

УДК 523.4+553.9+551.21

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-873-895

Углеводороды и дегазационные процессы Титана, спутника Сатурна

Л. К. Малышева, А. И. Малышев

Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: malyshev@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 18.12.2019 г., принята к печати 17.03.2020 г.

Объект исследований и материалы. Работа содержит обзор имеющейся информации об атмосфере и поверхности Титана, необходимой для разработки концепций формирования углеводородного сырья, включая естественный углеводородный синтез, формирование пребиогенных состояний и зарождение жизни. Наличие гигантских запасов абиогенных углеводородов на Титане представляется чрезвычайно важным для теории генезиса углеводородного сырья на Земле, поскольку любая концепция нефтегенеза, претендующая на непротиворечивое объяснение всей совокупности имеющихся фактов, должна учитывать возможность абиогенного формирования крупных скоплений углеводородов. *Результаты.* Показано, что углеводородное многообразие атмосферы и поверхности Титана обеспечивается поступлением эндогенного метана. Дегазационные процессы на Титане имеют специфические формы, обусловленные их протеканием через жидкостную среду: 1) “газлифтинговая дегазация”, формирующая многочисленные небольшие депрессии с повышенным уровнем жидкости и, возможно, являющаяся причиной появления “волшебных островов” в море Лигеи; 2) лимнологические выбросы газообразного метана с последующим интенсивным облакообразованием, развитием метановых бурь и выпадением больших объемов осадков. *Заключение.* Наличие на Титане активных дегазационных процессов в сочетании с появившимися моделями внутреннего строения Титана позволят уточнить ранее предложенную схему первичного естественного углеводородного синтеза в глубинах Титана.

Ключевые слова: Титан, углеводороды, криовулканизм, дегазация

Источник финансирования

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

Hydrocarbons and degassing processes of Saturn’s satellite Titan

Lidiya K. Malysheva, Aleksandr I. Malyshev

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mail: malyshev@igg.uran.ru

Received 18.12.2019, accepted 17.03.2020

Research subject and methods. The paper presents a review of available information on the atmosphere of Titan and its surface, necessary for the development of concepts of hydrocarbon formation, including the natural hydrocarbon synthesis, formation of prebiogenic states and origin of life. The presence of vast reserves of abiogenic hydrocarbons on Titan is extremely important for the theory of hydrocarbon genesis on the Earth, since any concept of naphthogenesis claiming to be a consistent explanation of the entire set of available facts must take into account the possibility of abiogenic formation of large accumulations of hydrocarbons. *Results.* It was shown that the hydrocarbon diversity of the atmosphere and surface of Titan is provided by the inflow of endogenous methane. Degassing processes on Titan are characterized by specific forms due to their flow through a liquid medium: 1) “gas-lifting degassing” forming numerous small depressions with increased fluid levels and, possibly, being the cause of “magic islands” in the sea of Ligeia; 2) limnological emissions of gaseous methane, followed by intensive cloud formation, the development of methane storms and large amounts of precipitation. *Conclusions.* It is concluded that the presence of active degassing processes on Titan in combination with the emerging models of its internal structure contribute to clarifying the previously proposed scheme of primary natural hydrocarbon synthesis in the depths of Titan.

Keywords: Titan, hydrocarbons, cryovolcanism, degassing

Funding information

The studies were carried out within the scientific theme of IGG UB RAS No АААА-А19-119072990020-6

Для цитирования: Малышева Л.К., Малышев А.И. (2020) Углеводороды и дегазационные процессы Титана, спутника Сатурна. *Литосфера*, 20(6), 873-895. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-873-895

For citation: Malysheva L.K., Malyshev A.I. (2020) Hydrocarbons and degassing processes of Saturn’s satellite Titan. *Litosfera*, 20(6), 873-895. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-873-895

© Л.К. Малышева, А.И. Малышев, 2020

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the reviewer for their friendly attitude, valuable advice and comments that helped us improve the manuscript and outline the direction of future research.

ВВЕДЕНИЕ

В свете существующей дискуссии о генезисе месторождений углеводородного сырья (Иванов, 2018) большой интерес представляет информация о существовании гигантских скоплений углеводородов на Титане, спутнике Сатурна. По оценкам исследователей (Lorenz et al., 20086), общий запас жидкостей Титана превышает земные запасы нефти и газа ($\approx 800\text{--}1000 \text{ км}^3$) в несколько сотен раз. В одном только море Лигеи содержится примерно 10^4 км^3 углеводородной жидкости, состоящей преимущественно из метана и этана (Mastrogiuseppe et al., 2014), что составляет по массе лишь небольшую долю от количества углеводородов (в основном метана) в атмосфере Титана. Если весь атмосферный метан (1.4% от общего давления газов) конденсируется на поверхности, он формирует глобальный слой мощностью 4–5 м (Hörst, 2017). Помимо этого, значительное количество углеводородов присутствует на поверхности Титана в твердом состоянии – в виде дюнных песков. Исследователи (Lopes et al., 2016) отмечают, что темные дюны занимают около 13.9% поверхности Титана. По оценкам (Rodriguez et al., 2014), объем углеводородов в дюнных отложениях – $(1.7\text{--}4.4) \times 10^5 \text{ км}^3$, что по углеводородному эквиваленту в несколько сотен раз превышает запасы угля на Земле. Еще $\approx 17\%$ поверхности Титана занимают так называемые недифференцированные равнины, в составе которых, как считают исследователи (Lopes et al., 2016), доминируют углеводородные материалы, однако выполнить по ним количественную оценку не представляется возможным.

Любая концепция нефтегенеза, претендующая на непротиворечивое объяснение всей совокупности имеющихся фактов, должна учитывать информацию об углеводородных концентрациях на поверхности Титана. Данная работа представляет собой обзор имеющейся информации об атмосфере и поверхности Титана, необходимой для последующего использования в концепциях формирования углеводородного сырья, включая концепцию естественного углеводородного синтеза (Мальшев, 2004, 2005, 2017), формирования предбиогенных состояний и зарождения жизни (Мальшев, Мальшева, 2009а–в; Мальшев, 2015).

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В нашей Солнечной системе Титан – единственный спутник с существенной атмосферой, причем

единственное другое после 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 ≈ 1.43 млрд км (9.5 а.е.¹) от Солнца и ≈ 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° . Это обеспечивает на Титане смену времен года “зима–лето” с циклическостью, равной периоду вращения Сатурна вокруг Солнца – 29.5 земных лет (рис. 1). 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 – примерно -180°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 Вт/м^2 больше солнечного потока, чем на пике северного полярного лета (Aharonson et al., 2009).

Плотность Титана равна $1.9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, масса – $1.34 \cdot 10^{23} \text{ кг}$ (2% массы Земли), гравитация составляет седьмую часть земной. Из-за сочетания низких температур и гравитации Титан обладает достаточно мощной атмосферой с приповерхностным давлением в 1.5 раза выше земного. В составе атмосферных газов (Clark et al., 2010) преобладает азот (95–98%), присутствуют метан (5–1.4%), водород (0.1–0.4%), аргон ($4.3 \cdot 10^{-3}\%$), этан ($n \cdot 10^{-3}\%$), ацетилен ($n \cdot 10^{-4}\%$), пропан ($n \cdot 10^{-5}\%$), этилен ($n \cdot 10^{-5}\%$), СО ($n \cdot 10^{-3}\%$) и СО₂ ($n \cdot 10^{-6}\%$), среди атмосферных аэрозолей зарегистрированы следы аммиака. В северной полярной области Титана в течение зимы образуется аэрозольное облако цианистого водорода. Поверхностные *T-P* условия Титана близки к тройной точке метана, поэтому

¹ А.е. – астрономическая единица, среднее расстояние от Земли до Солнца, 149.5 млн км.

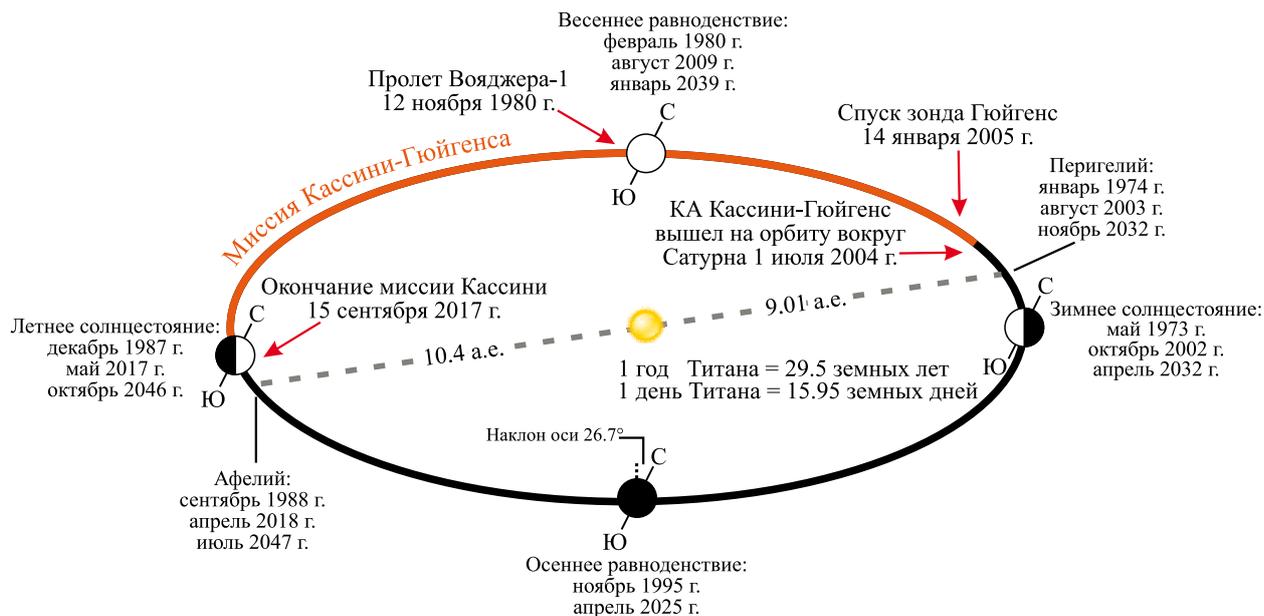


Рис. 1. Схема орбиты Сатурна и его спутника Титана, на которой отмечены продолжительность и время работы АМС Кассини-Гюйгенс, по (Hörst, 2017).

Fig. 1. Orbit scheme of Saturn and its moon Titan, which notes the length and timing of the Cassini-Huygens mission, according to (Hörst, 2017).

на Титане возможен постоянный углеводородный цикл, аналогичный круговороту воды на Земле.

Автоматическая межпланетная станция (АМС) Кассини-Гюйгенс вышла на заданную орбиту для изучения Сатурна и его спутников 1 июля 2004 г. Спускаемый аппарат (СА) Гюйгенс, предназначенный для изучения Титана, 14 января 2005 г. совершил мягкую посадку в районе его экватора. 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 (см. рис. 1). Длительные наблюдения, начавшиеся спустя два 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).

АТМОСФЕРА

Кроме метана, этана, ацетилен, пропана и этилена в атмосфере Титана обнаружены в небольших концентрациях 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, Table 1). При этом было установлено, что массовые отношения большинства перечисленных соединений уве-

личиваются с высотой, что характерно для молекул, образующихся вследствие фотохимических реакций на больших высотах.

Солнечные фотоны и частицы с высоким уровнем энергии (фотоэлектроны, образующиеся в атмосфере Титана под воздействием солнечного рентгеновского и жесткого ультрафиолетового излучения, электроны из магнитосферы Сатурна, частицы солнечного ветра и ионы, возникающие при абляции микрометеоритов) воздействуют на N_2 и CH_4 (рис. 2), 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 аэрозоли², ответственные за характерный оранжевый цвет Титана и слои дымок. Образование аэрозолей происходит выше 300 км. Ниже 300 км дымка³ повсеместна. По мере оседания аэрозолей на 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 фотохими-

² Аэрозоль относится к любой частице, находящейся во взвешенном состоянии в газе, и, следовательно, представляет собой наиболее общий термин для описания частиц в атмосфере Титана (Hörst, 2017).

³ Дымка используется для обозначения фотохимически генерируемых нелетучих частиц в атмосфере Титана (Hörst, 2017).

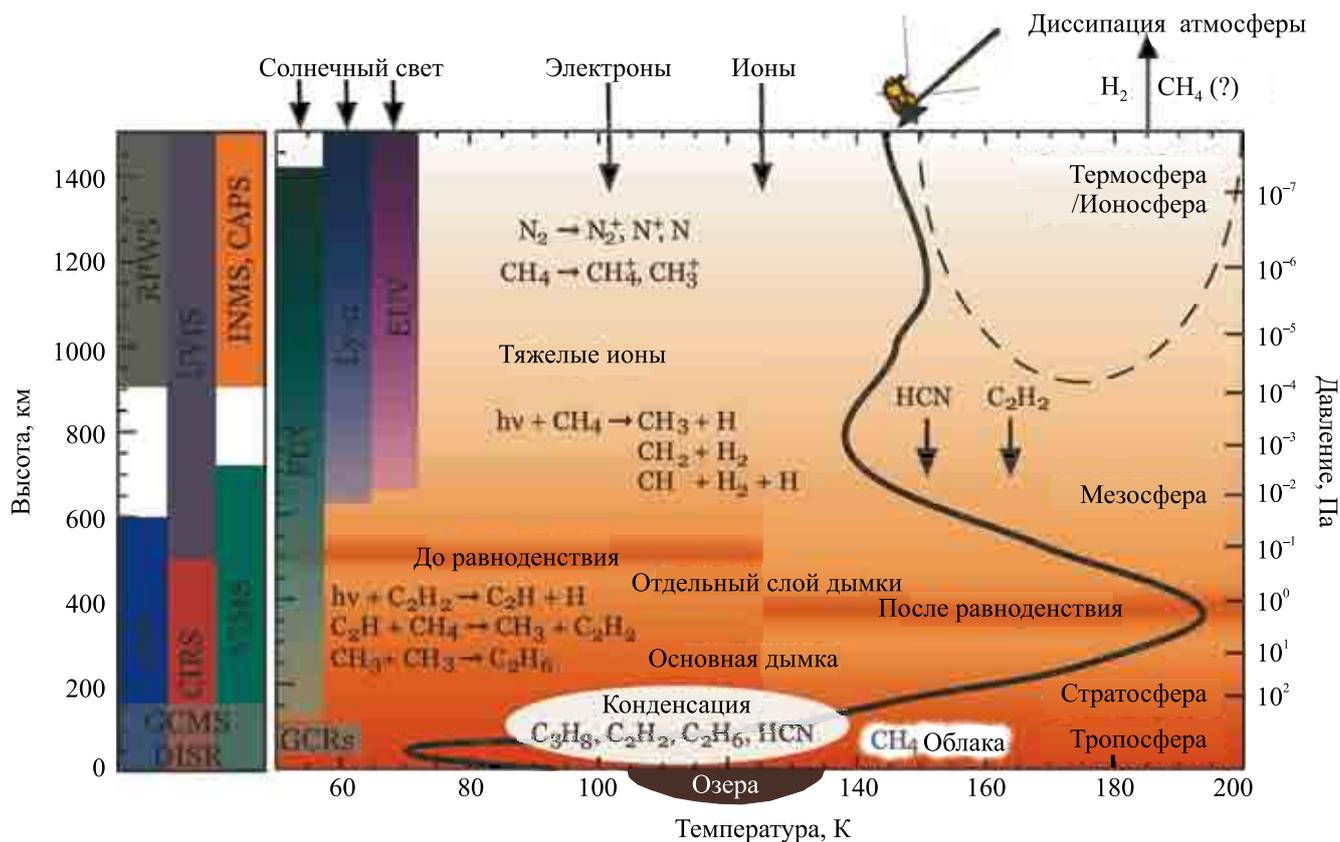


Рис. 2. Высотный диапазон покрытия приборов аппаратного комплекса АМС Кассини-Гюйгенс (слева), основные химические процессы в атмосфере и ее T - P профиль по траектории посадки СА Гюйгенс (Hörst, 2017).

