

Численные модели внутреннего строения Титана без водяного океана

А. Н. Дунаева, В. А. Кронрод, О. Л. Кусков,
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, Москва

dunaeva@kmail.ru

В работе рассматриваются модели внутреннего строения Титана. В зависимости от мощности тепловых потоков из недр спутника обсуждаются условия существования глубинного водяного океана под его ледяной корой. Показано, что внутренний океан не образуется при тепловом потоке, меньшем 3.3 мВт/м^2 . На первом этапе данной работы построены возможные модели строения Титана без внутреннего океана. Согласно модельным расчетам Титан является частично дифференцированным спутником, состоящим, в общем случае, из внешней ледяной оболочки, каменно-ледяной мантии и железокаменного ядра. Максимальный размер ядра составляет 1500 км при плотности железокаменного вещества 3.62 г/см^3 . Максимальная мощность внешней ледяной оболочки Титана достигает 520 км. В зависимости от плотности железокаменного материала мантии, принятой в диапазоне $3.15\text{--}3.62 \text{ г/см}^3$, суммарное содержание H_2O в Титане изменяется в соответствующих пределах 45–51 мас. %.

Ключевые слова: спутники планет-гигантов, Титан, тепловой поток, внутреннее строение

Ссылка: Дунаева, А. Н., В. А. Кронрод, О. Л. Кусков (2012), Численные модели внутреннего строения Титана без водяного океана, *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ_ASEMPG

При исследовании Титана одним из ключевых моментов является понимание истории возникновения и эволюции этого крупного ледяного спутника Солнечной Системы, что связано с необходимостью изучения его внутреннего строения, а также особенностей фазового и химического состава слагающего его вещества.

Основные сведения о Титане были получены в ходе космической экспедиции «Кассини-Гюйгенс», направленной на исследование системы Сатурна. Важнейшим результатом работы орбитальной станции, с точки зрения построения теоретических моделей Титана, являются полученные геофизические данные о массе, средней плотности и моменте инерции спутника.

Анализ этих данных позволяет заключить, что Титан по многим параметрам является двойником юпитерианского спутника Каллисто, внутреннее строение которого подробно рассмотрено в работах [Кронрод и Кусков, 2003; Кронрод и Кусков, 2005]. Согласно этим работам Каллисто является частично дифференцированным спутником, в недрах которого возможно существование внутреннего водяного океана мощностью до 150–170 км. В отношении же Титана анализ всей имеющейся на сегодняшний день информации не позволяет определенно говорить о наличии в его глубинах каких-либо резервуаров с жидкой водой.

Существование внутреннего океана в недрах спутника напрямую зависит от процессов теплопереноса и распределения температуры по его глубине. На рис.1 схематично показаны возможные варианты радиального распределения температуры в Титане, соответствующие различным значениям тепловых потоков через ледяную кору спутника. При этом температурные профили строились в предположении кондуктивной (в области низких температур и давлений у поверхности спутника) и конвективной адиабатической среды, характерной для его более глубоких слоев.

Как видно из рисунка, каждому значению теплового потока соответствует определенное строение водно-ледяной оболочки Титана (на рис.1 это варианты без внутреннего океана, с океаном промежуточной мощности и с максимально-возможным океаном). Т.е. выбор температурного профиля задает фазовый состав (а значит и распределение плотности) по всей водно-ледяной оболочке спутника, а также определяет максимально допустимую мощность его верхней ледяной коры, сложенной льдом I_h , и глубину его внутреннего подкорового океана.

ДУНАЕВА И ДР.: ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ТИТАНА

В соответствии с литературными данными [Hussmann *et al.*, 2006] величина теплового потока Титана, определяемая только его радиогенным теплом, может равняться 1.18 мВт/м^2 . Учет дополнительного приливного разогрева спутника, вызванного его неравномерным движением по орбите с эксцентриситетом, дает значение теплового потока 7 мВт/м^2 [Mitri and Showman, 2008]. В настоящей работе на основе уравнений теплопереноса и фазовой диаграммы воды были рассчитаны все возможные значения тепловых потоков Титана, приводящие к целому ряду моделей строения его водно-ледяной оболочки (Рис.2).

