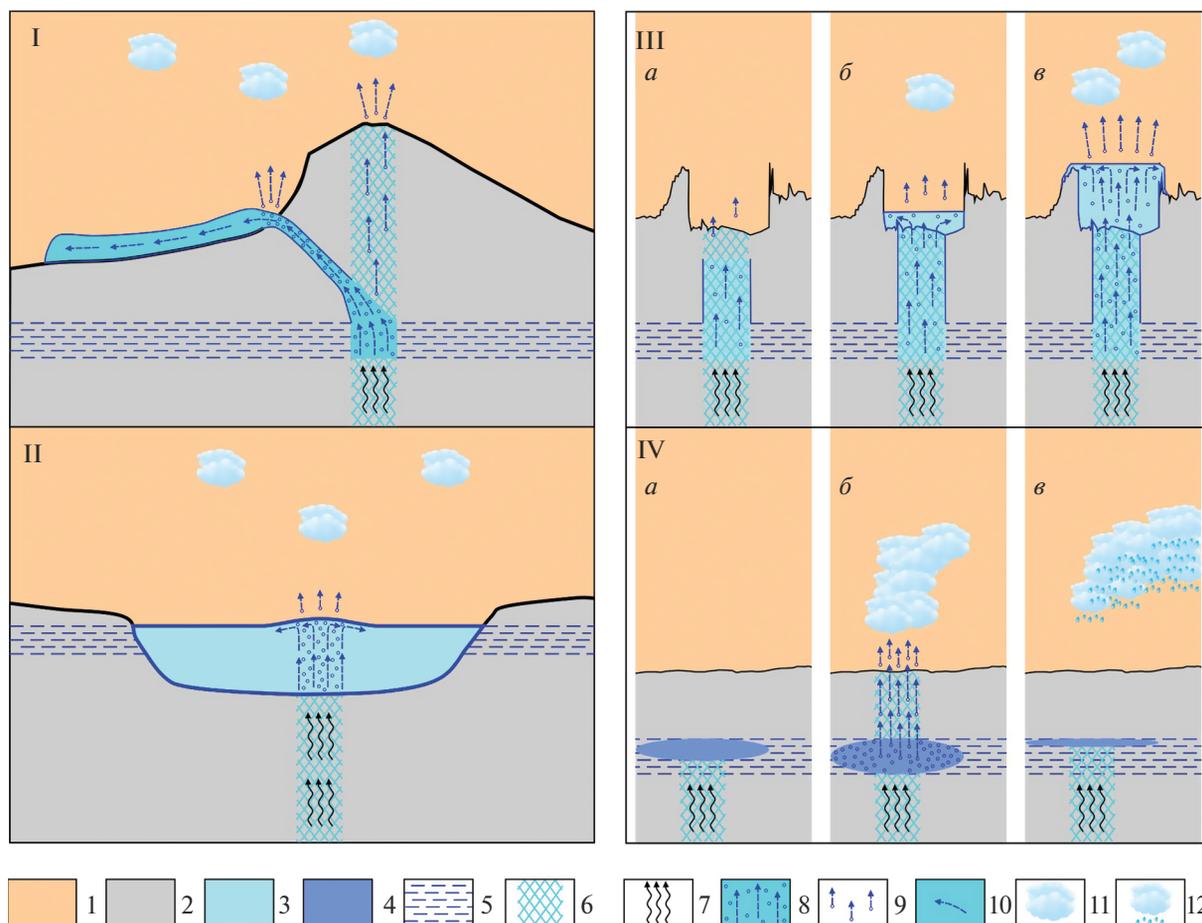
Тем не менее, за все время наблюдений не только не смогли обнаружить признаки вулканической активности, но на сегодняшний день не была однозначно идентифицирована ни одна горячая точка. Этот факт исследователи [Lopes et al., 2013] объясняют следующими причинами: 1) криовулканические процессы могут быть редкими; 2) разрешение радиометра составляет 5 км, поэтому усредненная по площади радиометра тепловая характеристика горячей точки может остаться незамеченной; 3) обогащенная водой криолава на поверхности Титана будет быстро остывать по сравнению с интервалом между наблюдениями ОС Кассини, поэтому свежие потоки криолавы могут быть трудными для обнаружения, если не наблюдается активное извержение; 4) но даже в случае совпадения радиометрических наблюдений с активным извержением криолавы, высокая диэлектрическая проницаемость водных криолав будет смягчать эффект потенциального теплового события.

К перечисленным выше причинам можно добавить еще одну: по нашему мнению, команда Розали Лопес недооценивает многообразие дегазационных процессов и их возможный спектр применительно к Титану (рис. 1). В качестве вулканических/криовулканических процессов исследователи рассматривают интенсивное поступление из недр сквозь твердую среду жидкого или газообразного вещества с достаточно высоким контрастом по температуре (обеспечивающим наличие тепловой аномалии). Этот подход оправдан для субаэрального вулканизма Земли, серного вулканизма Ио (спутник Юпитера) и криовулканизма Энцелада (спутник Сатурна). Однако даже в случае высокотемпературного силикатного вулканизма Земли обнаружение тепловых аномалий становится практически невозможным в субмаринных условиях или в условиях перекрывающих ледовых толщ [Loose et al., 2018]. В частности, хорошо известно описание Г. Тагиева [1980] спокойного течения лавового потока вулкана Ньямлагира по дну оз. Киву: бурное кипение наблюдалось лишь в месте впадения потока в озеро,

далее тепло лавового потока рассеивалось в огромном объеме воды озера.

Неучтенная исследователями специфика Титана обусловлена: 1) наличием одного или нескольких жидкостных горизонтов, имеющих глобальное или региональное распространение; 2) повышенной плавкостью вмещающих пород за счет легкоплавких углеводородов поверхности; 3) пониженным температурным контрастом (по отношению к вмещающим породам) инжецируемого глубинного вещества. Из-за низкой плотности Титана, по существующим оценкам [Дунаева и др., 2016], силикаты могут находиться лишь на глубинах более 1000 км, тогда как на меньших – водно-ледяная оболочка (высокотемпературные льды, внутренний океан, внешняя ледяная кора). Поэтому инъекции высокотемпературного вещества на Титане практически исключены. Напротив, любое внедрение глубинного горячего вещества должно сопровождаться плавлением вмещающих пород, смешением их вещества с внедряющимися расплавами и соответствующим понижением температурного контраста. Сочетание жидкостных близповерхностных горизонтов с выходящими на поверхность криовулканическими каналами обеспечивает идеальные условия для перемещения летучих соединений.