Воздействие внешнего излучения на атмосферу Титана: EUV – жесткий ультрафиолет, FUV – дальний ультрафиолет, GCRs – галактические космические лучи, Ly- α – Лайман-альфа излучение. Приборы СА Гюйгенс: GCMS – газовый хроматографический масс-спектрометр, DISR – спускаемая камера/спектральный радиометр; приборы ОС Кассини: CIRS – инфракрасный спектрометр, UVIS – ультрафиолетовый спектрометр, VIMS – визуальный и инфракрасный картирующий спектрометр, INMS – ионный и нейтральный масс-спектрометр, ISS – подсистема визуализации, RPWS – регистратор радио- и плазменных волн, CAPS – плазменный спектрометр Кассини.

Fig. 2. The approximate altitude coverage of the instruments carried by Cassini-Huygens (left), some of the major chemical processes in the atmosphere and its T - P profile along the landing trajectory of the Huygens (Hörst, 2017).

The impact of external radiation on the atmosphere of Titan: EUV – extreme ultraviolet, FUV – far ultraviolet, GCRs – galactic cosmic rays, Ly- α – Lyman-alpha radiation. Huygens instruments: GCMS – Gas Chromatograph Mass Spectrometer, DISR – Descent Imager/Spectral Radiometer; Cassini instruments: CIRS – Composite Infrared Spectrometer, UVIS – Ultraviolet Imaging Spectrograph, VIMS – Visual and Infra-red Mapping Spectrometer, INMS – Ion and Neutral Mass Spectrometer, ISS – Imaging Science Subsystem, RPWS – Radio and Plasma Wave Science, CAPS – Cassini Plasma Spectrometer.

чески 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°) 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 эква-

тора до полюса). Одиночная циркуляционная ячейка эффективно перераспределяет тепло, приводя к относительно небольшому контрасту температуры от экватора к полюсу: температура поверхности асимметрично уменьшается от экватора к полюсам с уменьшением на 3°C в направлении зимнего полюса (60° с.ш.) и на 1°C в направлении летнего полюса (60° ю.ш.) (Cottini et al., 2012). Скорости ветра очень низкие (<1 м/с) на поверхности, но увеличиваются 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 скорости 200 м/с на высо-

те 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 над поверхностью спутника) конвективные метановые облака и высотные (от 30 до 300 км) стратиформные облака этана и нитрилов. Конвективные метановые облака наблюдаются на летнем полюсе и в средних широтах, тогда как другие типы облаков – на зимнем полюсе (Hörst, 2017). В частности, в 2004–2008 гг. (конец зимы в северном полушарии) в высоких северных широтах ($60\text{--}90^\circ$ с.ш.) находилось обширное долгоживущее облако этана и нитрилов, остальная же часть полушария была полностью свободна от облаков. В это же время в южном (летнем) полушарии регулярно регистрировались спорадические облака метана в средних широтах и над полюсом. По мнению исследователей (Rodriguez et al., 2011), образование зимнего (северного) полярного облака обусловлено снижением и охлаждением стратосферного воздуха по мере приближения к тропопаузе с преимущественной конденсацией этана, тогда как изменчивые летние (южные) облака конвективны по своей природе и состоят из конденсата метана.

Во второй половине 2008 г. северное полярное облако начало разрушаться, оставляя облачное кольцо с небольшими пятнами конвективных облаков в его центральной части. С наступлением в северном полушарии весеннего равноденствия в августе 2009 г. северное полярное облако полностью рассеялось (Rodriguez et al., 2011). Над южным полюсом спутника стратосферное облако этана и нитрила начало формироваться в 2012–2017 гг. в связи с наступлением поздней осени в южном полушарии (Le Mouélic et al., 2018). Примечательно, что формирование южного полярного облака началось на больших высотах (≈ 300 км) (de Kok et al., 2014) в верхней части стратосферы, непосредственно примыкающей к стратопаузе, тогда как рассеивание северного полярного облака произошло уже в нижней части стратосферы на высотах 30–65 км (Hörst, 2017), непосредственно примыкающих к температурной тропопаузе.

Таким образом, 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, в соответствии со стратосферным профилем снижения температуры, приводит к сбросу в конденсат избыточных (по отношению к парциальному давлению насыщения) количеств этана и нитрила, за счет чего и формируется полярное облако.

Наблюдения за метановыми облаками, по данным ОС Кассини, продолжались более 13 лет (Turtle et al., 2018). Конвективные тропосферные системы наблюдались над Южным полюсом первоначально с помощью земных телескопов с 2001 г., затем при помощи ОС Кассини с 2004 г. Большой выброс облаков в октябре 2004 г. привел к выпадению осадков на Равнине Арракис (Aragakis Planitia). Такая активность уменьшилась после 2005 г. по мере убывания южного лета. Удлиненные полосы конвективных облаков постоянно наблюдались в средних (иногда в более низких) южных широтах ($\approx 40\text{--}50^\circ$ 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.

Начиная с 2007 г. с наступлением северной весны облака стали регистрироваться в высоких северных широтах ($>55^\circ$ с.ш.), где они оставались относительно обычными в период равноденствия. В сентябре 2010 г., примерно через год после равноденствия, в низких южных широтах был замечен выброс большого стреловидного облака, за которым последовали обильные осадки, вызвавшие обширные изменения поверхности. После этого облачная активность резко снизилась и оставалась редкой, лишь несколько отдельных облаков наблюдались в средних южных и средних северных широтах в течение примерно 5 лет. Исследователи (Turtle et al., 2018) предполагают, что удаление метана сильными осадками высушило и стабилизировало атмосферу, аналогично более короткому падению активности после выброса южнополярных облаков в 2004 г.

Вопреки ожиданиям, основанным на моделях с “влажной” физикой, в 2010 г. произошло снижение облачной активности и в высоких северных широтах Титана: облака начали появляться около $\approx 55^\circ$ с.ш. только в 2016 г. и стали распространенными в течение 2017 г. В последний год полета (на несколько лет позже прогноза) небольшие облака также появились на $\approx 15\text{--}40^\circ$ с.ш. Вопреки прогнозам не повторилась на северном полюсе в северное лето и погодная картина летнего южного полюса – вместо ожидавшихся 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 стаби-

лен 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, аппаратура СА Гюйгенс определила относительную влажность метана на поверхности $\approx 50\%$ (Niemann et al., 2005, 2010). Модели облаков и гроз показывают, что для образования конвективных облаков требуется по меньшей мере 60% относительной влажности, а для гроз, способных вызывать значительные осадки, – 80% (Hörst, 2017). Поэтому утверждается, что на экваторе обычно недостаточно метана для образования осадков. 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).

УГЛЕВОДОРОДЫ ПОВЕРХНОСТИ

После посадки на поверхность Титана СА Гюйгенс работал 72 мин. Состав поверхности Титана остается плохо изученным, несмотря на анализ данных СА и обширных материалов дистанционного зондирования. Проблемы изучения поверхности Титана 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. При этом в наблюдаемых спектрах выделяется и вычитается вклад атмосферы, и лишь затем по остаточным спектрам становится возможным судить о свойствах и составе поверхности. Результаты этого анализа показывают (Solomonidou et al., 2018), что в распределении поверхностного состава прослеживается определенная закономерность: на экваторе Титана преобладают органические материалы и очень темный (в остаточном спектре) неизвестный материал, в то время как высокие широты содержат больше водяного льда.

Предполагается (Hörst, 2017), что жидкие и твердые углеводороды образуются в результате атмосферных физико-химических процессов и в конечном счете осаждаются на поверхность, т.е. состав поверхности однозначно связан с ее атмосферой. Анализы на месте посадки выявили 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. Дистанционными методами зондирования (спектрометр VIMS ОС Кассини) 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). Еще одним вероятным материалом поверхности считается водяной лед. Доказательства наличия водяного льда на поверхности Титана были впервые получены с помощью наземных телескопов (Griffith et al., 2003), однако обнаружение водяного льда дистанционными методами ОС Кассини остается дискуссионным (Hörst, 2017). Ряд исследователей определяют в спектрах признаки его присутствия (Brossier, et al., 2018), другие утверждают, что эти особенности могут быть объяснены другими углеводородами или нитрилами (Clark et al., 2010).

В экваториальном поясе Титана, в пределах $\pm 30^\circ$ по широте, и почти повсеместно по долготе, за исключением области Ксанаду (Xanadu, $70-140^\circ$ в.д.), обнаружены дюны, формирующие обширные дюнные поля. Дюны Титана имеют ширину 1 км, междюнное расстояние 1–3 км, длину от многих десятков до нескольких сотен километров и высоту порядка 100 м (Rodriguez et al., 2014). Они ориентированы преимущественно в направлении запад-восток, но в некоторых случаях отклонены до 10° от параллели к экватору (Barnes et al., 2008). На радарных изображениях они почти всегда темные (следствие поглощения излучения), линейные по форме, а по размерам и морфологии подобны линейным дюнам, обычным в больших песчаных морях на Земле, например в пустынях Намибии, Китая или Саудовской Аравии (Rodriguez et al., 2014). Зарегистрированное ОС Кассини излучение с дюнных полей, по всей видимости, соответствует частицам “песка”, в которых преобладают твердые органические вещества, спектрально сходные с атмосферными аэрозолями. Одним из соединений, входящих в состав дюн, является бензол, а для определения других компонентов требуются дополнительные данные (Clark, 2010). По оценкам (Lopes et al., 2016), дюнный материал покрывает 13.9% площади поверхности Титана с общим объемом углеводородов 3.5×10^5 км³. Их общая масса оценивается (Rodriguez et al., 2014) в 230 тыс. Гт, что многократно превышает аналогичные оценки массы углеводородов в полярных озерах и

морях (4–30 тыс. Гт). Следовательно, дюнные поля являются одним из основных типов углеводородных скоплений на поверхности Титана.

Аналогичные или даже более крупные скопления твердых углеводородов возможны на территории недифференцированных равнин, занимающих примерно 17% поверхности Титана (Lopes et al., 2016). Недифференцированные равнины были описаны как в целом однородные (в масштабах от сотен до тысяч километров) радар-темные области, классифицированные как равнины, потому что они обширны, относительно невыразительны и, по видимому, имеют низкий рельеф.

Еще 3.3% поверхности Титана занимают лабиринтные ландшафты. Они расположены в основном в высоких широтах, занимают возвышенное положение по отношению к окружающим территориям, повсеместно сильно расчленены флювиальной эрозией, и в составе их поверхности также 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.

Таким образом, имеющиеся данные свидетельствуют о том, что скопления твердых углеводородов доминируют на территории дюнных полей, недифференцированных равнин и лабиринтных ландшафтов, занимающих в общей сложности 34.2% поверхности Титана.

ПОТОКОВЫЕ СТРУКТУРЫ, ОЗЕРА И МОРЯ

Предположения о возможном наличии на Титане жидких углеводородов возникли еще на основе данных АМС Вояджер-1 и -2 (1980 г.), свидетельствующих о близости поверхностных *T-P* условий Титана к тройной точке метана. Хотя оптические приборы АМС Вояджер не могли проникнуть сквозь толщу дымки Титана, инфракрасный спектрометр обнаружил углеводороды и нитрилы в стратосфере. Фотохимические модели (Lunine et al., 1983) предсказывали, что Титан покрыт океаном глубиной от одного до нескольких километров, состоящим в основном из этана (70% этана, 25% метана и 5% азота).

СА Гюйгенс совершил посадку вблизи экватора. Снимки, полученные при спуске, не обнаружили каких-либо значительных объемов жидкости, однако рельеф поверхности явно свидетельствовал о воздействии жидкости: топографические особенности напоминают береговую линию с речными протоками, вырезанными на низких холмах (То-

masko et al., 2005). Поверхность на месте посадки СА (рис. 3) представляет собой окатанную гальку размером 4–15 см в мелкозернистом влажном субстрате (Niemann et al., 2005; Lorenz et al., 2008a).

В районе приземления СА Гюйгенс, как и во многих других районах Титана, присутствует хорошо выраженная сеть каналов. Однако данные о 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 расценивается как “береговая линия” бывшего моря или озера, которое со временем высохло. Ширина каналов меняется от 17 до 250 м при длине до 15 км.

В целом флювиальные формы рельефа на Титане широко распространены и разнообразны (Langhans et al., 2012). Высокоразвитые и сложные флювиальные сети с длиной каналов до 1200 км и шириной до 10 км сосредоточены лишь в нескольких местах, тогда как отдельные долины разбросаны по всем широтам. Флювиальные долины часто встречаются в горных районах. Некоторые ландшафты, такие как экваториальные дюнные поля и недифференцированные равнины в средних широтах, напротив, почти полностью свободны от долин. Глобальная картина распространения долин указывает на разнообразие параметров, контролирующей флювиальную эрозию, в частности на климатические процессы, а также на типы поверхностных и подповерхностных пород. Недавняя флювиальная активность весьма вероятна в северном полярном регионе в отличие от более засушливых условий в более низких широтах и на южном полюсе Титана. Это соответствует сезонной климатической асимметрии между полушариями. Однако следы прежней флювиальной активности рассеяны по всем широтам Титана, что свидетельствует о прежних климатических условиях по меньшей мере с эпизодическими осадками.

М. Лангханс с соавторами (Langhans et al., 2012) выделяют 5 типов долин: дендритные долины, сухие долины, каналы просачивания, индивидуальные (удлиненные) долины и долины в горах.

Дендритные долины имеют иерархическое и древовидное расположение притоков, что свидетельствует об их формировании под воздействием временных потоков, вызванных атмосферными осадками. Иногда в пределах долин выделяются внутренние каналы, по которым перемещались потоки жидкости. Наиболее известные дендритные сети Титана расположены вблизи северного полюса Титана, в низких широтах, например в западной Ксанату, а также на месте посадки СА Гюйгенс. Западная Ксанату, а также северная полярная область обладают очень сложными, извилистыми и протя-

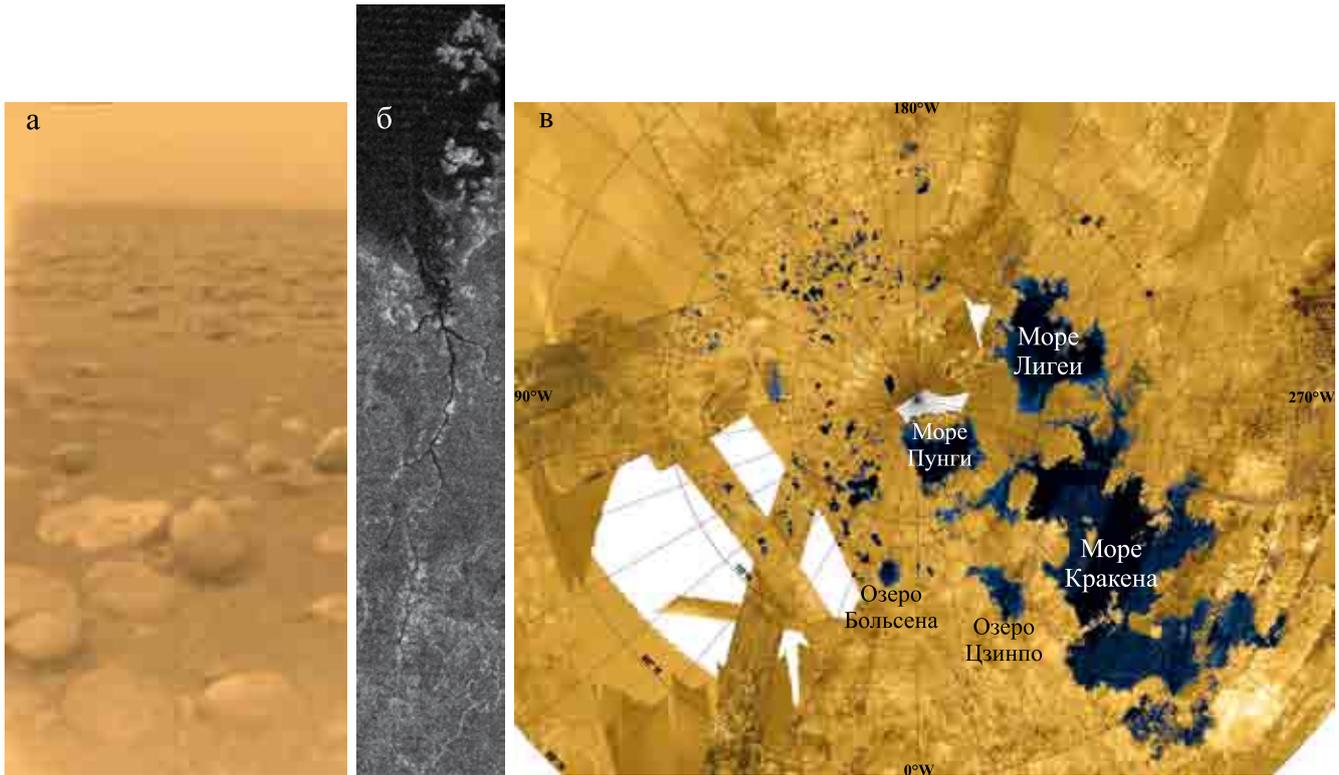


Рис. 3. Жидкостные (а, б – флювиальные, в – озерно-морские) формы рельефа на Титане.