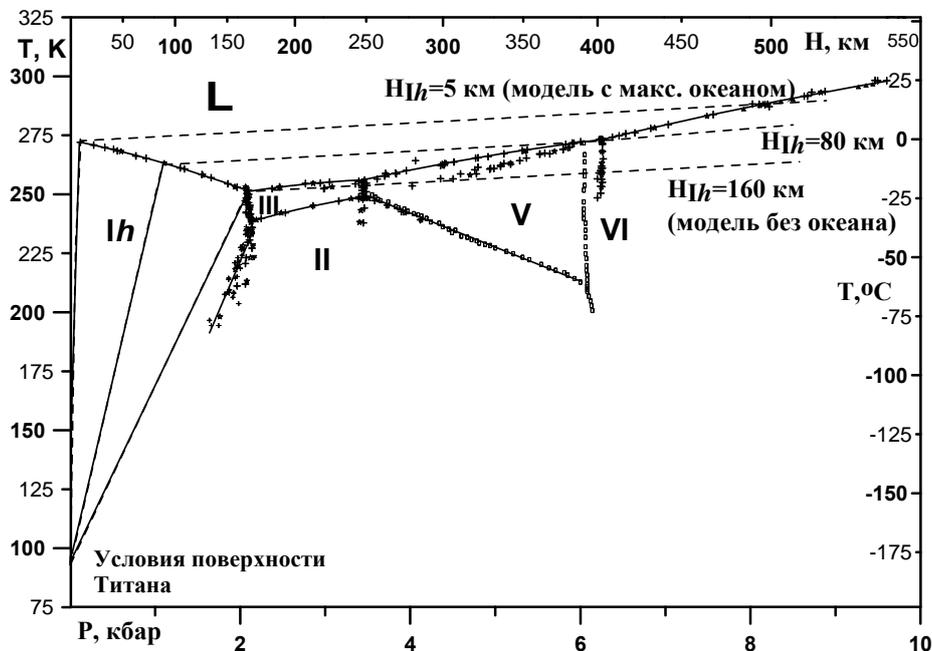


Рис.1. Фазовая диаграмма воды и распределение температуры в ледяной коре Титана. Прямые линии – кондуктивные температурные профили через внешнюю (лед- I_h) кору Титана. Пунктир - адиабаты конвективного теплопереноса в подкоровом водяном океане и в области существования высокобарных льдов

H , H_{Ih} – расстояние от поверхности спутника (глубина) и мощность внешней ледяной I_h -коры.

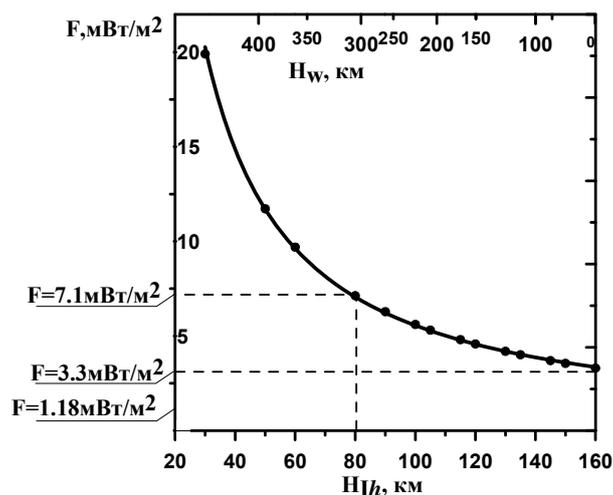


Рис.2. Зависимость мощности ледяной коры Титана (H_{Ih}) и мощности его внутреннего океана (H_w) от величины тепловых потоков в спутнике

Из рис. 2 следует, что при низком тепловом потоке, меньшем 3.3 мВт/м^2 , внутренний океан в Титане не образуется. Внешняя водно-ледяная оболочка спутника в этом случае представлена только водяными льдами (мощность подкорового океана (H_w) равна нулю), тогда как при тепловом потоке 7.1 мВт/м^2 у спутника может формироваться внешняя ледяная кора размером 80 км и подкоровый океан жидкой воды мощностью до 315 км .

ДУНАЕВА И ДР.: ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ТИТАНА

В рамках данной работы рассмотрены возможные модели строения Титана без внутреннего океана, соответствующие тепловому потоку 3.3 мВт/м^2 . При этом в общем случае задавалась трехслойная модель Титана, включающая внешнюю ледяную оболочку, внутреннее железокристаллическое ядро и находящуюся между ними кристаллическо-ледяную мантию, представляющую собой смесь льдов высокого давления и скального материала. Частными (краевыми) вариантами данной модели являются модели двухслойного Титана, включающие мощный кристаллическо-ледяной слой в сочетании либо с внутренним железокристаллическим ядром (без внешней ледяной коры), либо с внешней ледяной корой, но без скального ядра.

В качестве исходной информации для построения моделей Титана были использованы:

- физические характеристики спутника (Т, Р, радиус, плотность, масса, момент инерции), формирующие область основных ограничений для разрабатываемых моделей;
- геохимические данные по плотности и составу метеоритного вещества L/LL хондритов, которому, предположительно, соответствует состав железокристаллического материала Титана;
- термодинамические уравнения состояния воды и льдов высокого давления.
- В соответствии с принятым в настоящей работе подходом, модель внутреннего строения Титана описывалась системой следующих уравнений [Кронрод и Кусков, 2003]:
- Уравнения гидростатического равновесия:

$$\frac{dP}{dR} = -\rho(R) \cdot g(R); \quad \frac{dg}{dR} = -4\pi \cdot G \cdot \rho(R) - 2g(R)/R, \quad (1)$$

- Уравнения момента инерции и массы спутника:

$$I = \frac{8}{15} \pi \sum_{i=0}^n \rho_i (R_i^5 - R_{i+1}^5); \quad (2)$$

$$M = \frac{4}{3} \pi \sum_{i=0}^n \rho_i (R_i^3 - R_{i+1}^3),$$

- Уравнение для расчета концентрации ледяной компоненты в мантии:

$$C_{ice} = \frac{\rho_{ice,m} (\rho_{Fe-Si} - \rho_m)}{\rho_m (\rho_{Fe-Si} - \rho_{ice,m})}, \quad (3)$$