В первом приближении специфика криовулканических дегазационных процессов на Титане сопоставима с дегазационными процессами в кратерных и/или термальных озерах Земли, например в оз. Шампейн-Пул (Champagne Pool, Новая Зеландия), получившем свое название благодаря обильному выделению углекислого газа. Вполне вероятно, что на Титане этим процессам соответствует эпизодическое появление “волшебных островов” (неоднородностей поверхности) в двух областях Моря Лигеи [Hofgartner et al., 2016]. Обе области регистрировались ОС Кассини с высоким разрешением 6 раз. В 4 случаях какие бы то ни было неоднородности на поверхности Моря Лигея отсутствовали, тогда как в 2 случаях в одной из областей был обнаружен “волшебный остров”, имевший общую площадь 40 км<sup>2</sup> при пролете 10.07.2013 г. и 145 км<sup>2</sup> при пролете 21.08.2014 г. При пролете 21.08.2014 г. был обнаружен еще один “волшебный остров” на расстоянии 270 км от первого, имевший площадь 322 км<sup>2</sup>. В качестве одной из причин образования “волшебных островов” исследователи рассматривают концентрацию пузырьков газа, но отдают предпочтение волнам на поверхности моря по той причине, что последние чаще наблюдаются на водных поверхностях Земли. Аналогичный эффект могут создавать также частицы льда, образующегося в холодных поверхностных условиях из наиболее тугоплавких компонентов эндогенных потоков жидкости (см. рис. 1, II).



**Рис. 1.** Особенности дегазационных процессов в условиях Титана.

I – криовулканизм; II – газлифтинговая дегазация в крупных бассейнах жидкости (дегазация “волшебных островов”); III – газлифтинговая дегазация сквозь малые бассейны жидкости (SED-дегазация): *a* – низкая активность (сухие депрессии), *б* – умеренная активность, *в* – максимальная активность (изливы и намораживание оконтуривающей кромки); IV – дегазация эпизодических лимнологических выбросов: *a* – накопление потенциально летучих компонентов в сжиженном состоянии в подповерхностных условиях, *б* – выброс (объемное вскипание летучих компонентов в подповерхностном резервуаре под воздействием эндогенного тепла и заложения декомпрессионных трещин), *в* – интенсивные осадки, залечивание декомпрессионных трещин и возобновление накопления летучих соединений в сжиженном состоянии. 1 – атмосфера, 2 – коровые льды, 3 – резервуары жидкости, 4 – сжиженные потенциально летучие соединения, 5 – подповерхностный жидкостный горизонт, 6 – зоны проницаемости, 7 – эндогенные флюидные потоки, 8 – газлифтинговые потоки, 9 – потоки газа, 10 – потоки жидкости, 11 – конденсация, 12 – атмосферные осадки.

Еще одна особенность дегазационных процессов в кратерных и/или термальных озерах – пониженная плотность жидкости, насыщенной пузырьками газа, что обеспечивает подъем эквипотенциальной поверхности жидкости на участках максимального потока газа даже в пределах единого бассейна. Более того, дополнительный подъем уровня жидкости возможен благодаря ее вовлечению в движение газового потока (эффект газлифтинга), что обуславливает повышение уровня в дегазационных бассейнах на пиках газовой активности и нередко приводит к их переполнению и изливам избыточной жидкости за пределы кратера/бассейна. Эта особенность протекания дегазационных процессов сквозь жидкостную среду соответствует данным об уровне жидкости и мор-

фологии озер Титана, расположенных в небольших депрессиях (SED) (см. рис. 1, III). Именно для этих озер установлен факт превышения уровня жидкости на несколько сотен метров над общим уровнем морей Титана [Hayes et al., 2017], что, собственно, и вынуждает исследователей предполагать наличие нескольких эквипотенциальных жидкостных горизонтов на Титане. Приподнятое, узкое и крутосклонное обрамление SED обусловлено эпизодическим газлифтинговым повышением уровня жидкости в депрессиях, их переполнением и изливами вмещающей жидкости за пределы обрамления. При этом на гребне обрамления происходит намораживание тех компонентов жидкости, для которых температура плавления превышает поверхностную температу-

ру, а  $T$ – $P$  условия насыщенных паров в условиях поверхности исключают или затрудняют сублимацию. Все остальное вещество изливов впитывается в грунт, испаряется и/или сублимирует. Именно вымораживание наиболее тугоплавких компонентов из изливающегося вещества обуславливает наращивание и крутосклонность приподнятого обрамления SED. Округлая форма заглубленного дна SED, часто в виде системы вложенных воронок, находящихся на разных уровнях, связана с проплавлением коровых льдов Титана восходящими газлифтинговыми потоками. Это можно рассматривать и как термальный карст, и как слабоконтрастный криовулканизм, что объединяет две приведенные выше [Cornet et al., 2015; Wood, 2015], казалось бы, антагонистические точки зрения.

Третья особенность протекания дегазационных процессов сквозь жидкостную среду – возможность накопления в сжиженном виде (под гидростатическим давлением вышележащих толщ) больших количеств потенциально летучих эндогенных компонентов и последующего бурного газообразования вследствие даже незначительных нарушений равновесия (повышения температуры и/или уменьшения давления). В условиях Земли эти процессы соответствуют так называемым лимнологическим катастрофам – внезапным выбросам больших объемов углекислого газа, накопленного в придонных слоях озера в жидком (растворенном) состоянии. Наиболее известны лимнологические катастрофы на высокогорных кратерных озерах Монун (15.08.1984 г., 37 погибших) [Sigurdsson et al., 1987] и Ниос (21.08. 1986 г., более 1700 погибших) [Cotel, 1999], расположенных на “вулканической линии” Камеруна. В последнем случае выброс  $\sim 1 \text{ км}^3 \text{ CO}_2$  был локализован в виде фонтана высотой 120 м. С выбросом были связаны поверхностные волны на озере, которые поднимались на высоту 25 м над уровнем озера и в одной из точек побережья превысили 80 м. Выброшенный газ распространился двумя рукавами вниз по склонам на 25 км, убивая все на своем пути.

Подобные ситуации представляются весьма вероятными на Титане (см. рис. 1, IV). Роль действующего агента в подобном бурном газоотделении могут играть метан и/или азот, накапливаемые в подповерхностных условиях в жидком состоянии и провоцируемые на газообразование потоками вещества, поднимающимися из недр Титана (в виде газовой диффузии, жидкостной конвекции или неких аналогов земных мантийных плюмов) и транспортируемыми к его поверхности тепло глубоких горизонтов. По сравнению с вулканическими/криовулканическими извержениями лимнологические выбросы газа незначительно отличаются от вмещающей среды

по температуре и давлению и, соответственно, оказывают минимальное воздействие на окружающий рельеф. Они могут реализовываться в виде фонтанов на открытой поверхности бассейнов Титана или просачиваться по трещинам через перекрывающие их коровые льды и/или донные отложения. Формирование потоковых структур или взрывных кратеров для лимнологических выбросов маловероятно. Поэтому единственным возможным свидетельством подобной дегазации может быть лишь сам факт последующей конденсации выброшенного газа в низкотемпературных условиях атмосферы, т.е. внезапное появление облаков.