а – поверхность Титана на месте посадки СА Гюйгенс 14 января 2005 г. (PIA07232⁴); б – река длиной более 400 км, впадающая в Море Лигей (PIA16197); в – северная полярная область Титана с морями и озерами (PIA17655).

Fig. 3. Liquid (a, б – fluvial, в – lake-sea) landforms on Titan.

а – the surface of Titan at the Huygens landing site on January 14, 2005 (PIA07232); б – the river more than 400 km long, flowing into Ligeia Mare (PIA16197); в – the Northern polar region of Titan with seas and lakes (PIA17655).

женными дендритными долинными сетями. Длина каналов Ксанаду достигает 450 км, ширина варьируется от 350 до ≈ 2500 м. Долины вблизи северного полюса имеют ширину от 350 м (предел разрешения снимков ОС Кассини) до 5 км в устье при длине долины до 250 км. Судя по радарным изображениям, долины, близкие к северному полюсу, в настоящее время заполнены жидкостью, тогда как лишённые жидкости долины в пределах дендритных систем западной Ксанаду покрыты материалом, возможно, в форме округлых камней или гальки.

Сухие долины напоминают земные сухие русла рек или марсианские каналы истечения. Некоторые сухие долины Титана выглядят как широкие и прямые потоки. Они обычно короче и шире, чем долины, интегрированные в дендритные сети, с длиной до 300 км и шириной до 8 км. Сухие долины встречаются на равнинах преимущественно в средних широтах. В отличие от дендритных флювиальных систем ландшафты, покрытые сухими долина-

ми, менее обширны и распределены только на небольшой части поверхности Титана. Некоторые каналы граничат с однородным и гладким рельефом, который по форме и текстуре напоминает поймы рек. Подобно земным вади сухие долины на Титане, вероятно, образовались в результате внезапных сильных стоков, сопровождавшихся длительными засухами.

Индивидуальные (удлиненные) долины расположены на недифференцированных равнинах, выглядят яркими на радарных изображениях и сильно контрастируют с их радарно-темным невыразительным окружением. Этот тип долин отличается от других типов долин своим прямым течением с небольшим количеством ответвлений. Извилистые участки и меандры встречаются редко, а изгибы канала имеют угловатую форму. Из-за неполного охвата радарного картографа долины этого типа плохо изучены, но встречаются они на всех широтах Титана, за исключением полюсов. Ширина до-

⁴ Здесь и далее нумерация по NASA Photojournal (<https://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

лин не превышает 3 км, тогда как их длина, достигающая 100 км, в некоторых случаях может быть занижена из-за фрагментарного картирования. Долины имеют почти постоянную ширину, что свидетельствует об устойчивом течении жидкости при их формировании. Однако радарно-яркий тон каналов свидетельствует об их сухости в моменты наблюдений. Простая форма и отсутствие типичных речных характеристик, таких как меандры, показывают, что эти долины были активны в течение более короткого периода времени, чем другие типы флювиальных долин на Титане.

Предполагается, что некоторые долины Титана – каналы просачивания – созданы в результате эрозии жидкостью, выходящей из недр. В отличие от обычных долин, образующихся под воздействием атмосферных осадков, они, как правило, короче и шире, глубоко изрезаны и имеют в истоке амфитеатровидное обрамление. Морфологические признаки просачивания подповерхностных жидкостей обнаружены на Титане только в двух местах. Это небольшая сеть в районе посадки СА Гюйгенс с длиной основного канала менее 15 км и шириной до 100 м. Другой вероятный ландшафт просачивания расположен около 143° з.д. и 50° с.ш. Криволинейные очертания каналов в этом месте напоминают некоторые глубоко врезанные каньоны на Земле и имеют значительные продольные и поперечные размеры (ширина до 5 км, длина системы составляет около 200 км), но каналы кажутся несвязанными.

Долины в горах Титана свидетельствуют об активной переработке поверхности гор флювиальной эрозией. Большинство из них кажутся неактивными, зарождающимися и короткими, длиной в несколько десятков километров, шириной менее 3 км и внезапным исчезновением на выходе за пределы гор. Лишь несколько каналов выходят на соседние равнины, где они становятся более узкими и исчезают.

С октября 2004 г. по декабрь 2008 г. с помощью VIMS ОС Кассини было отснято около 17% поверхности Титана с захватом места посадки СА Гюйгенс. Здесь было обнаружено пять темных ландшафтов, являющихся предположительно небольшими озерами или болотами. Одно из таких темных пятен имеет овальную форму размером примерно 60 тыс. км². Оно было обнаружено в 2004 г. в сухой сезон за несколько лет до появления тропических облаков. Поскольку метановые озера неустойчивы на тропической поверхности Титана, их наличие, по мнению исследователей (Griffith et al., 2012), указывает на подземные источники жидкого метана.

Радарное зондирование поверхности Титана с борта ОС Кассини 22 июля 2006 г. (пролет T₁₆) выявило в северном полушарии на широтах выше 70° более 75 пятен, сильно поглощавших радиоволны, имевших круглые или неправильные очертания и

морфологическое сходство с озерами (в числе последних – наличие связанных каналов и расположение в топографических впадинах). Эта совокупность данных позволила подтвердить наличие на Титане углеводородных озер (Stofan et al., 2007). Последующие наблюдения выявили 580 таких пятен, разбросанных по полярным регионам. Наиболее крупные, заполненные жидкостями депрессии, назвали морями – Море Кракена (Kraken Mare), Море Лигеи (Ligeia Mare) и Море Пунги (Punga Mare).

Полярный ландшафт Титана состоит из гладких волнистых равнин, рассеченных нагорий и очень сильно рассеченных лабиринтных ландшафтов (Hayes et al., 2014). На волнистых равнинах располагаются депрессии, находящиеся в различных состояниях увлажнения (от сухого до полностью заполненного жидкостью). Северные моря Титана и крупные озера, такие как Цзинпо (Jingpo Lacus) и Больсена (Bolsena Lacus), являются примерами широких депрессий, заполненных жидкостью (см. рис. 3). Крупные озера и моря Титана обладают дендритными контурами и связаны с речными каналами. Северные моря Титана имеют береговые линии, которые включают в себя 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) (рис. 4а), 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 км² (как заполненные, так и пустые) имеют края, приподнятые на высоту порядка сотни метров (Hayes, 2016; Hayes et al., 2017) (см. рис. 4). 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 больших депрессий имеет почти круглую форму диаметром от 10 до 30 км, с заглубленным дном, часто на разных уровнях (рис. 5, А). 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 (рис. 5, В). Присутствуют также депрессии сложной формы, некоторые с кратероподобными краями (рис. 5, С). Исследователи (Wood, 2015) считают, что эти неправильные депрессионные формы рельефа образовались из множества меньших оригинальных депрессий.

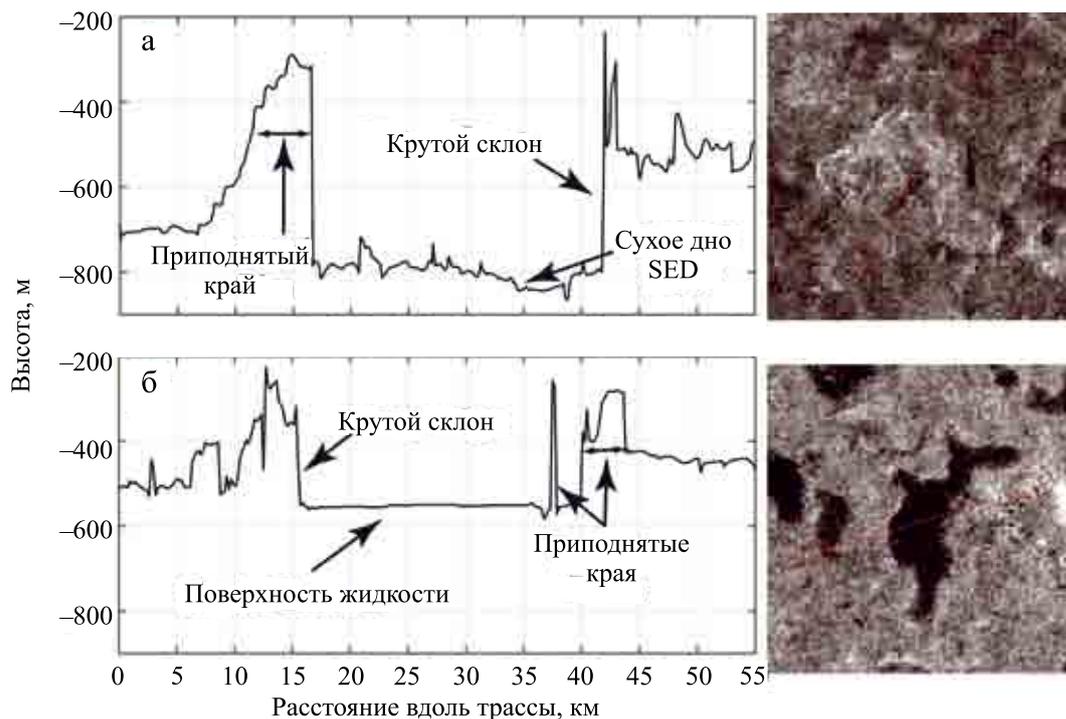


Рис. 4. Примеры высотных профилей пустых (а) и заполненных (б) SED, по (Hayes et al., 2017).

Высота профилей приведена от нулевого уровня геоида Титана (для сравнения: относительный уровень северных морей Титана -927 м). Наблюдения: а – май 2007 г. (Т30), б – апрель 2017 г. (Т126). Крутосклонное остроконечное обрамление присутствует как у сухих, так и у заполненных жидкостью депрессий.

Fig. 4. Examples of height profiles of unfilled (a) and filled (b) SED, by (Hayes et al., 2017).

The height of the profiles is given from the zero level of Titan's geoid (for comparison, the relative level of the Northern seas of Titan is -927 m). Observations: a – May 2007 (T30), b – April 2017 (T126). Steeply sloping sharp-pointed framing is present in both the empty and liquid-filled depressions.

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 составляют 80% от всех заполненных жидкостью поверхностей (Море Кракена – 500 тыс. км², Море Лигей – 130 тыс. км², Море Пунги – 61 тыс. км² (Hayes, 2016)). Вблизи южного полюса расположены четыре широкие депрессии, подобные северным морям, но преимущественно сухие. Эти депрессии называются пустыми морями. 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. Профиль глу-

бины Моря Лигей получен во время пролета 23 мая 2013 г. (Т91) (Mastrogiuseppe et al., 2014). Наибольшая глубина моря по трассе пролета составила около 160 м. Низкое затухание радиосигнала в море свидетельствует о прозрачности жидкости и ее почти чистом метано-этановом составе, возможно, с примесью азота (5–15%) и содержанием поглощающих взвешенных частиц не более 0.1% от объема жидкости. Аналогичным образом для Озера Онтарио определена глубина 90 м. По предварительным оценкам (Hayes, 2016), состав Моря Лигей соответствует смеси 71% CH₄, 11% C₂H₆ и 18% N₂, Озера Онтарио – 47% CH₄, 40% C₂H₆ и 13% N₂.

Альтиметрические 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

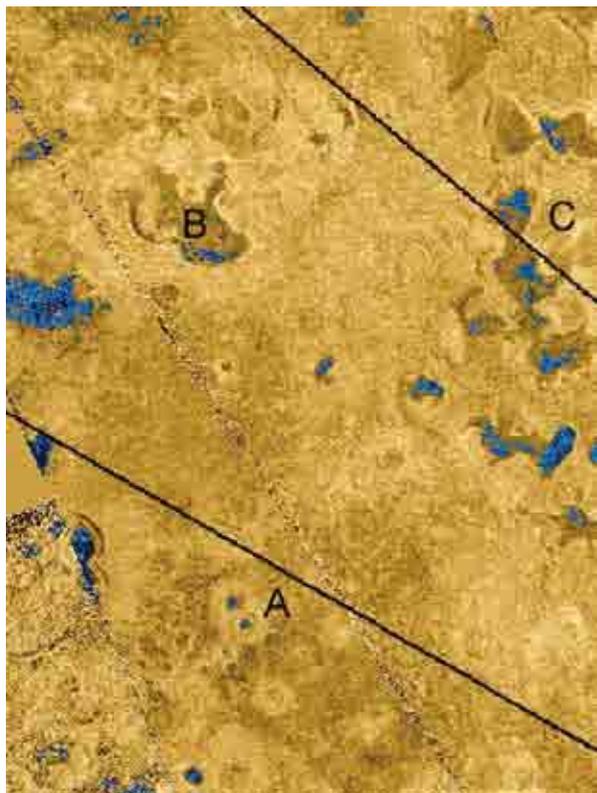


Рис. 5. Различные типы четко оконтуренных депрессий (75° с.ш., 125° з.д.), по (Wood, 2015).

A – две структуры типа вулканических кратеров, каждый диаметром от 8 до 10 км; B – сложная депрессия с частично закругленными (внизу) краями; C – множественные депрессии с изогнутыми элементами и без них, которые могут быть остатками взаимосвязанных кратеров.

Fig. 5. Various types of sharp-edged depressions (75° S, 125° W), by (Wood, 2015).

A – two volcanic crater-like features each 8 to 10 km in diameter; B – complex depression with partially rounded (left) edges; C – multiple depressions with and without curved elements that could be remnant interlocking craters.

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 наличии или отсутствии связи между региональными топографическими бассейнами отсутствуют.

Кроме трех северных морей ($7.0 \cdot 10^5$ км²) ОС Кассини обнаружила (Hayes et al., 2011; Hayes, 2016) 577 заполненных жидкостью депрессий общей площадью $2.13 \cdot 10^5$ км² в северной и южной полярных областях Титана. Еще 295 предполагае-

мых пустых озер (сухих SED) были идентифицированы на основе их морфологии. Они занимают площадь $1.36 \cdot 10^5$ км². Общие площади морских областей на обоих полюсах сопоставимы, на юге они ($7.6 \cdot 10^5$ км²) немного больше, чем на севере. Однако есть основания считать, что площадь поверхности депрессий, заполненных жидкими углеводородами, существенно недооценена. Для сравнения (Hayes, 2016): на Земле по разным оценкам насчитывается от 49 до 304 млн озер и прудов, покрывающих примерно $4 \cdot 10^6$ км² площади суши. Однако лишь 5% их общей площади занимают озера, превышающие порог обнаружения для аппаратуры ОС Кассини в 1 км².