где P , R , M , I – давление, радиус, масса и момент инерции Титана, $\rho(R)$ – плотность водно-ледяной оболочки, $g(R)$ – ускорение свободного падения, R_i , R_{i+1} – внешний и внутренний радиусы i -го слоя плотностью ρ_i , $\rho_{ice,m}$ – средняя плотность льдов в мантии, ρ_m – средняя плотность мантии, ρ_{Fe-Si} – плотность железосиликатной компоненты, C_{ice} – массовая доля льдов в мантии.

Система уравнений (1-3) численно интегрировалась в интервале глубин от поверхности до расчетной глубины спутника. При расчетах полагалось, что железокристаллическое вещество Титана имеет постоянную плотность по глубине. При этом плотность внутреннего ядра, не содержащего льды, во всех расчетах принималась равной 3.62 г/см^3 , а плотность $Fe-Si$ компоненты в кристаллическо-ледяном слое Титана выбиралась в диапазоне, характерном для обыкновенных L/LL хондритов с учетом гидратации силикатов [Кронрод и Кусков, 2003]: от 3.15 до 3.62 г/см^3 .

Расчеты, выполненные по двухслойным моделям Титана, позволили оценить максимальные размеры его внешней ледяной коры и внутреннего железокристаллического ядра. Показано, что максимальный размер ядра Титана достигается в рамках двухслойной модели без внешней ледяной оболочки (Рис. 3а). В этом случае образуется частично дифференцированный Титан с внутренним скальным ядром размером около 1500 км и внешним мощным слоем кристаллическо-ледяного вещества средней плотностью около 1.4 г/см^3 .

В случае формирования на спутнике мощной ледяной коры, внутреннее железокристаллическое ядро не образуется, и вся внутренняя область представлена однородным веществом средней плотностью 2.6 г/см^3 , что, вероятнее всего, соответствует смеси кристаллического материала и высокобарных льдов. Такое строение спутника отвечает модели двухслойного частично дифференцированного Титана без внутреннего ядра (рис. 3б). Максимально возможная

ДУНАЕВА И ДР.: ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ТИТАНА

мощность ледяной коры по этой модели достигает 515–520 км при средней плотности 1.15 г/см³, а масса заключенной в ней воды составляет 30% от всей массы Титана.

Фазовый состав ледяной коры Титана представлен водяными льдами *I_h*, III, V, VI, последовательно сменяющимися друг друга по глубине. При этом верхний кондуктивный слой ледяной *I_h*-коры не превышает 160 км и имеет среднюю плотность порядка 0.94 г/см³.

Плотность льдов во внутренней каменно-ледяной области Титана изменяется в соответствии с уравнениями состояния и достигает значений 1.77 г/см³ при давлениях в центре спутника, равных 48 кбар (область существования льда VII).

Обобщенная модель трехслойного Титана, дифференцированного на ледяную оболочку, каменно-ледяную мантию и железокремнистое ядро, представлена на рис. 4. В этом случае реализуется множество вариантов внутреннего строения спутника, где в зависимости от мощности водно-ледяной оболочки изменяются размеры внутреннего железосиликатного ядра, а также размеры и плотность каменно-ледяной мантии.

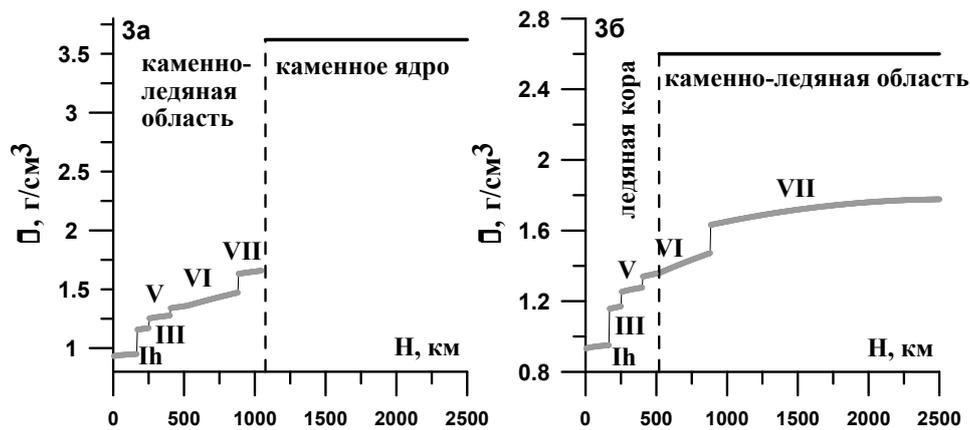


Рис. 3. Двухслойные модели Титана: 3а – модель с максимальным железосиликатным ядром, 3б – модель с максимальной ледяной корой. Серым цветом показано изменение плотности льдов в составе ледяной коры и каменно-ледяной области