В связи с вышесказанным несомненный интерес представляют имеющиеся данные о внезапном облакообразовании и последующих сильных и трудно объяснимых с обычных метеорологических позиций бурях в атмосфере Титана. В отличие от Земли, которая примерно на 65% покрыта облаками в течение всего года, наблюдения Титана с 1990 г. показали тропосферную облачную активность, охватывающую обычно менее 1% видимого диска Титана. Однако в двух случаях (сентябрь 1995 г. и октябрь 2004 г.) наблюдалось [Schaller et al., 2009] резкое усиление облачности, покрывавшей 5–7% поверхности, причем октябрьское событие 2004 г. продолжалось по меньшей мере месяц.

Аналогичный всплеск облачной активности зарегистрирован 13 апреля 2008 г. в области с центром  $29^\circ$  ю.ш.,  $247^\circ$  з.д. Последующие наблюдения показали смещение облаков относительно места образования в восточном, а затем в юго-восточном направлении со скоростью примерно 3 м/с. Наблюдения от 28 апреля и 1 июня 2008 г. выявили слабое облако, сохраняющееся на северо-западной окраине начального большого облака 14 апреля 2008 г. ( $15^\circ$  ю.ш.,  $250^\circ$  з.д.), указывая на возможное место зарождения облака, т.е. на район, по нашему мнению, первичного лимнологического выброса больших объемов газообразного метана.

27 сентября 2010 г. ОС Кассини зарегистрировала интенсивное формирование облачности в районе  $10^\circ$  ю.ш.,  $320^\circ$  з.д. Спустя месяц (29 октября) к востоку от этого района (в направлении смещения штормовых облаков) обнаружены обширные изменения (потемнение) поверхности на участке  $\sim 2000 \times 130$  км. Последующая съемка этого участка показала практически полное исчезновение обнаруженных изменений к 15 января 2011 г. Исследователи [Turtle et al., 2011b] рассматривают зарегистрированные изменения как результат обильных осадков метана (метановой бури), которые в течение короткого времени могут повлиять на огромную территорию в засушливом районе, покрытом преимущественно дюнами. Этим

объясняется быстрое появление (и исчезновение) изменений, а также их обширный и неоднородный характер.

Спорадическая высокая облачная активность осложняет построение моделей глобальной циркуляции атмосферы Титана, особенно учитывая, что большая часть наблюдавшихся внезапных метановых бурь (1995, 2008, 2010 гг.) произошла в засушливых низких широтах южного полушария и лишь одна (2004 г.) – в его полярной области. Поэтому, хотя разрабатываемые модели и предполагают наличие подземного резервуара метана, тем не менее исследователи [Turtle et al., 2011a] вынуждены признать, что спорадическое появление облаков в районе  $15^\circ \pm 5^\circ$  ю.ш. не предсказывается ни одной из моделей.

В качестве одной из причин появления избыточного атмосферного метана рассматривается [Schaller et al., 2006] геотермальная или вулканическая активность, увеличивающая нагрев поверхности и провоцирующая активность облаков. Но и здесь отмечаются сложности. Во-первых, термальное или вулканическое воздействие на поверхность должно иметь более длительное развитие, а облака – протяженное развитие. Поэтому, по мнению исследователей [Schaller et al., 2006], повышенный нагрев поверхности, скорее всего, не является причиной наблюдаемых выбросов облаков. Во-вторых, как показали последующие исследования [Turtle et al., 2011b; Lopes et al., 2013], какие бы то ни было проявления вулканизма или криовулканизма в областях зарождения метановых бурь не обнаружены. Однако все имеющиеся вопросы и сложности снимаются, если принять во внимание возможность лимнологических выбросов газообразного метана из подповерхностных источников его накопления в жидком состоянии. Наглядным свидетельством этих выбросов является сам факт внезапного бурного облакообразования, т.е. остывания и конденсации эндогенных газов в низкотемпературных условиях атмосферы.

Если сопоставить приуроченность обильных осадков к спорадическим лимнологическим выбросам с распространенностью русловых форм рельефа, а также учесть потенциально газлифтинговый механизм формирования, заполнения и поддержания уровня жидкости SED-депрессий, то можно прийти к выводу: дегазационные процессы на Титане являются важнейшим рельефообразующим фактором.

### ГАЗ-КОНДЕНСАТНЫЕ ИНВЕРСИИ В АТМОСФЕРЕ И НЕДРАХ ТИТАНА

Специфика дегазационных и криовулканических процессов на Титане получает дополнительное обоснование при анализе максимальных га-

зовых концентраций для наиболее распространенных в природе и вероятных на Титане летучих по вертикальному профилю его недр и атмосферы [Малышев, Малышева, 2020]. Для расчетов максимальных концентраций газообразных веществ в атмосфере и на поверхности Титана использованы результаты измерения температуры и давления, полученные при посадке на поверхность спутника СА Гюйгенс [Fulchignoni et al., 2005]. В качестве исходных данных для расчетов максимальных концентраций газообразных веществ в недрах Титана используются две модели внутреннего строения [Дунаева и др., 2016; Кронрод и др., 2020], в соответствии с которыми предполагается, что спутник состоит из трех основных структурных слоев разного состава: 1) внешней водно-ледяной оболочки (ледяная кора  $\pm$  подстилающий водный слой (океан) + льды высокого давления); 2) промежуточной каменно-ледяной мантии, состоящей из гомогенной смеси льдов высокого давления и скального материала (силикатов и/или гидросиликатов + Fe–FeS сплав); 3) центрального железосиликатного ядра (скальный материал + Fe–FeS сплав).

Для контроля влияния моделей на профили максимальных концентраций летучих веществ в газовых смесях нами также выполнен “безмодельный” вариант расчетов мольных долей этих веществ по осредненному профилю давления и температуры в недрах Титана. В этом варианте принимается линейное увеличение температуры от  $-179.5^\circ\text{C}$  на поверхности до  $1127^\circ\text{C}$  в центре спутника (максимальная температура для ядра Титана по данным [Grasset et al., 2000; Дунаева и др., 2016]), что соответствует термическому градиенту  $0.507^\circ\text{C}/\text{км}$  в его недрах. Давление  $P$  в недрах Титана на глубине  $h$  в этом варианте определяется исходя из его средней плотности ( $\rho = 1.9 \times 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) и закона всемирного тяготения в соответствии с формулой  $P(h) = P_0 + 2/3\pi\rho^2G[R^2 - (R - h)^2]$ , где  $P_0 = 1.467 \times 10^5 \text{ Па}$  – давление на поверхности,  $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$  – гравитационная постоянная,  $R = 2.575 \times 10^6 \text{ м}$  – радиус Титана. Для расчета максимально возможных мольных долей летучих веществ в газовых смесях по профилю недр и атмосферы Титана использованы справочные данные [Физические ..., 1991, табл. 11.1–11.6, 13.4–13.6].

Сами расчеты выполнены исходя из следующих соображений. Как известно, различия в физических характеристиках газообразного и конденсированного состояний вещества исчезают в критической точке. Здесь плотность жидкости и ее насыщенного пара становятся равны, а поверхностное натяжение жидкости падает до нуля, поэтому исчезает сама граница раздела фаз жид-

кость–пар. Такое состояние называется сверхкритической жидкостью.