Все известные заполненные жидкостью депрессии занимают 1.1% общей поверхности Титана. Подавляющее большинство заполненных озер существует в северном полушарии, занимая 12% площади между 55° и 90° с.ш. (против 0.3% площади между 55° и 90° ю.ш.) (Hayes, 2016). Предполагается, что эта дихотомия вытекает из текущей орбитальной конфигурации Сатурна, в которой южное летнее солнцестояние почти совпадает с перигелием и приводит к пиковому солнечному потоку на 25% выше, чем в северное лето (Aharonson et al., 2009). В течение многих сезонных циклов эта асимметрия потока может в итоге привести к транспортировке метана и этана с юга на север. По мере изменения параметров орбиты Сатурна поток летучих на север замедлится и в итоге обратится. Подобное перераспределение может охватывать период от десятков до сотен тысячелетий (Schneider et al., 2012; Lora et al., 2014; Hayes, 2016). Данная цикличность аналогична земным циклам Миланковича, определяющим долговременную изменчивость инсоляции и приводящим к чередующимся оледенениям Северного и Южного полюсов Земли. Отмечены и обычные сезонные изменения в распределении жидких углеводородов на поверхности Титана: в период с июня 2005 г. по июль 2009 г. во время южного лета зафиксировано уменьшение глубины Озера Онтарио на 4 ± 1.3 м, а часть небольших озер высохла (Hayes et al., 2011).

Сухие или заполненные жидкостью моря и озера, а также речные каналы свидетельствуют о наличии активного “гидрологического” цикла на Титане, аналогичного циклу Земли, с обменов 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 “гидрологиче-

ский” 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). Дополнительный вес этим предположениям придают имеющиеся свидетельства наличия на Титане дегазационных процессов.

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, согласно фотохимическим моделям, должен был распасться в течение ≈ 10 – 100 млн лет (Yung et al., 1984; и др.). Однако он не только присутствует в атмосфере, но и имеет устойчивое увеличение концентрации к поверхности, что свидетельствует о его поступлении из недр (Niemann et al., 2005), т.е. о протекающих дегазационных процессах. Помимо этого, в тропосфере ниже 18 км был обнаружен радиогенный ^{40}Ar , представляющий собой продукт распада ^{40}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. Следовательно, это свидетельствует о поступлении летучих элементов и соединений из глубины (Niemann et al., 2005), т.е. о дегазационных процессах.

Криовулканизм – одно из проявлений современных дегазационных процессов на объектах Солнечной системы (Мальшева, 2004). Наблюдения ОС Кассини (Iess et al., 2012) показывают наличие приливных деформаций коры Титана, которые можно полностью или частично объяснить существованием под его 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 Па-

тера (Sotra Patera) и потоки в Области Хотей (Hotei Regio). Топография в сочетании с радарными изображениями и данными спектрометра убедительно свидетельствуют о том, что в регионе Сотра Патера имеется много криовулканических объектов: две вулканические горы – Дум (диаметр ≈ 70 км, высота 1.45 км) и Эребор (Erebor, 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, другие неправильные депрессии, интерпретируемые как структуры обрушения между двумя горами, и ряд потоков, окружающих 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).

Область полностью лишена речных каналов, что делает маловероятным возникновение этих структур за счет речных потоков. Дюнное поле, которое лежит между Дум и Эребор, указывает на то, что это сухой регион. Неправильная форма впадин делает маловероятным их ударное метеоритное происхождение; также нет никаких свидетельств наличия отложений ударного выброса, окружающего углубления. Все это, по мнению исследователей (Lopes et al., 2013), подтверждает криовулканический генезис перечисленных выше форм рельефа. Подобные 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 в случае неоднозначного генезиса тех или иных объектов на Титане предпочтение отдается не вулканическим/криовулканическим процессам. За все время наблюдений не только не смогли обнаружить признаки вулканической активности, но и ни одна горячая точка не была однозначно идентифицирована. 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, вследствие этого сложно обнаружить свежие потоки криолавы, 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 вулканиче-

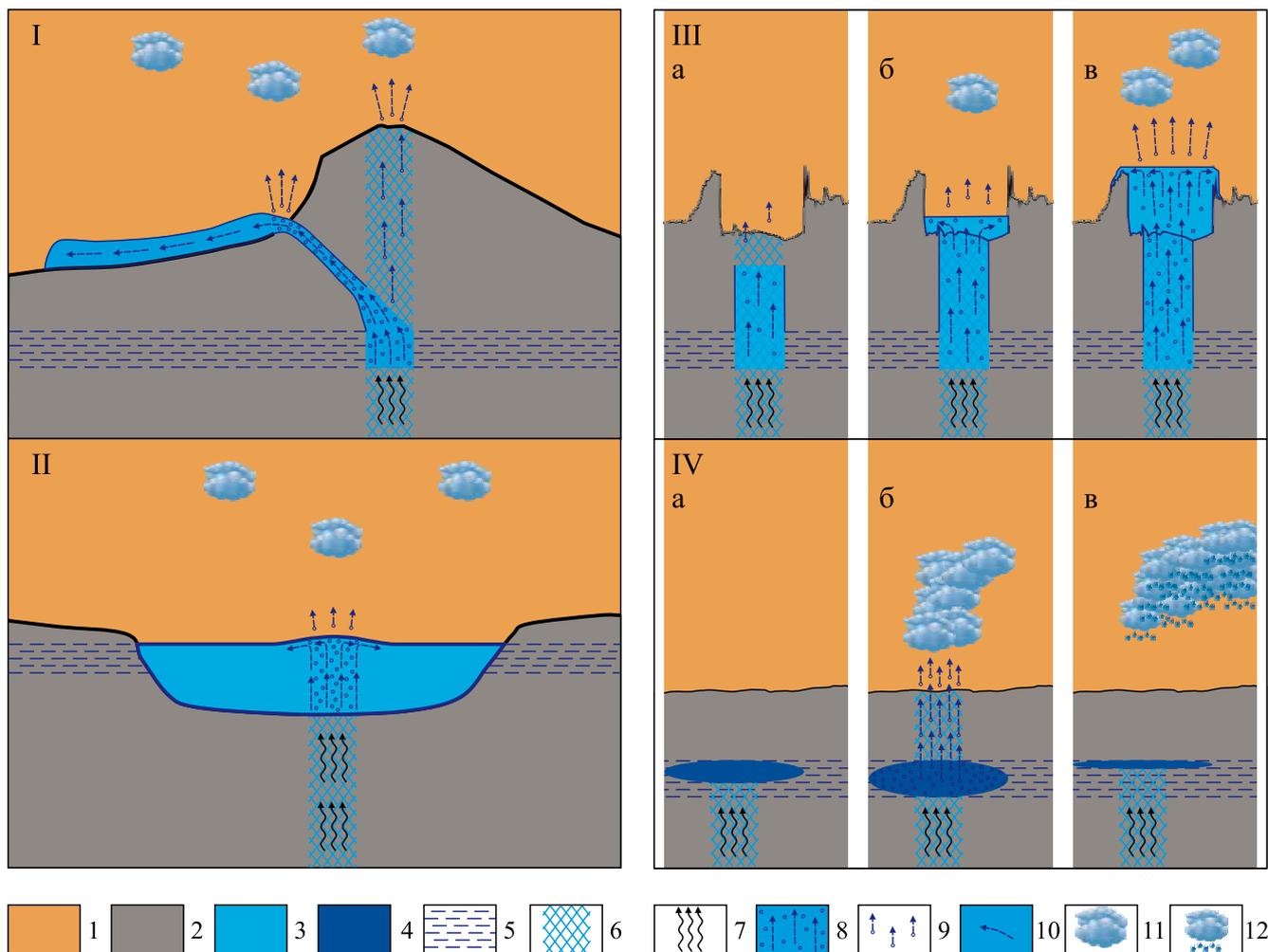


Рис. 6. Особенности дегазационных процессов в условиях Титана.

I – криовулканизм; II – газлифтинговая дегазация в крупных бассейнах жидкости (дегазация “волшебных островов”); III – газлифтинговая дегазация сквозь малые бассейны жидкости (SED-дегазация): а – низкая активность (сухие депрессии), б – умеренная активность, в – максимальная активность (изливы и намораживание оконтуривающей кромки); IV – дегазация эпизодических лимнологических выбросов: а – накопление потенциально летучих соединений 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.

Fig. 6. Features of degassing processes in the conditions of Titan.

I – cryovolcanism; II – gas-lifting degassing in large pools of liquid (“magic islands” degassing); III – gas-lifting degassing through small pools of liquid (SED-degassing): a – low activity (dry depressions), б – moderate activity, в – maximal activity (overflows and additional freezing of rims); IV – degassing by episodic limnological eruptions: а – accumulation of potentially volatile components in a liquefied state under subsurface conditions, б – eruption (bulk boiling of volatile components in a subsurface reservoir under the influence of endogenous heat and the formation of decompression fractures), в – intensive precipitation, decompression fractures healing and renewal of volatile compounds accumulation in a liquefied state.

1 – atmosphere, 2 – crustal ice, 3 – liquid reservoirs, 4 – liquefied potentially volatile compounds, 5 – subsurface liquid horizon, 6 – permeability zones, 7 – endogenous fluid flows, 8 – gas-lifting flows, 9 – gas flows, 10 – liquid flows, 11 – condensation, 12 – precipitation.

ских/криовулканических дегазационных процессов и их возможный спектр применительно к Титану (рис. 6). В качестве подобных процессов иссле-

дователи рассматривают интенсивное поступление из недр сквозь твердую среду жидкого или газообразного вещества с достаточно высоким контра-

стом 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. Тазиевым (1980) спокойного течения лавового потока влк. 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) инъецируемого 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 (высокобарические 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 эквипотенциальных жидкостных близповерхностных горизонтов с субвертикальными криовулканическими каналами (выходящими на поверхность) обеспечивает идеальные условия для перемещения летучих соединений, как поступающих из глубины, так и возникающих на месте вследствие повышения температуры вмещающей среды.

Специфика криовулканических дегазационных процессов на Титане в первом приближении сопоставима с дегазационными процессами в кратерных и/или термальных озерах Земли. В качестве наиболее известного примера можно привести оз. Шампейн-Пул (Champagne Pool, Новая Зеландия), получившее свое название благодаря обильному выделению углекислого газа. Здесь уместно упомянуть наблюдения на Титане “волшебных островов”, эпизодически появляющихся неоднородностей в двух областях на поверхности Моря Лигеи (Hofgartner et al., 2016). Обе области регистрировалась ОС Кассини с высоким разрешением 6 раз (пролеты T25, T29, T64, T92, T104 и T108). В 4 случаях какие бы то ни было неоднородности на поверхности Моря Лигеи отсутствовали, тогда

как в 2 случаях в одной из областей был обнаружен “волшебный остров”, имевший общую площадь 40 км² при пролете T92 (10.07.2013 г.) и 145 км² при пролете T104 (21.08.2014 г.). При пролете T104 был обнаружен еще один “волшебный остров”, находившийся на расстоянии 270 км от первого и имевший площадь 322 км². В качестве одной из возможных 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. 6, II).

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 излиям избыточной жидкости за пределы кратера/бассейна.

Эта особенность протекания дегазационных процессов сквозь жидкостную среду соответствует данным об уровне жидкости и морфологии озер Титана, расположенных в небольших депрессиях (SED) (см. рис. 6, III). Именно для этих озер установлен факт превышения их уровня 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. В свою очередь, приподнятое, узкое и крутосклонное обрамление SED генетически обусловлено эпизодическим газлифтинговым повышением уровня жидкости в депрессиях, их переполнением и излиями вмещающей жидкости за пределы приподнятого обрамления. При этом на гребне обрамления происходит намораживание тех компонентов жидкости, для которых температура плавления превышает поверхностную температуру, а *T-P* условия насыщенных паров исключают или затрудняют сублимацию. Все остальное вещество изливов испаряется и/или сублимирует. В конечном счете именно вымораживание наиболее тугоплавких компонентов из изливающегося вещества обуславливает наращивание и крутосклонность приподнятого обрамления SED. Между тем округлая форма заглубленного дна SED, часто в виде системы вло-

женных воронок, находящихся на разных уровнях, генетически 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 $\approx 1 \text{ км}^3 \text{ CO}_2$ 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. По утверждениям выживших очевидцев, в воздухе присутствовал сильный запах тухлых яиц, свидетельствующий о наличии в газовой смеси сероводорода.

Подобные ситуации представляются весьма вероятными на Титане (см. рис. 6, IV). Роль действующего агента в подобном бурном газоотделении может играть метан, накапливаемый в подповерхностных условиях в жидком состоянии и провоцируемый 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 существующим оценкам температурный градиент в недрах Титана составляет $1.3\text{--}1.9^\circ\text{C}/\text{км}$ (Дунаева и др., 2016)). 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 просачивать-

ся 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 со сказанным 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. наземными телескопами показали небольшое количество тропосферной облачной активности, охватывающей 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.

Подобный всплеск облачной активности в тропосфере Титана зарегистрирован 13 апреля 2008 г. в области с центром с координатами 29° ю.ш., 247° з.д. (рис. 7) (Schaller et al., 2009). Последующие наблюдения показали смещение облачной системы относительно места образования в восточном, а затем в юго-восточном направлении со скоростью примерно 3 м/с до тех пор, пока 17 апреля наблюдаемая область не скрылась за видимым лимбом Титана. Облака также появились 16–17 и 20–23 апреля 2008 г. вблизи южного полюса ($81\text{--}60^\circ$ ю.ш.) с яркостью, не наблюдавшейся в предыдущие три года. Это свидетельствовало о распространении облачной волны с меридиональной скоростью 3–8 м/с. Наблюдения от 28 апреля и 1 июня 2008 г. выявили слабое облако, сохраняющееся в том же месте, что и самая северо-западная протяженность начального большого облака от 14 апреля 2008 г. (15° ю.ш., 250° з.д.; см. рис. 7, зеленый квадрат), это указывает на возможное место зарождения облака, т.е. на место локализации, по нашему мнению, первичного лимнологического выброса больших объемов газообразного метана.

ОС Кассини 27 сентября 2010 г. зарегистрировала интенсивное формирование облачности в районе 10° ю.ш., 320° з.д. (Turtle et al., 2011b). Спустя месяц (29 октября) к востоку от этого района (в направлении смещения штормовых облаков) обнаружены обширные изменения (потемнение) поверхности на участке $\approx 2000 \times 130$ 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 ре-

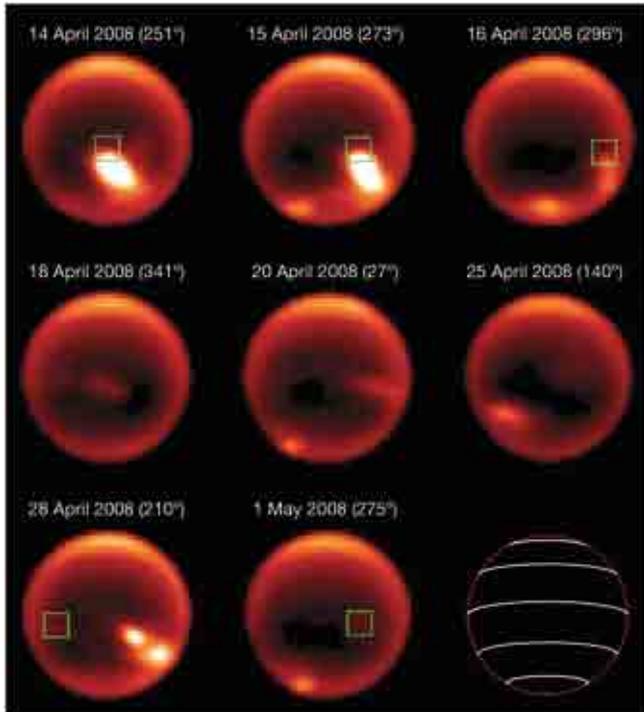


Рис. 7. Тропосферная облачная активность Титана в апреле 2008 г., по (Schaller et al., 2009).

Зеленый квадрат показывает начальную локализацию облачной вспышки.

Fig. 7. Tropospheric cloud activity of Titan in April 2008, according to (Schaller et al., 2009).

The green square indicates the initial location of the cloud flare.

зультат обильных осадков метана (метановой бури), что в течение короткого периода времени может повлиять на огромную территорию в засушливом районе, покрытом преимущественно дюнами. Этим объясняется быстрое появление (и исчезновение) изменений, а также их обширный и неоднородный характер. Однако причина внезапного появления над засушливой областью Титана гигантских количеств избыточного атмосферного метана остается за пределами внимания исследователей (Turtle et al., 2011b).

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, но исследователи (Turtle et al., 2011a) вынуждены признать, что спорадическое появление облаков в $15 \pm 5^\circ$ 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 – более 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), каких бы то ни было проявлений вулканизма или кривовулканизма в областях зарождения метановых бурь не обнаружено. Тем не менее все имеющиеся вопросы и сложности снимаются, если принять во внимание возможность лимнологических выбросов газообразного метана из подповерхностных источников его накопления в жидком состоянии. И сам факт последующей конденсации выброшенного газа в низкотемпературных условиях атмосферы является наглядным свидетельством этих выбросов.

Если сопоставить приуроченность обильных осадков к спорадическим бурям, обусловленным лимнологическими дегазационными выбросами метана, 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.

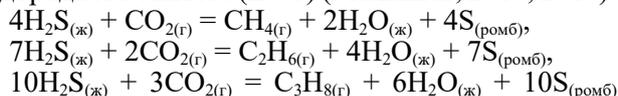
УГЛЕВОДОРОДЫ ТИТАНА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ АБИОГЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО СИНТЕЗА

В настоящее время основной причиной углеводородного многообразия на поверхности Титана считаются фотохимические реакции в его атмосфере. Исходным материалом для них служит метан, в том числе поступающий в атмосферу Титана из его недр. В свою очередь, глубинный метан, вероятно, мог быть составной частью каменно-ледяных планетезималей (Кусков и др., 2009; Дорофеева, 2016), аккрецированных Титаном, а также мог возникать путем серпентинизации (Atreya et al., 2006). Тем не менее существенная часть углеводородного многообразия Титана может формироваться, по нашему мнению, в его недрах в гетерогенных газконденсатных реакциях, протекающих с участием других возможных составляющих протопланетного диска – сероводорода и диоксида углерода.

В частности, образование сероводородного конденсата начинается при температуре 100.4°C . В момент достижения критической температуры содер-

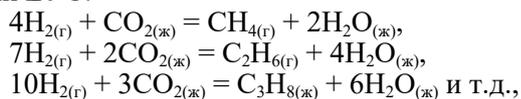
жание H_2S в составе газовых смесей скачкообразно ограничивается его предельным парциальным давлением и происходит массовый сброс всего избытка H_2S в конденсат.

При фильтрации газообразного CO_2 через конденсат H_2S протекают реакции естественного углеводородного синтеза (ЕУС) (Малышев, 2015, 2017):

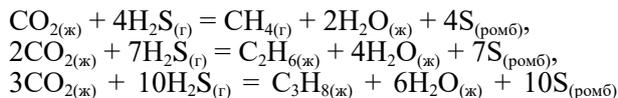


и т.д.

В свою очередь, образование конденсата CO_2 начинается при его критической температуре $31^\circ C$. Достижение критической температуры приводит к скачкообразному ограничению парциального давления CO_2 предельными значениями, что обуславливает массовый сброс избыточного CO_2 в конденсат, а в остаточной газовой смеси начинают доминировать H_2 , остаточный H_2S и летучие УВС, образовавшиеся в сероводородной зоне ЕУС. При фильтрации остаточной газовой смеси через конденсат диоксида углерода протекают гетерогенные реакции ЕУС:



а также



и т.д.

На момент разработки принципиальной схемы ЕУС для Титана (Малышев, Малышева, 2009в, рис. 1д) температурный профиль его недр был неизвестен. Выполненные оценки позволили сделать вывод о том, что зоны ЕУС в условиях Титана в случае высокой активности недр (на уровне активности недр Земли) располагаются на глубинах от 7 до 9 км, тогда как в случае предельно низкой активности (уровень активности недр Марса) – на глубинах от 105 до 140 км. Появившиеся в последнее время данные о возможных значениях температурного градиента в недрах Титана порядка $1.3\text{--}1.9^\circ C/km$ (Дунаева и др., 2016) соответствуют, скорее, случаю низкой активности и расположению зон ЕУС на глубинах от 105 до 140 км. На этой глубине в Титане, вероятно, расположен внутренний океан (Sohl et al., 2014; Дунаева и др., 2016). В работах (Малышев, 2015, 2017) водные горизонты рассматривались как фактор, обуславливающий быстрое охлаждение эндогенного флюидного потока с интенсификацией образования конденсатов и протеканием гетерогенных реакций ЕУС. В этом же контексте рассматривался и выход флюидных потоков в придонные условия земных океанов. Вероятный глубинный океан Титана требует более детальной проработки схемы ЕУС для жидкостной среды, что предполагается выполнить в следующей работе.

ВЫВОДЫ

Наличие гигантских запасов абиогенных углеводородов на Титане представляется чрезвычайно важным для концепций генезиса отложений углеводородного сырья на Земле, поскольку любая концепция нефтегенеза, претендующая на непротиворечивое объяснение всей совокупности имеющихся фактов, должна учитывать возможность абиогенного формирования крупных скоплений углеводородов. Для формирования углеводородного многообразия в атмосфере и на поверхности Титана ключевое значение имеет поступление эндогенного метана, постоянно расходующегося в атмосферных фотохимических реакциях. Дегазационные процессы, восполняющие потери атмосферного метана, имеют специфику, обусловленную их протеканием через жидкостную среду – глобальный (или несколько региональных) горизонт жидких углеводородов, частично обнажающийся на поверхности в виде озер и морей Титана. Поэтому классические криовулканические формы рельефа редки и за все время наблюдений не была обнаружена ни одна “горячая точка”, свидетельствующая о современной криовулканической активности. В то же время имеющаяся совокупность наблюдаемых 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 становится внезапное облакообразование с последующим развитием метановых бурь и выпадением значительного количества осадков. Таким образом, дегазационные процессы на Титане являются важнейшим рельефообразующим фактором. Наличие на Титане активных дегазационных процессов в сочетании с появившимися моделями внутреннего строения Титана и данными о температурном градиенте в его недрах позволяют уточнить и детализировать ранее предложенную схему первичного естественного углеводородного синтеза в глубинах Титана.

Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензенту за доброжелательное отношение к работе, ценные советы и заме-

чания, способствующие ее улучшению и дальнейшему развитию исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дорофеева В.А. (2016) Генезис летучих регулярных спутников Сатурна. Происхождение атмосферы Титана. *Геохимия*, (1), 11-31.
- Дунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.Л. (2016) Физико-химические модели внутреннего строения частично дифференцированного Титана. *Геохимия*, (1), 32-55.
- Иванов К.С. (2018) О возможной максимальной глубине нахождения месторождений нефти. *Известия УГГУ*, 4(52), 41-49. doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-41-49
- Кусков О.Л., Дорофеева В.А., Кронрод В.А., Макалкин А.Б. (2009) Системы Юпитера и Сатурна. Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. М.: Изд. ЛКИ, 576 с.
- Мальшеев А.И. (2004) Значение фазовых переходов "газ-жидкость" в эндогенном образовании углеводородного сырья. *Докл. АН*, 399(3), 384-387.
- Мальшеев А.И. (2005) Значение фазовых переходов "газ-жидкость" в эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов. *Геохимия*, (6), 673-680.
- Мальшеев А.И. (2015) Газовый фактор в эндогенных процессах. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 324 с.
- Мальшеев А.И. (2017) Роль охлаждающих горизонтов в генезисе углеводородных месторождений. *Докл. АН*, 476(4), 445-447. DOI: 10.7868/S0869565217280192
- Мальшеев А.И., Мальшиева Л.К. (2009а) Планетарные дегазационные процессы и условия возникновения предбиологических состояний на планетах Солнечной системы: I. Земля. *Литосфера*, (2), 67-77.
- Мальшеев А.И., Мальшиева Л.К. (2009б) Планетарные дегазационные процессы и условия возникновения предбиологических состояний на планетах Солнечной системы: II. Планеты земного типа и планеты-гиганты. *Литосфера*, (3), 64-74.
- Мальшеев А.И., Мальшиева Л.К. (2009в) Планетарные дегазационные процессы и условия возникновения предбиологических состояний на планетах Солнечной системы: III. Малые небесные тела, метеориты и открытый космос. *Литосфера*, (4), 93-103.
- Мальшиева Л.К. (2004) Внеземной вулканизм (информационный обзор). *Вулканология и сейсмология*, (6), 65-77.
- Тазиев Г. (1980) Запах серы. М.: Мысль, 222 с.
- Aharonson O., Hayes A.G., Lunine J.I., Lorenz R.D., Allison M.D., Elachi C. (2009) An asymmetric distribution of lakes on Titan as a possible consequence of orbital forcing. *Nat. Geosci.*, 2(12), 85-854. doi:10.1038/ngeo698
- Atreya S.K., Adams E.Y., Niemann H.B., Demick-Montelara J.E., Owen T.C., Fulchignoni M., Ferri F., Wilson E.H. (2006) Titan's methane cycle. *Planet. Space Sci.*, 54, 1177-1187. doi:10.1016/j.pss.2006.05.028
- Barnes J.W., Brown R.H., Soderblom L., Sotin C., Le Mouélic S., Rodriguez S., Jaumann R., Beyer R.A., Buratti B.J., Pitman K., Baines K.H., Clark R., Nicholson P. (2008) Spectroscopy, morphometry, and photogrammetry of Titan's dunefields from Cassini/VIMS. *Icarus*, 195(1), 400-414. doi:10.1016/j.icarus.2007.12.006
- Birch S.P.D., Hayes A.G., Dietrich W.E., Howard A.D., Bristow C.S., Malaska M.J., Moore J.M., Mastrogiuseppe M., Hofgartner J.D., Williams D.A., White O.L., Soderblom J.M., Barnes J.W., Turtle E.P., Lunine J.I., Wood C.A., Neish C.D., Kirk R.L., Stofan E.R., Lorenz R.D., Lopes R.M.C. (2017) Geomorphologic mapping of Titan's polar terrains: Constraining Surface Processes and Landscape Evolution. *Icarus*, 282, 214-236. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.08.003
- Brossier J.F., Rodriguez S., Cornet T., Lucas A., Radebaugh J., Maltagliati L., Le Mouélic S., Solomonidou A., Coustenis A., Hirtzig M., Jaumann R., Stephan K., Sotin C. (2018) Geological Evolution of Titan's Equatorial Regions: Possible Nature and Origin of the Dune Material. *J. Geophys. Res. (Planets)*, 123, 1089-1112. doi: 10.1029/2017JE005399
- Choukroun M., Sotin C. (2012) Is Titan's shape caused by its meteorology and carbon cycle? *Geophys. Res. Lett.*, 39, L04201. doi:10.1029/2011GL050747
- Clark R.N., Curchin J.M., Barnes J.W., Jaumann R., Soderblom L., Cruikshank D.P., Brown R.H., Rodriguez S., Lunine J., Stephan K., Hoefen T.M., Mouélic S., Sotin C., Baines K.H., Buratti B.J., Nicholson P.D. (2010) Detection and mapping of hydrocarbon deposits on Titan. *J. Geophys. Res.*, 115, E10005. doi:10.1029/2009JE003369
- Cornet T., Cordier D., Bahers T.L., Bourgeois O., Fleurant C., Mouélic S.L., Altobelli N. (2015) Dissolution on Titan and on Earth: Toward the age of Titan's karstic landscapes. *J. Geophys. Res. (Planets)*, 120, 1044-1074. doi: 10.1002/2014JE004738
- Cotel A.J. (1999) A trigger mechanism for the Lake Nyos disaster. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 88, 343-347.
- Cottini V., Nixon C.A., Jennings D.E., de Kok R., Teanby N.A., Irwin P.G.J., Flasar F.M. (2012) Spatial and temporal variations in Titan's surface temperatures from Cassini CIRS observations. *Planet. Space Sci.*, 60, 62-71. doi: 10.1016/j.pss.2011.03.015
- de Kok R.J., Teanby N.A., Maltagliati L., Irwin P.G.J., Vianier S. (2014) HCN ice in Titan's high-altitude southern polar cloud. *Nature*, 514, 65-67. doi: 10.1038/nature13789
- Faulk S.P., Lora J.M., Mitchell J.L., Milly P.C.D. (2019) Titan's climate patterns and surface methane distribution due to the coupling of land hydrology and atmosphere. *Nat. Astron.*, doi:10.1038/s41550-019-0963-0
- Glein C.R. (2015) Noble gases, nitrogen, and methane from the deep interior to the atmosphere of Titan. *Icarus*, 282, 570-586. doi:10.1016/j.icarus.2015.01.001
- Griffith C.A., Lora J.M., Turner J., Penteado P. F., Brown R.H., Tomasko M.G., Doose L., See C. (2012) Possible tropical lakes on Titan from observations of dark terrain. *Nature*, 486(7402), 237-239. doi:10.1038/nature11165
- Griffith C.A., Owen T., Geballe T.R., Rayner J., Rannou P. (2003) Evidence for the Exposure of Water Ice on Titan's Surface. *Science*, 300, 628-630. doi:10.1126/science.1081897
- Hayes A.G. (2016) The Lakes and Seas of Titan. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 44(1), 57-83. doi:10.1146/annurev-earth-060115-012247
- Hayes A.G., Aharonson O., Callahan P., Elachi C., Gim Y., Kirk R., Lewis K., Lopes R., Lorenz R., Lunine J.,