На наш взгляд, формальное отождествление вещества с жидкостью в условиях закритических температур некорректно. Конденсированное и газообразное состояния вещества отличаются наличием (у первого) и отсутствием (у второго) сил межмолекулярного взаимодействия. Температура вещества соответствует тепловым колебаниям молекул. С ростом температуры (тепловых колебаний) межмолекулярные связи разрушаются, наиболее активные молекулы отрываются от жидкости и переходят в пар. Этот процесс можно в той или иной степени компенсировать ростом давления (сжатием вещества и сближением взаимодействующих молекул). Критическая температура соответствует такому уровню тепловых колебаний, при котором образование межмолекулярных связей становится невозможным ни при каком сжатии. А сам факт исчезновения границы раздела жидкость–газ в критическом состоянии свидетельствует об исчезновении именно жидкости. Газ, в отличие от жидкости или твердого тела, не имеет собственных фазовых границ и стремится распространиться по всему доступному пространству (в идеале – в бесконечность). Поэтому сверхкритическое состояние вещества по своей сути соответствует сверхкритическому газу.

Недопонимание сути критических состояний и использование некорректной терминологии привело в эндогенной геологии к системной гносеологической ошибке – отрицанию существования газообразных соединений в сверхкритических условиях недр Земли и других планет и спутников [Малышев, 2015]. Следствием этого отрицания является игнорирование эндогенного газового энерго-массопереноса и сопутствующих ему гетерогенных газ-конденсатных химических реакций. Все это в целом является серьезным препятствием в развитии эндогенной геологии и планетологии.

В связи с вышесказанным в данной работе под паром понимается газообразное состояние определенного вещества в подкритических условиях, тогда как термин газ используется применительно либо к веществу в сверхкритическом состоянии, либо к персонифицированной смеси газообразных соединений, находящихся как в подкритическом (пары), так и в сверхкритическом состояниях.

Давление газовой смеси  $P$  представляет собой сумму парциальных давлений  $p_i$  всех компонентов этой смеси:  $P = \sum p_i$ . Относительное парциальное давление  $x_i = p_i/P$  вещества  $i$ , входящего в состав газовой смеси, в случае идеальных газов (что применимо к атмосфере Титана) соответствует

мольной доле данного вещества в составе смеси:  $x_i = p_i/P = n_i/n$  ( $n_i$  – количество молей вещества  $i$  в газовой смеси,  $n$  – общее число молей в этой смеси). Однако для реальных газов (сжатые газовые смеси в недрах Титана), строгость этого соответствия нарушается. Тем не менее представляется возможным использовать относительное парциальное давление  $x_i = p_i/P$  в качестве количественной характеристики концентрации вещества  $i$  в газовой смеси, учитывая, что для атмосферы Титана эта характеристика строго соответствует мольной доле вещества  $i$ , тогда как для недр Титана – лишь в первом приближении. Далее термины “относительное парциальное давление” и “концентрация вещества в газовой смеси” используются как синонимы.

В состав газовой смеси может входить любое количество вещества, находящегося в сверхкритических условиях. Однако в подкритических условиях концентрация паров вещества контролируется давлением его насыщения и общим давлением газовой смеси. Если давление насыщения данного вещества больше общего давления газа, то в газовой смеси может находиться любое количество паров этого вещества вплоть до формирования газа исключительно из паров этого вещества ( $x_i = 1$ ). Если давление насыщения  $p_{ni}$  вещества  $i$  меньше общего давления газовой смеси, то возможная концентрация паров этого вещества ограничена сверху его парциальным давлением насыщения ( $x_i \leq x_{i \max} = p_{ni}/P$ ). В зависимости от условий величина максимальной концентрации вещества в газовой смеси  $x_{i \max}$  обуславливает как необходимость конденсации избытков парообразного вещества, так и возможность их испарения.

В данной работе величина  $x_{i \max}$  рассматривается как функция положения газовой смеси на вертикальном профиле спутника  $x_{i \max}(h) = p_{ni}/P(h)$ , где  $h$  – расстояние до поверхности Титана в атмосфере или его недрах. В свою очередь давление насыщения  $p_{ni}$  определяется температурой газа  $p_{ni} = p_{ni}(T(h))$ , т.е.  $x_{i \max}(h) = p_{ni}(T(h))/P(h)$ . Вертикальные профили давления и температуры в атмосфере Титана определены прямыми измерениями [Fulchignoni et al., 2005], тогда как в недрах они задаются моделями или осредненными безмодельными расчетами.

Газы – относительно легкие молекулярные образования, не имеющие устойчивых связей ни между собой, ни с вмещающими структурами, – в эндогенных условиях предрасположены для диффузионного перемещения в сплошных средах, включая кристаллические структуры. Само диффузионное перемещение осуществляется миграцией комплексных, по определению М.А. Криволаза [1970], дефектов. В отличие от обычной химиче-

ской диффузии [Diffusion ..., 2010] эндогенная газовая диффузия [Малышев, 2015] ориентирована против силы тяжести, а не против градиента концентраций. Более того, диффузионное перемещение газообразных соединений в сплошных средах ведет к увеличению тепловых колебаний и способствует разрушению кристаллических решеток, что облегчает газовую диффузию на этих участках и способствует концентрации в них газообразных соединений, т.е. формированию газовых диффузионных зон, игнорирующих градиент концентраций (и закон Фика) и ориентированных по направлению к поверхности небесного тела. Газы в недрах небесного тела могут быть первичными (аккреционными), радиогенными (водород, гелий, аргон) или вновь образованными за счет химических взаимодействий. Однако вне зависимости от происхождения они испытывают тенденцию к формированию диффузионных потоков, ориентированных к поверхности и представляющих собой проявление планетарных процессов гравитационной дифференциации, являющихся мощным источником энергии. По сути, диффузионные газовые потоки транспортируют к поверхности небесных тел тепло и давление глубин. Именно этим обусловлена мощь вулканических извержений, и эта же энергия лежит в основе магмообразования и последующей динамической активности магматических систем.

Вместе с тем, дегазационные процессы в условиях недр Титана имеют свою специфику: термобарические условия, а также избыток воды в рассматриваемых моделях (водно-ледяная оболочка + мантийные льды) предполагают устойчивость в глубинах спутника клатратных соединений летучих [Journaux et al., 2020], что, теоретически, должно приводить к фиксации газов в ледяных конденсатах и затруднению их продвижения к поверхности. Поэтому наличие диффузионных потоков в клатратной вмещающей среде и подавление ими клатратообразования представляет самостоятельный интерес для понимания условий образования эндогенных флюидов в недрах Титана. Как известно [Дядин, Гушин, 1998], способностью образовывать гидраты обладают гидрофобные газы и пары летучих соединений, молекулы которых имеют размеры в пределах  $3.8\text{--}9.2 \text{ \AA}$  ( $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и др.). Однако вместимость клатратных структур ограничена — на одну гостевую молекулу расходуются от 5.75 (кубическая структура клатратного каркаса) до 34 (гексагональная структура) молекул воды. Ограничена также и область существования клатратов: для диапазона давлений на предполагаемой границе гидросфера—порода в недрах спутника (650—850 МПа) они диссоциируют при температурах выше  $50^\circ\text{C}$  [Jour-

naux et al., 2020], тогда как существование водного конденсата возможно начиная с  $374^\circ\text{C}$ .