- Mitchell K., Mitri G., Stofan E., Wall S. (2008) Hydrocarbon lakes on Titan: Distribution and interaction with a porous regolith. *Geophys. Res. Lett.*, **35**(9). doi:10.1029/2008gl033409
- Hayes A.G., Aharonson O., Lunine J.I., Kirk R.L., Zebker H.A., Wye L.C., Lorenz R.D., Turtle E.P., Paillou P., Mitri G., Wall S.D., Stofan E.R., Mitchell K.L., Elachi C., Cassini RADAR Team. (2011) Transient surface liquid in Titan's polar regions from Cassini. *Icarus*, **211**(1), 655-671. doi:10.1016/j.icarus.2010.08.017
- Hayes A.G., Birch S.P.D., Dietrich W.E., Howard A.D., Kirk R.L., Poggiali V., Mastrogiuseppe M., Michaelides R.J., Corlies P.M., Moore J.M., Malaska M.J., Mitchell K.L., Lorenz R.D., Wood C.A. (2017) Topographic constraints on the evolution and connectivity of Titan's lacustrine basins. *Geophys. Res. Lett.*, **4**(23). DOI: 10.1002/2017GL075468
- Hayes A.G., Michaelides R.J., Turtle E.P., Barnes J.W., Soderblom J.M., Mastrogiuseppe M., Lorenz R.D., Kirk R.L., Lunine J.I. (2014) The distribution and volume of Titan's hydrocarbon lakes and seas. *Lunar Planet. Sci.*, **45**, Abstract 2341.
- Hofgartner J.D., Hayes A.G., Lunine J.I., Zebker H., Lorenz R.D., Malaska M.J., Mastrogiuseppe M., Notarnicola C., Soderblom J.M. (2016) Titan's "Magic Islands": Transient Features in a Hydrocarbon Sea. *Icarus*, **271**, 338-349. doi: 10.1016/j.icarus.2016.02.022
- Hörst S.M. (2017) Titan's atmosphere and climate. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **122**(3), 432-482. doi:10.1002/2016je005240
- Iess L., Jacobson R.A., Ducci M., Stevenson D.J., Lunine J.I., Armstrong J.W., Asmar S.W., Racioppa P., Rappaport N.J., Tortora P. (2012) The Tides of Titan. *Science*, **337**(6093), 457-459. doi:10.1126/science.1219631
- Janssen M.A., Le Gall A., Lopes R.M., Lorenz R.D., Malaska M.J., Hayes A.G., Neish C.D., Solomonidou A., Mitchell K.L., Radebaugh J., Keihm S.J., Choukroun M., Leyrat C., Encrenaz P.J., Mastrogiuseppe M. (2016) 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*, **270**, 443-459.
- Langhans M.H., Jaumann R., Stephan K., Brown R.H., Buratti B.J., Clark R.N., Baines K.H., Nicholson P.D., Lorenz R.D., Soderblom L.A., Soderblom J.M., Sotin C., Barnes J.W., Nelson R. (2012) Titan's fluvial valleys: Morphology, distribution, and spectral properties. *Planet. Space Sci.*, **60**(1), 34-51. doi:10.1016/j.pss.2011.01.020
- Le Mouélic S., Rodriguez S., Robidel R., Rousseau B., Seignovert B., Sotin C., Barnes J.W., Brown R.H., Baines K.H., Buratti B.J., Clark R.N., Nicholson P.D., Rannou P., Cornet T. (2018) Mapping polar atmospheric features on Titan with VIMS: From the dissipation of the northern cloud to the onset of a southern polar vortex. *Icarus*, **311**, 371-383. doi:10.1016/j.icarus.2018.04.028
- Loose B., Naveira Garabato A.C., Schlosser P., Jenkins W.J., Vaughan D., Heywood K.J. (2018) Evidence of an active volcanic heat source beneath the Pine Island Glacier. *Nat. Commun.*, **9**(1). doi:10.1038/s41467-018-04421-3
- Lopes R.M.C., Kirk R.L., Mitchell K.L., Le Gall A., Barnes J.W., Hayes A., Kargel J., Wye L., Radebaugh J., Stofan E.R., Janssen M.A., Neish C.D., Wall S.D., Wood C.A., Lunine J.I., Malaska M.J. (2013) Cryovolcanism on Titan: New results from Cassini RADAR and VIMS. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **118**, 416-435. doi:10.1002/jgre.20062
- Lopes R.M.C., Malaska M.J., Solomonidou A., Le Gall A., Janssen M.A., Neish C.D., Turtle E.P., Birch S.P.D., Hayes A.G., Radebaugh J., Coustenis A., Schoenfeld A., Stiles B.W., Kirk R.L., Mitchell K.L., Stofan E.R., Lawrence K.J., the Cassini RADAR Team. (2016) Nature, distribution, and origin of Titan's Undifferentiated Plains. *Icarus*, **270**, 162-182. doi:10.1016/j.icarus.2015.11.034
- Lopes R.M.C., Stofan E.R., Peckyno R., Radebaugh J., Mitchell K.L., Mitri G., Wood C.A., Kirk R.L., Wall S.D., Lunine J.I., Hayes A., Lorenz R., Farr T., Wye L., Craig J., Ollerenshaw R.J., Janssen M., Legall A., Paganelli F., West R., Stiles B., Callahan P., Anderson Y., Valora P., Soderblom L., Cassini RADAR Team (2010) Distribution and interplay of geologic processes on Titan from Cassini radar data. *Icarus*, **205**, 540-558. doi:10.1016/j.icarus.2009.08.010
- Lora J.M., Lunine J.I., Russell J.L., Hayes A.G. (2014) Simulations of Titan's paleoclimate. *Icarus*, **243**, 264-73.
- Lorenz R.D., Lopes R.M., Paganelli F., Lunine J.I., Kirk R.L., Mitchell K.L., Soderblom L.A., Stofan E.R., Ori G., Myers M., Miyamoto H., Radebaugh J., Stiles B., Wall S.D., Wood C.A., the Cassini RADAR Team. (2008a) Fluvial channels on Titan: meteorological paradigm and Cassini RADAR observations. *Planet. Space Sci.*, **56**, 1132-1144.
- Lorenz R.D., Mitchell K.L., Kirk R.L., Hayes A.G., Aharonson O., Zebker H.A., Paillou P., Radebaugh J., Lunine J.I., Janssen M.A., Wall S.D., Lopes R.M., Stiles B., Ostro S., Mitri G., Stofan E.R. (2008b) Titan's inventory of organic surface materials. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L02206. doi:10.1029/2007GL032118
- Lunine J.I., Stevenson D.J., Yung Y.L. (1983) Ethane ocean on Titan. *Science*, **222**, 1229-1230.
- Mastrogiuseppe M., Poggiali V., Hayes A., Lorenz R., Lunine J., Picardi G., Seu R., Flamini E., Mitri G., Notarnicola C., Paillou P., Zebker H. (2014) The bathymetry of a Titan sea. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1432-1437. doi:10.1002/2013GL058618
- Niemann H.B., Atreya S.K., Baueret S.J., Carignan G.R., Demick J.E., Frost R.L., Gautier D., Haberman J.A., Harpold D.N., Hunten D.M., Israel G., Lunine J.I., Kasprzak W.T., Owen T.C., Paulkovich M., Raulin F., Raean E., Way S.H. (2005) The abundance of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe. *Nature*, **438**, 779-784. doi:10.1038/nature04122
- Niemann H.B., Atreya S.K., Demick J.E., Gautier D., Haberman J.A., Harpold D.N., Kasprzak W.T., Lunine J.I., Owen T.C., Raulin F. (2010) 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.*, **115**, E12,006. doi: 10.1029/2010JE003659
- Rodriguez S., Garcia A., Lucas A., Appéré T., Le Gall A., Reffet E., Le Corre L., Le Mouélic S., Cornet T., Courrech du Pont S., Narteau C., Bourgeois O., Radebaugh J., Arnold K., Barnes J.W., Stephan K., Jaumann R., Sotin C., Brown R.H., Lorenz R.D., Turtle E.P. (2014) Global mapping and characterization of Titan's dune fields with Cassini: Correlation between RADAR and VIMS observations. *Icarus*, **230**, 168-179. doi:10.1016/j.icarus.2013.11.017

- Rodriguez S., Le Mouélic S., Rannou P., Sotin C., Brown R.H., Barnes J.W., Griffith C.A., Burgalat J., Baines K.H., Buratti B.J., Clark R.N., Nicholson P.D. (2011) Titan's cloud seasonal activity from winter to spring with Cassini/VIMS. *Icarus*, **216**(1), 89-110. doi:10.1016/j.icarus.2011.07.031
- Schaller E.L., Brouwn M.E., Roe H.G., Bouchez A.H. (2006) A large cloud outburst at Titan's south pole. *Icarus*, **182**, 224-229. doi:10.1016/j.icarus.2005.12.021
- Schaller E.L., Roe H.G., Schneider T., Brown M.E. (2009) Storms in the tropics of Titan. *Nature*, **460**, 873-875. doi:10.1038/nature08193
- Schneider T., Graves S.D.B., Schaller E.L., Brown M.E. (2012) Polar methane accumulation and rainstorms on Titan from simulations of the methane cycle. *Nature*, **481**, 58-61. doi:10.1038/nature10666
- Sigurdsson H., Devine J.D., Tchoua F.M., Presser T.S., Pringle M.K.W., Evans W.C. (1987) Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun Cameroun. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **31**, 1-16.
- Sohl F., Solomonidou A., Wagner F.W., Coustenis A., Husmann H., Schulze, Makuch D. (2014) Structural and tidal models of Titan and inferences on cryovolcanism. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **119**(5), 1013-1036.
- Solomonidou A., Coustenis A., Lopes R.M.C., Malaska M.J., Rodriguez S., Drossart P., Elachi C., Schmitt B., Philippe S., Janssen M., Hirtzig M., Wall S., Sotin C., Lawrence K., Altobelli N., Bratsolis E., Radebaugh J., Stephan K., Brown R.H., Le Mouélic S., Le Gall A., Villanueva E.V., Brossier J.F., Bloom A.A., Witasse O., Matsoukas C., Schoenfeld A. (2018) The spectral nature of Titan's major geomorphological units: Constraints on surface composition. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **123**, 489-507. doi:10.1002/2017JE005477
- Stofan E.R., Elachi C., Lunine J.I., Lorenz R.D., Stiles B., Mitchell K. L., Ostro S., Soderblom L., Wood C., Zebker H., Wall S., Janssen M., Kirk R., Lopes R., Paganelli F., Radebaugh J., Wye L., Anderson Y., Allison M., Boehmer R., Callahan P., Encrenaz P., Flamini E., Francescetti G., Gim Y., Hamilton G., Hensley S., Johnson W.T.K., Kelleher K., Muhleman D., Paillou P., Picardi G., Posa F., Roth L., Seu R., Shaffer S., Vetrella S., West R. (2007) The lakes of Titan. *Nature*, **445**, 61-64.
- Tobie G., Lunine J.I., Sotin C. (2006) Episodic outgassing as the origin of atmospheric methane on Titan. *Nature*, **440**, 61-64. doi:10.1038/nature04497
- Tomasko M.G., Archinal B., Becker T., Be'zard B., Bushroo M., Combes M., Cook D., Coustenis A., de Bergh C., Daele L.E., Dose L., Doute' S., Eibl A., Engel S., Gliem F., Grieger B., Holso K., Howington-Kraus A., Karkoschka E., Keller H.U., Kirk R., Kramm R., Kuppers M., Lellouch E., Lemmon M., Lunine J., McFarlane E., Moores J., Prout M., Rizk B., Rosiek M., Rüfner P., Schröder S.E., Schmitt B., See C., Smith P., Soderblom L., Thomas N., West R. (2005) Rain, wind and haze during the Huygens probe's descent to Titan's surface. *Nature*, **438**, 765-778.
- Turtle E.P., Del Genio A.D., Barbara J.M., Perry E.L., Schaller E.L., McEwen A.S., West R.A., Ray T.L. (2011a) Seasonal changes in Titan's meteorology. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L03203. doi:10.1029/2010GL046266
- Turtle E.P., Perry J.E., Hayes A.G., Lorenz R.D., Barnes J.W., McEwen A.S., West R.A., Del Genio A.D., Barbara J.M., Lunine J.I., Schaller E.L., Ray T.L., Lopes R.M.C., Stofan E.R. (2011b) Rapid and Extensive Surface Changes Near Titan's Equator: Evidence of April Showers. *Science*, **331**, 1414-1417. doi:10.1126/science.1201063
- Turtle E.P., Perry J.E., Barbara J.M., Del Genio A.D., Rodriguez S., Le Mouélic S., Sotin C., Lora J.M., Faulk S., Corlies P., Kelland J., MacKenzie S.M., West R.A., McEwen A.S., Lunine J.I., Pitesky J., Ray T.L., Roy M. (2018) Titan's meteorology over the Cassini mission: evidence for extensive subsurface methane reservoirs. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 5320-5328. doi:10.1029/2018GL078170
- Wood C.A. (2015) North polar crater and lake basins: a variety of shapes – a single origin? *Lunar Planet. Sci.*, **46**, Abstract 2490.
- Yung Y.L., Allen M., Pinto J.P. (1984) Photochemistry of the atmosphere of Titan – Comparison between model and observations. *ApJ*, **55**, 465-506. doi:10.1086/190963

REFERENCES

- Aharonson O., Hayes A.G., Lunine J.I., Lorenz R.D., Allison M.D., Elachi C. (2009) An asymmetric distribution of lakes on Titan as a possible consequence of orbital forcing. *Nat. Geosci.*, **2**(12), 85-854. doi:10.1038/ngeo698
- Atreya S.K., Adams E.Y., Niemann H.B., Demick-Montelara J.E., Owen T.C., Fulchignoni M., Ferri F., Wilson E.H. (2006) Titan's methane cycle. *Planet. Space Sci.*, **54**, 1177-1187. doi:10.1016/j.pss.2006.05.028
- Barnes J.W., Brown R.H., Soderblom L., Sotin C., Le Mouélic S., Rodriguez S., Jaumann R., Beyer R.A., Buratti B.J., Pitman K., Baines K.H., Clark R., Nicholson P. (2008) Spectroscopy, morphometry, and photoclinometry of Titan's dune fields from Cassini/VIMS. *Icarus*, **195**(1), 400-414. doi:10.1016/j.icarus.2007.12.006
- Birch S.P.D., Hayes A.G., Dietrich W.E., Howard A.D., Bristow C.S., Malaska M.J., Moore J.M., Mastrogiuseppe M., Hofgartner J.D., Williams D.A., White O.L., Soderblom J.M., Barnes J.W., Turtle E.P., Lunine J.I., Wood C.A., Neish C.D., Kirk R.L., Stofan E.R., Lorenz R.D., Lopes R.M.C. (2017) Geomorphologic mapping of Titan's polar terrains: Constraining Surface Processes and Landscape Evolution. *Icarus*, **282**, 214-236. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.08.003
- Brossier J.F., Rodriguez S., Cornet T., Lucas A., Radebaugh J., Maltagliati L., Le Mouélic S., Solomonidou A., Coustenis A., Hirtzig M., Jaumann R., Stephan K., Sotin C. (2018) Geological Evolution of Titan's Equatorial Regions: Possible Nature and Origin of the Dune Material. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **123**, 1089-1112. doi:10.1029/2017JE005399
- Choukroun M., Sotin C. (2012) Is Titan's shape caused by its meteorology and carbon cycle? *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L04201. doi:10.1029/2011GL050747
- Clark R.N., Curchin J.M., Barnes J.W., Jaumann R., Soderblom L., Cruikshank D.P., Brown R.H., Rodriguez S., Lunine J., Stephan K., Hoefen T.M., Mouélic S., Sotin C., Baines K.H., Buratti B.J., Nicholson P.D. (2010) Detection and mapping of hydrocarbon deposits on Titan. *J. Geophys. Res.*, **115**, E10005. doi:10.1029/2009JE003369
- Cornet T., Cordier D., Bahers T.L., Bourgeois O., Fleu-