При прохождении диффузионного газового потока сквозь гидросферу Титана в условиях клатратообразования вероятны 4 стадии.

1. Стадия поглощения, соответствующая захвату диффундирующих газов и образованию газовых кристаллогидратов в жидкой среде и гидратной раскристаллизации водных льдов. В первом приближении эта стадия аналогична метасоматозу земных горных пород, а в условиях Титана ее можно считать стадией криометасоматоза гидросферы спутника.

2. Стадия насыщения, соответствующая локальному исчерпанию поглощающей способности кристаллогидратных структур в газовой диффузионной зоне и началу их разрушения с освобождением ранее поглощенных летучих. Стадия аналогична мигматизации земных горных пород, для Титана ее можно рассматривать как стадию локальной криомигматизации гидратной части гидросферы спутника.

3. Стадия разрушения, соответствующая формированию в разрушающихся кристаллогидратах каналов, в которых концентрируются и перемещаются к поверхности эндогенные флюидные потоки, включающие в себя и фрагменты каркасов ранее существовавших гидратных структур. Стадия аналогична формированию магматических каналов в недрах Земли и в условиях Титана соответствует криомагматизму.

4. Стадия восстановления возможна при прекращении активности газовой диффузионной зоны, уходе избыточных летучих к поверхности и захвате остаточных газов кристаллогидратными структурами. Стадия аналогична земным постмагматическим процессам.

Следует учитывать, что наличие гидратов в гидросфере Титана позволяет не только пропускать сквозь зону криометасоматоза эндогенные флюиды, но и автономно генерировать диффузионные газовые потоки из своего состава под воздействием эндогенного тепла: разрушение ниже расположенных гидратов неизбежно приводит к переизбытку летучих в верхних частях гидратной оболочки с соответствующим прохождением процесса по приведенным выше 2—4 стадиям. Более подробно эту интересную тему предполагается рассмотреть в отдельных работах, посвященных гетерогенным газ-конденсатным реакциям в недрах спутника.

В зависимости от *TP*-профиля недр и атмосферы Титана при перемещении газов от его центра максимальные концентрации паров в газовых смесях могут как уменьшаться, так и увеличиваться. Соответственно, конденсация вещества

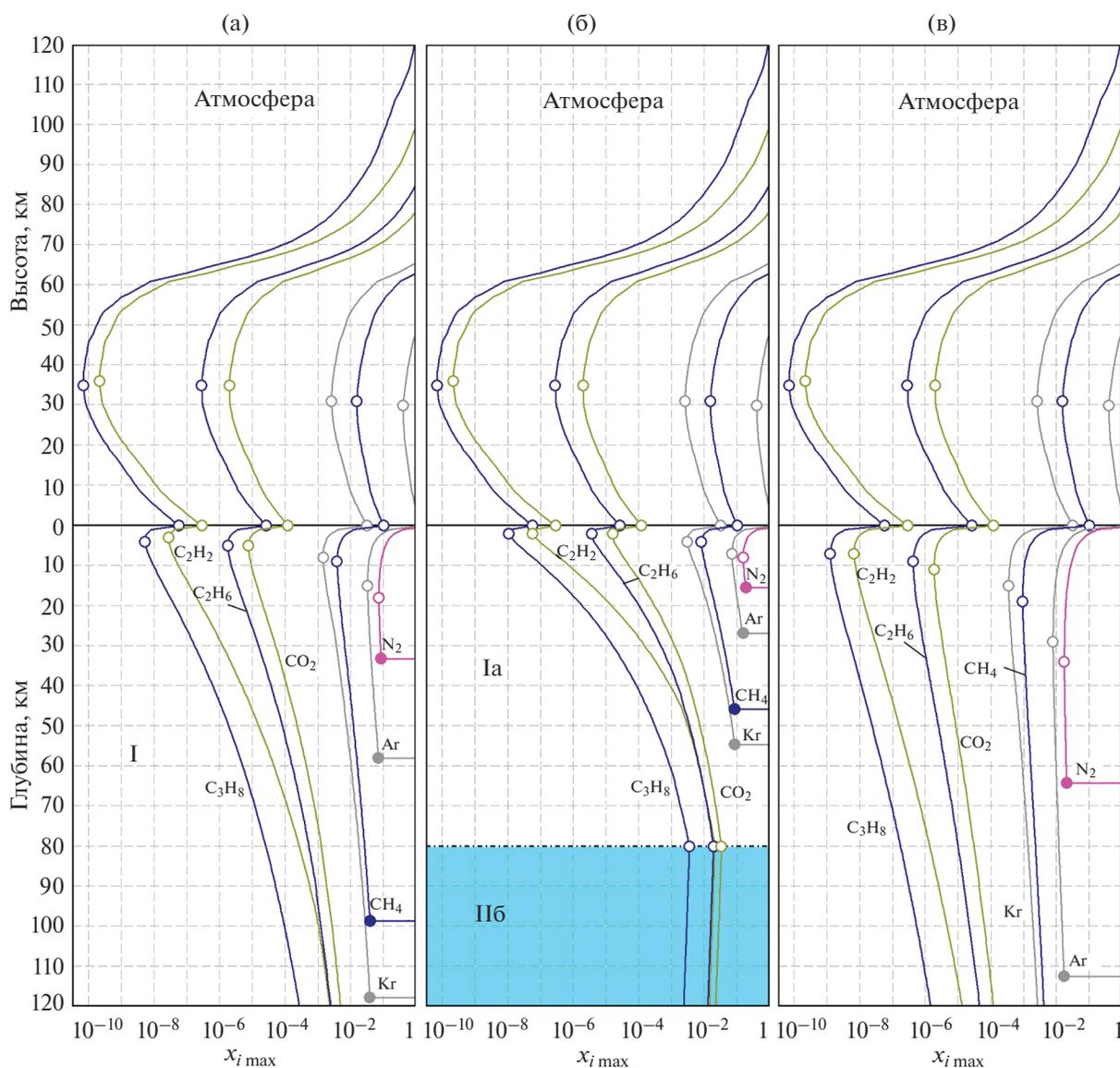
**Таблица 1.** Уровни газ-конденсатных инверсий некоторых летучих веществ в условиях Титана

Вещество	Расстояние до поверхности $h$ , км		$\lg x_i \max^*$			
Инверсия “конденсация → испарение” в атмосфере						
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	36		−9.654			
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	35		−10.159			
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	35		−6.542			
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	35		−5.703			
Kr	31		−2.591			
CH <sub>4</sub>	31		−1.818			
Ar	30		−0.393			
Инверсия “испарение → конденсация” на поверхности						
NH <sub>3</sub>	0		−10.438			
H <sub>2</sub> S	0		−7.337			
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0		−7.236			
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0		−6.534			
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0		−4.575			
CO <sub>2</sub>	0		−7.682			
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0		−3.914			
Kr	0		−1.495			
CH <sub>4</sub>	0		−0.994			
Инверсия “конденсация → испарение” под поверхностью						
	Модель без океана		Модель с океаном		Без модели	
	$h$ , км	$\lg x_i$	$h$ , км	$\lg x_i$	$h$ , км	$\lg x_i$
NH <sub>3</sub>	2	−11.32	1	−11.02	5	−11.94
SO <sub>2</sub>	3	−11.63	1	−11.33	5	−12.25
CO <sub>2</sub>	3	−8.641	1	−8.325	5	−9.252
H <sub>2</sub> S	3	−8.337	1	−8.009	7	−8.950
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	3	−7.556	2	−7.233	7	−8.173
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4	−8.281	2	−7.962	7	−8.898
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5	−5.749	2	−5.431	9	−6.364
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5	−5.116	2	−4.794	11	−5.733
Kr	8	−2.838	4	−2.515	15	−3.456
CH <sub>4</sub>	9	−2.413	4	−2.091	19	−3.031
Ar	15	−1.481	7	−1.157	29	−2.10
N <sub>2</sub>	18	−1.137	8	−0.812	34	−1.755

Примечание. \*  $x_i$  — относительное парциальное давление вещества  $i$ , входящего в состав газовой смеси, в случае идеальных газов (что применимо к атмосфере Титана) соответствует мольной доле данного вещества в составе смеси.

может сменяться его испарением, и наоборот, испарение — конденсаций. Положение некоторых точек инверсий на вертикальном профиле недр и атмосферы Титана приведены в табл. 1 и показаны на рис. 2. Подповерхностная инверсия “конденсат → газ” обусловлена быстрым снижением давления в недрах Титана по мере приближения к

его поверхности в условиях малых глубин. Инверсия “газ → конденсат” на поверхности спутника связана с резким понижением температуры в приповерхностной части атмосферы, тогда как обратная инверсия “конденсат → газ” в самой атмосфере соответствует изменению температурного тренда на уровне нижней тропопаузы.



**Рис. 2.** Изменение максимальной концентрации  $x_{i \max}$  паров летучих веществ в газовых смесях по вертикальному профилю атмосферы Титана и малых глубин в его недрах.

а – модель без внутреннего океана, б – модель с внутренним океаном, в – “безмодельный” вариант расчетов; I – ледяная кора, Ia – коровые льды, Ib – водный океан; кружками со сплошной заливкой показаны максимальные молярные доли газообразных веществ при критической (для данного вещества) температуре, кружками с белой заливкой – экстремумы максимальных содержаний летучих веществ в газовой смеси.

В “безмодельном” варианте  $TP$ -профиля недр Титана более глубокие инверсии отсутствуют. Однако в моделях с дифференцированным строением недр возможно появление небольших дополнительных инверсий вследствие неоднородностей  $TP$ -профиля. Тем не менее, три верхних инверсии (см. табл. 1) объективно определяются условиями в атмосфере Титана и на его поверхности. Они вполне реальны и имеют ключевое значение для понимания специфики дегазационных и атмосферных процессов, а также образования и накопления осадков на поверхности спутника. В

частности, газлифтинговая дегазация и лимнологические выбросы эндогенного метана обусловлены подповерхностной инверсией “конденсат → газ”. Ниже нее, начиная с глубины критической конденсации азота (см. рис. 2), эндогенные флюиды представлены практически безгазовыми конденсатами, так как на этой глубине сумма парциальных давлений паров подкритических летучих соединений существенно ниже литостатического давления. Поэтому выше глубин критической конденсации азота, самого распространенного вещества в атмосфере Титана, поддерживающее дав-

ление в газовых смесях могут обеспечить только водород, гелий и неон, вещества, сохраняющие сверхкритическое состояние в условиях Титана. Общее количество газов выше глубин критической конденсации азота контролируется содержанием этих веществ, так как пары остальных летучих соединений здесь могут существовать лишь в качестве примесей к сверхкритическим газам и при их отсутствии полностью переходят в конденсат.

По мере приближения к поверхности ситуация меняется, и горизонт практически безгазовых конденсатов переходит в горизонт их вскипания. Для азота подповерхностная инверсия “конденсация → испарение” находится примерно на вдвое меньшей глубине по сравнению с глубиной его критической конденсации. С этого уровня максимальная концентрация паров азота в газовых смесях начинает возрастать. Затем газовые смеси начинают пополняться парами аргона, метана и других подкритических летучих соединений. Вне зависимости от варианта расчета *TP*-профиля недр на глубине 1–2 км давление паров азота становится достаточным для обеспечения существования подкритических газовых смесей и начинается вскипание конденсата. Спокойное протекание этого процесса приводит к проявлениям газлифтинговой дегазации на поверхности, тогда как затрудненное поверхностными отложениями или усиленное внедрением глубинных конденсатов вызывает мощные эпизодические выбросы эндогенных газ-конденсатных смесей. Далее под воздействием холодной атмосферы (инверсия “конденсация → испарение” на поверхности спутника) происходит конденсация эндогенных паров, частичное замерзание образующего метан-этанового конденсата и его выпадение на поверхность. Максимального развития эти процессы достигают при лимнологических выбросах, обуславливая мощные метановые штормы в атмосфере Титана, интенсивные осадки и существенные изменения на поверхности спутника.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для формирования углеводородного многообразия в атмосфере и на поверхности Титана ключевое значение имеет поступление эндогенного метана, постоянно расходуемого в атмосферных фотохимических реакциях. Дегазационные и криовулканические процессы, восполняющие потери атмосферного метана, имеют специфику, обусловленную их протеканием через жидкостную среду – глобальный (или несколько региональных) горизонт жидких углеводородов с единой эквипотенциальной поверхностью, частично обнажающийся на поверхности в виде озер и морей Титана. Поэтому классические криовулканические формы рельефа редки, и за все время на-

блюдений не была обнаружена ни одна “горячая точка”, свидетельствующая о современной криовулканической активности. В то же время имеющаяся совокупность наблюдательных фактов свидетельствует о наличии и распространенности специфических форм дегазации, протекающих сквозь жидкостную среду. Это “газлифтинговая дегазация”, обуславливающая формирование специфического рельефа SED депрессий и их заполнение углеводородной жидкостью с относительно высоким уровнем поверхности. Есть вероятность, что эпизодическое появление в море Лигеи “волшебных островов” также является результатом “газлифтинговой дегазации”. Еще одна специфическая форма дегазации на Титане – лимнологические выбросы эндогенного газообразного метана, который может накапливаться в подповерхностных резервуарах в жидком состоянии, а затем провоцироваться на газообразование потоками вещества, поднимающимися из недр Титана. Следствием подобной дегазации является внезапное облакообразование с последующим развитием метановых бурь и выпадением значительного количества осадков.