- rant C., Mouélic S.L., Altobelli N. (2015) Dissolution on Titan and on Earth: Toward the age of Titan's karstic landscapes. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **120**, 1044-1074. doi: 10.1002/2014JE004738
- Cotel A.J. (1999) A trigger mechanism for the Lake Nyos disaster. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **88**, 343-347.
- Cottini V., Nixon C.A., Jennings D.E., de Kok R., Teanby N.A., Irwin P.G.J., Flasar F.M. (2012) Spatial and temporal variations in Titan's surface temperatures from Cassini CIRS observations. *Planet. Space Sci.*, **60**, 62-71. doi: 10.1016/j.pss.2011.03.015
- de Kok R.J., Teanby N.A., Maltagliati L., Irwin P.G.J., Vinatier S. (2014) HCN ice in Titan's high-altitude southern polar cloud. *Nature*, **514**, 65-67. doi: 10.1038/nature13789
- Dorofeeva V.A. (2016) Genesis of volatile components at Saturn's regular satellites. Origin of Titan's atmosphere. *Geochem. Int.*, **54**(1), 7-26.
- Dunaeva A.N., Kronrod V.A., Kuskov O.L. (2016) Physicochemical models of the internal structure of partially differentiated Titan. *Geochem. Int.*, **54**(1), 27-47 (translated from *Geohimiya*, (1), 32-55).
- Faulk S.P., Lora J.M., Mitchell J.L., Milly P.C.D. (2019) Titan's climate patterns and surface methane distribution due to the coupling of land hydrology and atmosphere. *Nat. Astron.*, doi:10.1038/s41550-019-0963-0
- Glein C.R. (2015) Noble gases, nitrogen, and methane from the deep interior to the atmosphere of Titan. *Icarus*, **570**-586. doi:10.1016/j.icarus.2015.01.001
- Griffith C.A., Lora J.M., Turner J., Penteado P.F., Brown R.H., Tomasko M.G., Doose L., See C. (2012) Possible tropical lakes on Titan from observations of dark terrain. *Nature*, **486**(7402), 237-239. doi:10.1038/nature11165
- Griffith C.A., Owen T., Geballe T.R., Rayner J., Rannou P. (2003) Evidence for the Exposure of Water Ice on Titan's Surface. *Science*, **300**, 628-630. doi:10.1126/science.1081897
- Hayes A.G. (2016) The Lakes and Seas of Titan. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **44**(1), 57-83. doi:10.1146/annurev-earth-060115-012247
- Hayes A.G., Aharonson O., Callahan P., Elachi C., Gim Y., Kirk R., Lewis K., Lopes R., Lorenz R., Lunine J., Mitchell K., Mitri G., Stofan E., Wall S. (2008) Hydrocarbon lakes on Titan: Distribution and interaction with a porous regolith. *Geophys. Res. Lett.*, **35**(9). doi:10.1029/2008gl033409
- Hayes A.G., Aharonson O., Lunine J.I., Kirk R.L., Zebker H.A., Wye L.C., Lorenz R.D., Turtle E.P., Paillou P., Mitri G., Wall S.D., Stofan E.R., Mitchell K.L., Elachi C., Cassini RADAR Team. (2011) Transient surface liquid in Titan's polar regions from Cassini. *Icarus*, **211**(1), 655-671. doi:10.1016/j.icarus.2010.08.017
- Hayes A.G., Birch S.P.D., Dietrich W.E., Howard A.D., Kirk R.L., Poggiali V., Mastrogiuseppe M., Michaelides R.J., Corlies P.M., Moore J.M., Malaska M.J., Mitchell K.L., Lorenz R.D., Wood C.A. (2017) Topographic constraints on the evolution and connectivity of Titan's lacustrine basins. *Geophys. Res. Lett.*, **4**(23). DOI: 10.1002/2017GL075468
- Hayes A.G., Michaelides R.J., Turtle E.P., Barnes J.W., Soderblom J.M., Mastrogiuseppe M., Lorenz R.D., Kirk R.L., Lunine J.I. (2014) The distribution and volume of Titan's hydrocarbon lakes and seas. *Lunar Planet. Sci.*, **45**, Abstract 2341.
- Hofgartner J.D., Hayes A.G., Lunine J.I., Zebker H., Lorenz R.D., Malaska M.J., Mastrogiuseppe M., Notarnicola C., Soderblom J.M. (2016) Titan's "Magic Islands": Transient Features in a Hydrocarbon Sea. *Icarus*, **271**, 338-349. doi: 10.1016/j.icarus.2016.02.022
- Hörst S.M. (2017) Titan's atmosphere and climate. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **122**(3), 432-482. doi:10.1002/2016je005240
- Iess L., Jacobson R. A., Ducci M., Stevenson D.J., Lunine J.I., Armstrong J.W., Asmar S.W., Racioppa P., Rappaport N.J., Tortora P. (2012) The Tides of Titan. *Science*, **337**(6093), 457-459. doi:10.1126/science.1219631
- Ivanov K.S. (2018) On the possible maximum depth of oil fields. *Izv. UGGU*, **4**(52), 41-49. doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-41-49 (In Russian)
- Janssen M.A., Le Gall A., Lopes R.M., Lorenz R.D., Malaska M.J., Hayes A.G., Neish C.D., Solomonidou A., Mitchell K.L., Radebaugh J., Keihm S.J., Choukroun M., Leyrat C., Encrenaz P.J., Mastrogiuseppe M. (2016) 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*, **270**, 443-459.
- Kuskov O.L., Dorofeeva V.A., Kronrod V.A., Makalkin A.B. (2009) *Sistemy Yupitera i Saturna. Formirovanie, sostav i vnutrennee stroenie krupnykh sputnikov* [The systems of Jupiter and Saturn: Formation, Composition and Internal Structure of Large Satellites]. Moscow, LKI Publ., 576 p. (In Russian)
- Langhans M.H., Jaumann R., Stephan K., Brown R.H., Buratti B.J., Clark R.N., Baines K.H., Nicholson P.D., Lorenz R.D., Soderblom L.A., Soderblom J.M., Sotin C., Barnes J.W., Nelson R. (2012) Titan's fluvial valleys: Morphology, distribution, and spectral properties. *Planet. Space Sci.*, **60**(1), 34-51. doi:10.1016/j.pss.2011.01.020
- Le Mouélic S., Rodriguez S., Robidel R., Rousseau B., Seignovert B., Sotin C., Barnes J.W., Brown R.H., Baines K.H., Buratti B.J., Clark R.N., Nicholson P.D., Rannou P., Cornet T. (2018) Mapping polar atmospheric features on Titan with VIMS: From the dissipation of the northern cloud to the onset of a southern polar vortex. *Icarus*, **311**, 371-383. doi:10.1016/j.icarus.2018.04.028
- Loose B., Naveira Garabato A.C., Schlosser P., Jenkins W.J., Vaughan D., Heywood K.J. (2018) Evidence of an active volcanic heat source beneath the Pine Island Glacier. *Nat. Commun.*, **9**(1). doi:10.1038/s41467-018-04421-3
- Lopes R.M.C., Kirk R.L., Mitchell K.L., Le Gall A., Barnes J.W., Hayes A., Kargel J., Wye L., Radebaugh J., Stofan E.R., Janssen M.A., Neish C.D., Wall S.D., Wood C.A., Lunine J.I., Malaska M.J. (2013) Cryovolcanism on Titan: New results from Cassini RADAR and VIMS. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **118**, 416-435. doi:10.1002/jgre.20062
- Lopes R.M.C., Malaska M.J., Solomonidou A., Le Gall A., Janssen M.A., Neish C.D., Turtle E.P., Birch S.P.D., Hayes A.G., Radebaugh J., Coustenis A., Schoenfeld A., Stiles B.W., Kirk R.L., Mitchell K.L., Stofan E.R., Lawrence K.J., the Cassini RADAR Team. (2016) Nature, distribution, and origin of Titan's Undifferentiated Plains. *Icarus*, **270**, 162-182. doi:10.1016/j.icarus.2015.11.034
- Lopes R.M.C., Stofan E.R., Peckyno R., Radebaugh J., Mitchell K.L., Mitri G., Wood C.A., Kirk R.L., Wall S.D., Lunine J.I., Hayes A., Lorenz R., Farr T., Wye L., Craig J.,

- Ollerenshaw R.J., Janssen M., Legall A., Paganelli F., West R., Stiles B., Callahan P., Anderson Y., Valora P., Soderblom L., Cassini RADAR Team. (2010) Distribution and interplay of geologic processes on Titan from Cassini radar data. *Icarus*, **205**, 540-558. doi:10.1016/j.icarus.2009.08.010
- Lora J.M., Lunine J.I., Russell J.L., Hayes A.G. (2014) Simulations of Titan's paleoclimate. *Icarus*, **243**, 264-73.
- Lorenz R.D., Lopes R.M., Paganelli F., Lunine J.I., Kirk R.L., Mitchell K.L., Soderblom L.A., Stofan E.R., Ori G., Myers M., Miyamoto H., Radebaugh J., Stiles B., Wall S.D., Wood C.A., the Cassini RADAR Team. (2008a) Fluvial channels on Titan: meteorological paradigm and Cassini RADAR observations. *Planet. Space Sci.*, **56**, 1132-1144.
- Lorenz R.D., Mitchell K.L., Kirk R.L., Hayes A.G., Aharonson O., Zebker H.A., Paillou P., Radebaugh J., Lunine J.I., Janssen M.A., Wall S.D., Lopes R.M., Stiles B., Ostro S., Mitri G., Stofan E.R. (2008b) Titan's inventory of organic surface materials. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L02206. doi:10.1029/2007GL032118
- Lunine J.I., Stevenson D.J., Yung Y.L. (1983) Ethane ocean on Titan. *Science*, **222**, 1229-1230.
- Malyshev A.I. (2004) Implications of Gas-Liquid Phase Transitions for Endogenic Origin of Hydrocarbons. *Dokl. Earth Sci.*, **399**(9), 1232-1235.
- Malyshev A.I. (2005) Role of Gas-Liquid Phase Transitions in Evolution of High-Temperature Endogenous Fluids. *Geochem. Int.*, **43**(6), 613-618.
- Malyshev A.I. (2015) *Gazovyi faktor v endogennykh protsessakh* [Gas factor in endogenous processes]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 324 p. (In Russian)
- Malyshev A.I. (2017) The Role of Cooling Horizons in Genesis of Hydrocarbon Deposits. *Dokl. Earth Sci.*, **476**(2), 1152-1154. DOI: 10.1134/S1028334X17100063
- Malyshev A.I., Malysheva L.K. (2009a) Planetary degassing processes and conditions for the occurrence of pre-biological states on planets of the Solar system: I. Earth. *Litosfera*, (2), 67-77. (In Russian)
- Malyshev A.I., Malysheva L.K. (2009b) Planetary degassing processes and conditions for the occurrence of pre-biological states on planets of the Solar system: II. Earth-like planets and the giant planets. *Litosfera*, (3), 64-74. (In Russian)
- Malyshev A.I., Malysheva L.K. (2009в) Planetary degassing processes and conditions for the occurrence of pre-biological states on planets of the Solar system: III. Small celestial bodies, meteorites and outer space. *Litosfera*, (4), 93-103. (In Russian)
- Malysheva L.K. (2004) Extraterrestrial volcanism (information review). *J. Vulkanol. Seismol.*, (6), 65-77. (In Russian)
- Mastrogiuseppe M., Poggiali V., Hayes A., Lorenz R., Lunine J., Picardi G., Seu R., Flamini E., Mitri G., Notarnicola C., Paillou P., Zebker H. (2014) The bathymetry of a Titan sea. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1432-1437. doi:10.1002/2013GL058618
- Niemann H.B., Atreya S.K., Baueret S.J., Carignan G.R., Demick J.E., Frost R.L., Gautier D., Haberman J.A., Harpold D.N., Hunten D.M., Israel G., Lunine J.I., Kasprzak W.T., Owen T.C., Paulkovich M., Raulin F., Raaben E., Way S.H. (2005) The abundance of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe. *Nature*, **438**, 779-784. doi:10.1038/nature04122
- Niemann H.B., Atreya S.K., Demick J.E., Gautier D., Haberman J.A., Harpold D.N., Kasprzak W.T., Lunine J.I., Owen T.C., Raulin F. (2010) 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.*, **115**, E12,006. doi: 10.1029/2010JE003659
- Rodriguez S., Garcia A., Lucas A., Appéré T., Le Gall A., Reffet E., Le Corre L., Le Mouélic S., Cornet T., Courrech du Pont S., Narteanu C., Bourgeois O., Radebaugh J., Arnold K., Barnes J.W., Stephan K., Jaumann R., Sotin C., Brown R.H., Lorenz R.D., Turtle E.P. (2014) Global mapping and characterization of Titan's dune fields with Cassini: Correlation between RADAR and VIMS observations. *Icarus*, **230**, 168-179. doi:10.1016/j.icarus.2013.11.017
- Rodriguez S., Le Mouélic S., Rannou P., Sotin C., Brown R.H., Barnes J.W., Griffith C.A., Burgalat J., Baines K.H., Buratti B.J., Clark R.N., Nicholson P.D. (2011) Titan's cloud seasonal activity from winter to spring with Cassini/VIMS. *Icarus*, **216**(1), 89-110. doi:10.1016/j.icarus.2011.07.031
- Schaller E.L., Brouwn M.E., Roe H.G., Bouchez A.H. (2006) A large cloud outburst at Titan's south pole. *Icarus*, **182**, 224-229. doi:10.1016/j.icarus.2005.12.021
- Schaller E.L., Roe H.G., Schneider T., Brown M.E. (2009) Storms in the tropics of Titan. *Nature*, **460**, 873-875. doi:10.1038/nature08193
- Schneider T., Graves S.D.B., Schaller E.L., Brown M.E. (2012) Polar methane accumulation and rainstorms on Titan from simulations of the methane cycle. *Nature*, **481**, 58-61. doi:10.1038/nature10666
- Sigurdsson H., Devine J.D., Tchoua F.M., Presser T.S., Pringle M.K.W., Evans W.C. (1987) Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun Cameroun. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **31**, 1-16.
- Sohl F., Solomonidou A., Wagner F.W., Coustenis A., Husmann H., Schulze, Makuch D. (2014) Structural and tidal models of Titan and inferences on cryovolcanism. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **119**(5), 1013-1036.
- Solomonidou A., Coustenis A., Lopes R.M.C., Malaska M.J., Rodriguez S., Drossart P., Elachi C., Schmitt B., Philippe S., Janssen M., Hirtzig M., Wall S., Sotin C., Lawrence K., Altobelli N., Bratsolis E., Radebaugh J., Stephan K., Brown R.H., Le Mouélic S., Le Gall A., Villanueva E.V., Brossier J.F., Bloom A.A., Witasse O., Matsoukas C., Schoenfeld A. (2018) The spectral nature of Titans major geomorphological units: Constraints on surface composition. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **123**, 489-507. doi:10.1002/2017JE005477
- Stofan E.R., Elachi C., Lunine J.I., Lorenz R.D., Stiles B., Mitchell K. L., Ostro S., Soderblom L., Wood C., Zebker H., Wall S., Janssen M., Kirk R., Lopes R., Paganelli F., Radebaugh J., Wye L., Anderson Y., Allison M., Boehmer R., Callahan P., Encrenaz P., Flamini E., Francescetti G., Gim Y., Hamilton G., Hensley S., Johnson W.T.K., Kelleher K., Muhleman D., Paillou P., Picardi G., Posa F., Roth L., Seu R., Shaffer S., Vetrella S., West R. (2007) The lakes of Titan. *Nature*, **445**, 61-64.
- Taziev H. (1980) *Zapakh sery* [Smell of sulfur]. Moscow, Mysl' Publ., 222 p. (In Russian)
- Tobie G., Lunine J.I., Sotin C. (2006) Episodic outgassing as

- the origin of atmospheric methane on Titan. *Nature*, **440**, 61-64. doi:10.1038/nature04497
- Tomasko M.G., Archinal B., Becker T., Be'zard B., Bushroo M., Combes M., Cook D., Coustenis A., de Bergh C., Dafoe L.E., Doose L., Doute' S., Eibl A., Engel S., Gliem F., Grieger B., Holso K., Howington-Kraus A., Karkoschka E., Keller H.U., Kirk R., Kramm R., Küppers M., Lellouch E., Lemmon M., Lunine J., McFarlane E., Moores J., Prout M., Rizk B., Rosiek M., Rüf-fer P., Schröder S.E., Schmitt B., See C., Smith P., Soderblom L., Thomas N., West R. (2005) Rain, wind and haze during the Huygens probe's descent to Titan's surface. *Nature*, **438**, 765-778.
- Turtle E.P., Del Genio A.D., Barbara J.M., Perry E.L., Schaller E.L., McEwen A.S., West R.A., Ray T.L. (2011a) Seasonal changes in Titan's meteorology. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L03203. doi:10.1029/2010GL046266
- Turtle E.P., Perry J.E., Hayes A.G., Lorenz R.D., Barnes J.W., McEwen A.S., West R.A., Del Genio A.D., Barbara J.M., Lunine J.I., Schaller E.L., Ray T.L., Lopes R.M.C., Stofan E.R. (2011b) Rapid and Extensive Surface Changes Near Titan's Equator: Evidence of April Showers. *Science*, **331**, 1414-1417. doi:10.1126/science.1201063
- Turtle E.P., Perry J.E., Barbara J.M., Del Genio A.D., Rodriguez S., Le Mouélic S., Sotin C., Lora J.M., Faulk S., Corlies P., Kelland J., MacKenzie S.M., West R.A., McEwen A.S., Lunine J.I., Pitesky J., Ray T.L., Roy M. (2018) Titan's meteorology over the Cassini mission: evidence for extensive subsurface methane reservoirs. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 5320-5328. doi: 10.1029/2018GL078170
- Wood C.A. (2015) North polar crater and lake basins: a variety of shapes – a single origin? *Lunar Planet. Sci.*, **46**, Abstract 2490.
- Yung Y.L., Allen M., Pinto J.P. (1984) Photochemistry of the atmosphere of Titan – Comparison between model and observations. *ApJ.*, **55**, 465-506. doi:10.1086/190963

Авторский указатель за 2020 г.