Наличие в приповерхностном профиле недр Титана слоя практически безгазовых конденсатов, сменяющегося вверх по разрезу горизонтом их вскипания вместе с глобальным распространением жидкостных горизонтов, определяет специфику дегазационных и криовулканических процессов на Титане и делает их ключевым фактором рельефообразования на спутнике и главной причиной углеводородного многообразия на его поверхности.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам за доброжелательное отношение к работе, ценные советы и замечания, способствующие улучшению рукописи и дальнейшему развитию исследований.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН № АААА-А19-119072990020-6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. Физико-химические модели внутреннего строения частично дифференцированного Титана // Геохимия. 2016. № 1. С. 32–55.
- Дядин Ю.А., Гуцин А.Л. Газовые гидраты // Соросовский образовательный журн. 1998. № 3. С. 55–64.
- Кривоглаз М.А. Дефекты в твердых растворах, стабилизирующиеся при понижении температуры // Физика твердого тела. 1970. Т. 12. Вып. 8. С. 2445–2451.
- Кронрод В.А., Дунаева А.Н., Гудкова Т.В., Кусков О.Л. Согласование моделей внутреннего строения частич-

- но дифференцированного Титана с данными гравитационного поля // *Астрономический Вестник*. 2020. Т. 54. № 5. С. 431–445.
- Малышев А.И.* Жизнь вулкана. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2000. 261 с.
- Малышев А.И.* Динамическая модель магматического процесса // *Геология Урала и сопредельных территорий*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 16–39.
- Малышев А.И.* Газовый фактор в эндогенных процессах. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2015. 324 с.
- Малышев А.И., Малышева Л.К.* Вулканизм и проблемы марсианского рельефообразования // *Вулканология и сейсмология*. 2003. № 2. С. 27–40.
- Малышев А.И., Малышева Л.К.* Планетарные дегазационные процессы и условия возникновения предбиологических состояний на планетах Солнечной системы: III. Малые небесные тела, метеориты и открытый космос // *Литосфера*. 2009. № 4. С. 93–103.
- Малышев А.И., Малышева Л.К.* Максимальные концентрации газообразных соединений в недрах и атмосфере Титана, спутника Сатурна // *Труды Института геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого*. 2020. Вып. 167. С. 73–80.
- Малышева Л.К.* Внеземной вулканизм (информационный обзор) // *Вулканология и сейсмология*. 2004. № 6. С. 65–77.
- Малышева Л.К., Малышев А.И.* Углеводороды и дегазационные процессы Титана, спутника Сатурна // *Литосфера*. 2020. № 6. С. 873–895.
- Тазиев Г.* Запах серы / Пер. с французского. М.: Мысль, 1980. 222 с.
- Физические величины / Справочник*. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- Aharonson O., Hayes A.G., Lunine J.I. et al.* An asymmetric distribution of lakes on Titan as a possible consequence of orbital forcing // *Nat. Geosci.* 2009. V. 2. P. 851–854. <https://doi.org/10.1038/ngeo698>
- Atreya S.K., Adams E.Y., Niemann H.B. et al.* Titan's methane cycle // *Planet. Space Sci.* 2006. V. 54. P. 1177–1187. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.05.028>
- Birch S.P.D., Hayes A.G., Dietrich W.E. et al.* Geomorphologic mapping of Titan's polar terrains: Constraining Surface Processes and Landscape Evolution // *Icarus*. 2017. V. 282. P. 214–236.
- Choukroun M., Sotin C.* Is Titan's shape caused by its meteorology and carbon cycle? // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L04201. <https://doi.org/10.1029/2011GL050747>
- Clark R.N., Curchin J.M., Barnes J.W. et al.* Detection and mapping of hydrocarbon deposits on Titan // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. E10005. <https://doi.org/10.1029/2009JE003369>
- Cornet T., Cordier D., Bahers T.L. et al.* Dissolution on Titan and on Earth: Toward the age of Titan's karstic landscapes // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2015. V. 120. P. 1044–1074. <https://doi.org/10.1002/2014JE004738>
- Cotel A.J.* A trigger mechanism for the Lake Nyos disaster // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1999. V. 88. P. 343–347.
- Cottini V., Nixon C.A., Jennings D.E. et al.* Spatial and temporal variations in Titan's surface temperatures from Cassini CIRS observations // *Planet. Space Sci.* 2012. V. 60. P. 62–71.
- Diffusion in minerals and melts / Eds. Y. Zhang, D.J. Cherniak // *Rev. Mineral. Geochem.* 2010. V. 72. 1038 p.
- Faulk S.P., Lora J.M., Mitchell J.L. et al.* Titan's climate patterns and surface methane distribution due to the coupling of land hydrology and atmosphere // *Nature Astronomy*. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0963-0>
- Fulchignoni M., Ferri F., Angrilli F. et al.* In situ measurements of the physical characteristics of Titan's environment // *Nature*. 2005. V. 438. P. 785–791.
- Glein C.R.* Noble gases, nitrogen, and methane from the deep interior to the atmosphere of Titan // *Icarus*. 2015. P. 570–586.
- Grasset O., Sotin C., Dechamps F.* On the internal structure and dynamics of Titan // *Planet. Space Sci.* 2000. V. 48. P. 617–636.
- Griffith C.A., Penteado P.F., Turner J.D. et al.* A corridor of exposed ice-rich bedrock across Titan's tropical region // *Nature Astronomy*. 2019. V. 3(7). P. 642–648.
- Hayes A.G.* The Lakes and Seas of Titan // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2016. V. 44. P. 57–83. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012247>
- Hayes A.G., Aharonson O., Callahan P. et al.* Hydrocarbon lakes on Titan: Distribution and interaction with a porous regolith // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L09204. <https://doi.org/10.1029/2008gl033409>
- Hayes A.G., Birch S.P.D., Dietrich W.E. et al.* Topographic constraints on the evolution and connectivity of Titan's lacustrine basins // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. P. 11745–11753. <https://doi.org/10.1002/2017GL075468>
- Hayes A.G., Michaelides R.J., Turtle E.P. et al.* The distribution and volume of Titan's hydrocarbon lakes and seas // 45th Lunar and Planetary Science Conference. 2014. Abstract 2341.
- Hofgartner J.D., Hayes A.G., Lunine J.I. et al.* Titan's "Magnetic Islands": Transient Features in a Hydrocarbon Sea // *Icarus*. 2016. V. 271. P. 338–349.
- Hörsst S.M.* Titan's atmosphere and climate // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2017. V. 122. P. 432–482. <https://doi.org/10.1002/2016je005240>
- Iess L., Jacobson R.A., Ducci M. et al.* The Tides of Titan // *Science*. 2012. V. 337. P. 457–459.
- Janssen M.A., Le Gall A., Lopes R.M. et al.* Titan's surface at 2.18-cm wavelength imaged by the Cassini RADAR radiometer: Results and interpretations through the first ten years of observation // *Icarus*. 2016. V. 270. P. 443–459.
- Journaux B., Kalousová K., Sotin C. et al.* Large Ocean Worlds with High-Pressure Ices // *Space Sci. Rev.* 2020. V. 216. № 7. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0633-7>
- Langhans M.H., Jaumann R., Stephan K. et al.* Titan's fluvial valleys: Morphology, distribution, and spectral properties // *Planet. Space Sci.* 2012. V. 60. P. 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.01.020>
- Loose B., Naveira Garabato A.C., Schlosser P. et al.* Evidence of an active volcanic heat source beneath the Pine Island Glacier // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. № 2431. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04421-3>
- Lopes R.M.C., Kirk R.L., Mitchell K.L. et al.* Cryovolcanism on Titan: New results from Cassini RADAR and VIMS // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2013. V. 118. P. 416–435. <https://doi.org/10.1002/jgre.20062>
- Lopes R.M.C., Malaska M.J., Schoenfeld A.M. et al.* A global geomorphologic map of Saturn's moon Titan // *Nature Astronomy*. 2020. V. 4(3). P. 228–233.
- Lopes R.M.C., Malaska M.J., Solomonidou A. et al.* Nature, distribution, and origin of Titan's Undifferentiated Plains // *Icarus*. 2016. V. 270. P. 162–182. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.11.034>

- Lopes R.M.C., Stofan E.R., Peckyno R. et al.* Distribution and interplay of geologic processes on Titan from Cassini radar data // *Icarus*. 2010. V. 205. P. 540–558.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.08.010>
- Lorenz R.D., Lopes R.M., Paganelli F. et al.* Fluvial channels on Titan: meteorological paradigm and Cassini RADAR observations // *Planet. Space Sci.* 2008. V. 56. P. 1132–1144.
- Malaska M.J., Lopes R.M.C., Williams D.A. et al.* Geomorphological map of the Afekan Crater region, Titan: terrain relationships in the equatorial and mid-latitude regions // *Icarus*. 2016. V. 270. P. 130–161.
- Mastrogiuseppe M., Poggiali V., Hayes A. et al.* The bathymetry of a Titan sea // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 1432–1437.  
<https://doi.org/10.1002/2013GL058618>
- Niemann H.B., Atreya S.K., Baueret S.J. et al.* The abundance of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe // *Nature*. 2005. V. 438. P. 779–784.
- Niemann H.B., Atreya S.K., Demick J.E. et al.* Composition of Titan's lower atmosphere and simple surface volatiles as measured by the Cassini-Huygens probe gas chromatograph mass spectrometer experiment // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. E12006.  
<https://doi.org/10.1029/2010JE003659>
- Nixon C.A., Lorenz R.D., Achterberg R.K. et al.* Titan's cold case files – Outstanding questions after Cassini-Huygens // *Planet. Space Sci.* 2018. V. 155. P. 50–72.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.02.009>
- Rodriguez S., Garcia A., Lucas A. et al.* Global mapping and characterization of Titan's dune fields with Cassini: Correlation between RADAR and VIMS observations // *Icarus*. 2014. V. 230. P. 168–179.
- Schaller E.L., Brouwn M.E., Roe H.G. et al.* A large cloud outburst at Titan's south pole // *Icarus*. 2006. V. 182. P. 224–229.
- Schaller E.L., Roe H.G., Schneider T. et al.* Storms in the tropics of Titan // *Nature*. 2009. V. 460. P. 873–875.  
<https://doi.org/10.1038/nature08193>
- Sigurdsson H., Devine J.D., Tchoua F.M. et al.* Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun Cameroun // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1987. V. 31. P. 1–16.
- Singh S., McCord T.B., Combe J-Ph. et al.* Acetylene on Titan's surface // *The Astrophysical J.* 2016. V. 828. Iss. 1. Article id. 55. 8 p.  
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/828/1/55>
- Solomonidou, A. et al.* The spectral nature of Titan's major geomorphological units: constraints on surface composition // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2018. V. 123. P. 489–507.
- Stofan E.R., Elachi C., Lunine J.I. et al.* The lakes of Titan // *Nature*. 2007. V. 445. P. 61–64.
- Tobie G., Lunine J.I., Sotin C.* Episodic outgassing as the origin of atmospheric methane on Titan // *Nature*. 2006. V. 440. P. 61–64.
- Tomasko M.G., Archinal B., Becker T. et al.* Rain, wind and haze during the Huygens probe's descent to Titan's surface // *Nature*. 2005. V. 438. P. 765–778.
- Turtle E.P., Del Genio A.D., Barbara J.M. et al.* Seasonal changes in Titan's meteorology // *Geophys. Res. Lett.* 2011a. V. 38. L03203.  
<https://doi.org/10.1029/2010GL046266>
- Turtle E.P., Perry J.E., Barbara J.M. et al.* Titan's meteorology over the Cassini mission: evidence for extensive subsurface methane reservoirs // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 5320–5328.  
<https://doi.org/10.1029/2018GL078170>
- Turtle E.P., Perry J.E., Hayes A.G. et al.* Rapid and Extensive Surface Changes Near Titan's Equator: Evidence of April Showers // *Science*. 2011b. V. 331. P. 1414–1417.  
<https://doi.org/10.1126/science.1201063>
- Wood C.A.* North polar crater and lake basins: a variety of shapes – a single origin? // 46th Lunar and Planetary Science Conference. 2015. Abstract 2490.
- Yung Y.L., Allen M., Pinto J.P.* Photochemistry of the atmosphere of Titan – Comparison between model and observations // *Ap. J.* 1984. V. 55. P. 465–506.  
<https://doi.org/10.1086/190963>

## Cryovolcanism and Degassing Processes on Titan, Saturn's Satellite

L. K. Malysheva<sup>1,\*</sup> and A. I. Malyshev<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS,  
 Akad. Vonsovsky str., 15, Ekaterinburg, 620016 Russia

\*e-mail: malysheva@igg.uran.ru

\*\*e-mail: malyshev@igg.uran.ru

The paper considers the distribution, diversity and features of volcanic and degassing processes on Titan, and also analyzes the maximum gas concentrations of volatile compounds along the vertical profile of its interior and atmosphere. It is shown that the specificity of volcanic and degassing processes on Titan is due to low temperatures, a peculiar material composition and the widespread distribution of the subsurface liquid horizon. As a result, the usual (for the Earth) forms of (cryo-)volcanic activity are reduced here, while widespread 1) “gas-lifting degassing”, which forms numerous small depressions with an increased liquid level and, possibly, is the cause of the appearance of “magic islands” in the Ligeia Mare, as well as 2) limnological emissions of gaseous methane, followed by intense cloud formation, the development of methane storms and the fallout of large volumes of precipitation. In turn, both gas-lifting degassing and limnological emissions of endogenous methane are caused by the “condensate → gas” inversion at depths of 1–2 km in the bowels of Titan. Below this level, endogenous fluids are represented by practically gas-free condensates, while above this, their intense boiling begins. It was concluded that degassing processes are the most important relief-forming factor on Titan.

**Keywords:** Titan, cryovolcanism, hydrocarbons, degassing, gaslift, limnological disasters