- Абрамов Б.Н.** Петрогеохимия и условия формирования мезозойских вулканоплутонических образований Балецкого рудного узла. № 1, стр. 106.
- Азовскова О.Б.** см. Мурзин В.В.
- Анкушева Н.Н.** см. Знаменский С.Е.
- Анкушева Н.Н., Кужугет Р.В.** Состав золота и условия образования золото-сульфидно-кварцевого рудопоявления Южный Ак-Даг (Западная Тува). № 5, стр. 706.
- Анфилов В.Н., Кабанова Л.Я., Рыжков В.М., Коркина М.А.** Геологическое строение Карабашского рудного района (Южный Урал). № 5, стр. 682.
- Артемьев Д.А.** см. Знаменский С.Е.
- Бадида Л.В., Маслов А.В., Мизенс Г.А.** Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 3. Современные методы исследования тяжелых обломочных минералов (гранатов, турмалинов, хромшпинелидов, рутила и др.). № 2, стр. 149.
- Бадида Л.В., Маслов А.В., Мизенс Г.А.** Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 4. Современные методы исследования тяжелых обломочных минералов (цирконов, апатитов). № 3, стр. 363.
- Башлыкова Е.Ю.** см. Кулагина Е.И.
- Баянова Т.Б.** см. Недосекова И.Л., см. Смирнов В.Н.
- Безносова Т.М., Матвеев В.А., Пучков В.Н., Силаев В.И.** Перерыв в осадконакоплении на границе лудлова и пржидола в разрезе силура на Приполярном Урале. № 6, стр. 791.
- Блоков В.И.** см. Мурзин В.В.
- Буртман В.С., Дворова А.В., Самыгин С.Г.** Палеоширотное положение Восточно-Уральского микроконтинента и Магнитогорской дуги в Уральском океане. № 6, стр. 842.
- Вевель Я.А.** см. Груздев Д.А.
- Викентьев И.В.** см. Мурзин В.В.
- Викентьева О.В.** см. Мурзин В.В.
- Волков А.В.** см. Галямов А.Л.
- Волчек Е.Н.** см. Коротеев В.А.
- Галямов А.Л., Волков А.В., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В., Кузнецова Т.П.** Перспективы выявления месторождений миссисипского типа на Северо-Востоке России. № 2, стр. 254.
- Герасимова А.И.** см. Груздев Д.А.
- Гордиенко И.В.** см. Елбаев А.Л.
- Готтман И.А.** см. Прибавкин С.В.
- Груздев Д.А., Герасимова А.И., Журавлев А.В., Вевель Я.А.** Геоисторический анализ северной части Пай-Хойского карбонатного паравтохтона в позднем девоне–карбоне. № 5, стр. 668.
- Давыдов В.А.** см. Овчаренко А.В.
- Дбар Р.С.** см. Потапов С.С.
- Дворова А.В.** см. Буртман В.С.
- Дуб С.А., Мизенс Г.А., Кулешов В.Н., Степанова Т.И., Кучева Н.А., Николаева С.В., Мельничук О.Ю., Кулагина Е.И., Петров О.Л.** Граница нижнего и среднего карбона в разрезах восточного склона Южного и Среднего Урала: изотопный состав углерода и кислорода в известняках. № 3, стр. 305.
- Душин В.А.** см. Коротеев В.А.
- Елбаев А.Л., Гордиенко И.В., Хубанов В.Б., Зарубина О.В.** Петрогеохимические особенности и U-Pb возраст морион-гранитов Центрального Забайкалья: типизация пород и вопросы их генезиса. № 5, стр. 690.
- Жирнов А.М.** О вертикальном росте материков в глубоких впадинах перидотитовой мантии Земли. № 5, стр. 727.
- Журавлев А.В.** см. Груздев Д.А.
- Журавлев А.В.** Состав, строение и модель формирования ламеллярной ткани конодонтовых элементов. № 2, стр. 184.
- Журавлев А.В., Смолева И.В.** Предварительные результаты изучения изотопного состава углерода конодонтовых элементов на рубеже девонского и каменноугольного периодов (разрезы р. Каменка, Печорская карбонатная платформа). № 6, стр. 829.
- Зарубина О.В.** см. Елбаев А.Л.
- Знаменский С.Е., Анкушева Н.Н., Артемьев Д.А.** Условия образования, состав и источники рудообразующих флюидов золото-порфирового месторождения Большой Каран (Южный Урал). № 3, стр. 397.
- Золотова Е.С., Рябинин В.Ф., Котельникова А.Л., Иванова Н.С.** Оценка мобильности элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в лесные почвы. № 5, стр. 717.
- Зубков А.В., Сентябов С.В.** Деформация земной коры: способы изучения, закономерности, проблемы. № 6, стр. 863.
- Иванов К.С.** см. Смирнов В.Н.
- Иванов К.С., Костров Н.П.** О плотности теплового потока, структуре мантии и нефтегазоносности полуострова Ямал (Арктика). № 6, стр. 851.
- Иванова Н.С.** см. Золотова Е.С.
- Иванова Р.М.** см. Пономаренко Е.С.
- Ишбаев Х.Д., Шукуров А.Х., Косбергенов К.М.** Лампрофиры и оруденение Койташского рудного поля (Южный Тянь-Шань). № 2, стр. 231.
- Кабанова Л.Я.** см. Анфилов В.Н.
- Карнаухова Г.А.** Скорость осадконакопления и физические свойства донных осадков в Ангарских водохранилищах в условиях цикличности уровня режима. № 2, стр. 271.
- Карпова С.В.** см. Потапов С.С.
- Киселева Д.В.** см. Потапов С.С.
- Ковалев С.Г., Мичурин С.В., Маслов А.В., Шарипова А.А.** Первые данные о геохимии редкоземельных элементов и платиноидов в породах золоторудного месторождения Улюк-Бар (Южный Урал). № 4, стр. 573.

- Ковальчук Н.С., Шумилова Т.Г.** Минералого-геохимические особенности черных сланцев окружения Карской астроблемы (Пай-Хой). № 2, стр. 168.
- Корекина М.А.** см. Анфилов В.Н.
- Кориневский В.Г.** Параавтохтонные палеоокеанические и островодужные комплексы Южного Урала. № 4, стр. 542.
- Коровко А.В.** см. Прибавкин С.В.
- Коротеев В.А.** см. Недосекова И.Л.
- Коротеев В.А., Нечухин В.М., Душин В.А., Волчек Е.Н.** Особенности формирования и геодинамическая карта Урало-Тимано-Палеоазиатского сегмента Евразии. № 5, стр. 607.
- Косбергенов К.М.** см. Ишбаев Х.Д.
- Костров Н.П.** см. Иванов К.С.
- Котельникова А.Л.** см. Золотова Е.С.
- Кочнев А.П., Черемных А.В.** Особенности формирования и пегматитоконтролирующая роль взбросо-надвиговых структур Мамской мусковитоносной провинции. № 1, стр. 93.
- Кужугет Р.В.** см. Анкушева Н.Н.
- Кузнецова Т.П.** см. Галямов А.Л.
- Кулагина Е.И.** см. Дуб С.А.
- Кулагина Е.И., Башлыкова Е.Ю.** Маркерные таксоны фораминифер для определения нижней границы серпуховского яруса на Урале и их корреляционный потенциал. № 3, стр. 328.
- Кулешов В.Н.** см. Дуб С.А.
- Кучева Н.А.** Влияние серпуховско-башкирского события на разнообразие брахиопод Среднего и Южного Урала. № 1, стр. 18.
- Кучева Н.А.** см. Дуб С.А.
- Лаврушина Е.В.** см. Пржиялговский Е.С.
- Мальшев А.И.** см. Мальшева Л.К.
- Мальшева Л.К., Мальшев А.И.** Угледороды и дегазационные процессы Титана, спутника Сатурна. № 6, стр. 873.
- Маринов В.А.** Биостратиграфия и палеобиогеография ганькинского горизонта (маастрихт) Западной Сибири. № 6, стр. 808.
- Масленников В.В.** см. Мелекесцева И.Ю.
- Масленникова С.П.** см. Мелекесцева И.Ю.
- Маслов А.В.** Башкирский мегантиклинорий: поздне-рифейско-вендские перерывы и возможные трансформации систем питания бассейна. № 4, стр. 455.
- Маслов А.В.** Категории водосборов-источников тонкой алюмосиликокластики для отложений серебрянской и сыльвицкой серий венда (Средний Урал). № 6, стр. 751.
- Маслов А.В.** см. Бадида Л.В., см. Бадида Л.В., см. Ковалев С.Г., см. Ронкин Ю.Л.
- Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А., Титов Ю.В., Червяковская М.В.** Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы. № 1, стр. 40.
- Матвеев В.А.** см. Безносова Т.М.
- Мелекесцева И.Ю., Масленников В.В., Масленникова С.П.** Элементы-примеси в сульфидах Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, Южный Урал: форма нахождения и источники вещества. № 4, стр. 499.
- Мельничук О.Ю.** см. Дуб С.А., см. Маслов А.В.
- Мизенс Г.А.** см. Бадида Л.В., см. Бадида Л.В., см. Дуб С.А., см. Маслов А.В.
- Митрохин А.Н.** см. Уткин В.П.
- Мичурин С.В.** см. Ковалев С.Г.
- Мурашов К.Ю.** см. Галямов А.Л.
- Мурзин В.В., Викентьев И.В., Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Стрелецкая М.В., Блоков В.И., Викентьева О.В.** Изотопный состав свинца даек и руд Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). № 3, стр. 386.
- Неволин П.Л.** см. Уткин В.П.
- Недосекова И.Л., Коротеев В.А., Баянова Т.Б., Серов П.А., Попова В.И., Червяковская М.В.** О возрасте пирохлоровых карбонатитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса, Ю. Урал (по данным Sm-Nd и Rb-Sr изотопных методов). № 4, стр. 486.
- Немов А.Б.** Гранат-амфиболовые миаскиты Ильменогорского миаскитового массива (Южный Урал): минералогия и геохимия. № 5, стр. 652.
- Нечухин В.М.** см. Коротеев В.А.
- Николаева С.В.** см. Дуб С.А.
- Никонов А.А., Флейфель Л.Д.** Землетрясение 31.VIII.1829 г. в Архангельской губернии: рассмотрение и уточнение характеристик по первоисточникам и вопрос об активности Северо-Двинского разлома. № 1, стр. 119.
- Овчаренко А.В., Давыдов В.А., Шапов В.А., Юрков А.К.** Геофизические исследования в эпицентральной области Катав-Ивановского землетрясения (05.09.2018, m5.8). № 3, стр. 432.
- Омельченко В.Л.** О глубинных разломах на Северном Кавказе. № 1, стр. 130.
- Паршина Н.В.** см. Потапов С.С.
- Петров О.Л.** см. Дуб С.А.
- Пономаренко Е.С.** Строение и условия образования верхнелохковской валганской свиты (нижний девон р. Ильч, Северный Урал). № 1, стр. 63.
- Пономаренко Е.С., Иванова Р.М.** Касимовский ярус в разрезе Молебен-Из (р. Ильч, Северный Урал). № 3, стр. 341.
- Попова В.И.** см. Недосекова И.Л.
- Потапов С.С., Киселева Д.В., Червяцова О.Я., Паршина Н.В., Червяковская М.В., Карпова С.В., Чердниченко Н.В., Дбар Р.С.** Изотопно-геохимические особенности карбонатов и термальных вод месторождения Кындыг (Республика Абхазия). № 2, стр. 280.
- Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В.** Структуры Алайской и Кичи-Каракольской впадин и обстановки новейших деформаций в их горном обрамлении (Южный Тянь-Шань). № 6, стр. 771.
- Прибавкин С.В., Коровко А.В., Готтман И.А.** Геологическое строение и петрология Нижне-Синячихинского гранитоидного массива (Алапаевско-Суходождская медно-порфировая зона, Средний Урал). № 2, стр. 212.
- Пучков В.Н.** см. Безносова Т.М., см. Салихов Д.Н.
- Рахимов И.Р.** см. Салихов Д.Н.

- Ровнушкин М.Ю.** см. Мурзин В.В.
- Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Синдерн С.** U-Pb (ID-TIMS) геохронологический метод и SIMS приемы датирования циркона “in situ”: возможности и ограничения. № 3, стр. 411.
- Рыжков В.М.** см. Анфилогов В.Н.
- Рябинин В.Ф.** см. Золотова Е.С.
- Салихов Д.Н., Холоднов В.В., Пучков В.Н., Рахимов И.Р.** Вулканизм и интрузивный магматизм Магнитогорской палеодуги в эпоху “мягкой” коллизии с окраиной Восточно-Европейского континента. № 5, стр. 630.
- Самыгин С.Г.** см. Буртман В.С.
- Сахно В.Г., Цурикова Л.С.** Изотопно-геохимические особенности генезиса магматических комплексов рудоносных систем Чукотского сектора Арктического побережья России. № 2, стр. 196.
- Сентябов С.В.** см. Зубков А.В.
- Серов П.А.** см. Недосекова И.Л.
- Сидорова Н.В.** см. Галямов А.Л.
- Силаев В.И.** см. Безносова Т.М.
- Синдерн С.** см. Ронкин Ю.Л.
- Смирнов В.Н., Иванов К.С., Баянова Т.Б.** Первые результаты изотопного (U-Pb, ID-TIMS) датирования единичных зерен циркона из долеритовых даек Восточной зоны Урала. № 2, стр. 224.
- Смолева И.В.** см. Журавлев А.В.
- Степанова Т.И.** см. Дуб С.А.
- Стрелецкая М.В.** см. Мурзин В.В.
- Титов Ю.В.** см. Маслов А.В.
- Удоратин В.В.** Структура земной коры и верхней мантии по сейсмологическому профилю Мезень–Тиман–Печора (MEZTIMPECH). № 4, стр. 517.
- Уткин В.П., Митрохин А.Н., Неволин П.Л., Юшманов Ю.П.** Сдвиговый тектогенез в формировании Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса: структурно-динамический анализ. № 4, стр. 528.
- Флейфель Л.Д.** см. Никонов А.А.
- Холоднов В.В.** см. Салихов Д.Н.
- Хубанов В.Б.** см. Елбаев А.Л.
- Цурикова Л.С.** см. Сахно В.Г.
- Червяковская М.В.** см. Маслов А.В., см. Недосекова И.Л., см. Потапов С.С.
- Червяцова О.Я.** см. Потапов С.С.
- Чередниченко Н.В.** см. Потапов С.С.
- Черемных А.В.** см. Кочнев А.П.
- Черных В.В.** Общие закономерности в развитии гжельско-ассельских конодонтов. № 4, стр. 471.
- Черных В.В.** Стратиграфическая шкала и геологический разрез. № 1, стр. 5.
- Шайхутдинова Г.Х.** Петрографическое изучение миграции нефти на примере Имилорского месторождения (Когалымский регион, Западная Сибирь). № 4, стр. 592.
- Шарипова А.А.** см. Ковалев С.Г.
- Шмелёва Л.А.** Верхнеордовикский риф Большая Косью, р. Ильич, Северный Урал (структура, палеобиоценозы, микрофации, модель формирования). № 4, стр. 557.
- Шукуров А.Х.** см. Ишбаев Х.Д.
- Шумилов И.Х.** Текстура конус-в-конусе: новые данные. № 1, стр. 76.
- Шумилова Т.Г.** см. Ковальчук Н.С.
- Щапов В.А.** см. Овчаренко А.В.
- Юрков А.К.** см. Овчаренко А.В.
- Юшманов Ю.П.** см. Уткин В.П.