

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЬДА И ВОДЫ В КАЛЛИСТО ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Кронрод В.А. (ГЕОХИ РАН), Кусков О.Л. (ГЕОХИ РАН)

Факс: (095) 938-20-54, (095) 137-86-14

kuskov@geokhi.ru

Ключевые слова: космохимия, хондриты, Галилеевы спутники, Каллисто, водный океан

Спутник Юпитера Каллисто по размерам сравним с Меркурием, его средняя плотность (1.8344 г см^{-3}) наименьшая среди Галилеевых спутников. Низкая плотность Каллисто указывает на то, что спутник состоит из смеси льдов H_2O и каменного или точнее железокаменного материала в примерно равной пропорции. Под железокаменной компонентой здесь и далее понимается смесь силикатов, гидросиликатов и сульфида железа (Fe-FeS сплав).

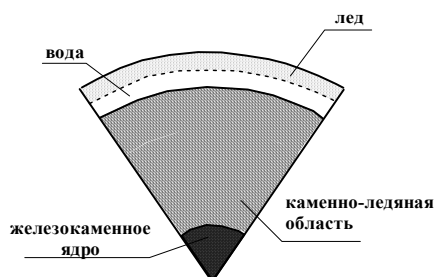


Рис. 1. Схема внутреннего строения Каллисто

Один из нерешенных вопросов в строении Каллисто - возможность существования глобального водного слоя (океана) под ледяной корой. Недавние исследования наведенного магнитного поля Каллисто зондом «Галилео» говорят в пользу гипотезы существования океана. Возмущения магнитного поля могут быть связаны с конвективными движениями в проводящем слое океанической воды [1].

Цель настоящей работы заключается в исследовании основных структурных параметров внутреннего строения Каллисто. Конкретные задачи включают: 1) изучение степени дифференциации спутника; 2) определение мощности и агрегатного состояния водно-ледяной оболочки; 3) определение концентрации льда в мантии и суммарной концентрации льда в спутнике; 4) поиск ограничений на распределение плотности в мантии, на максимальные и минимальные размеры железокаменного ядра. В качестве опорной информации использованы ограничения на массу и момент инерции спутника [2], геохимические данные по составу метеоритов, а также термодинамические данные по уравнениям состояния воды, льдов высокого давления и вещества обыкновенных L/LL- хондритов в системе $\text{Na}_2\text{O-TiO}_2\text{-CaO-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Fe-FeS}$ (силикатов/ гидросиликатов и Fe-FeS сплава). Для определения плотности мантии использовался программный комплекс THERMOSEISM [3]. При моделировании строения внешней оболочки принято, что теплоперенос в ледяной коре осуществляется посредством теплопроводности [4, 5].

Мы использовали шестислойную модель Каллисто, включающую ледяную кору, водный океан, трехслойную каменно-ледяную мантию и железокаменное ядро. Модель описывается системой уравнений, включающей уравнения момента и массы, гидростатического равновесия, уравнения состояния, уравнения теплопереноса. Плотность мантии и радиус ядра находятся методом Монте-Карло.

Концентрация ледяной компоненты в каждом i -том резервуаре мантии определяется по уравнениям:

$$C_{i,ice} = \left[\frac{\rho_{ice}(\rho_{Fe-Si} - \rho)}{\rho(\rho_{Fe-Si} - \rho_{ice})} \right]_i$$

$$C_{i+1,ice} < C_i$$

Здесь $\rho_{\text{Fe-Si}}$, ρ_{ice} , ρ , C_{ice} плотность железокаменной компоненты, плотность льда, плотность смеси льда и железокаменной компоненты, массовая концентрация льда. Концентрация льда не может возрастать с глубиной, так как более тяжелая железокаменная компонента может двигаться относительно льда только к центру спутника. Мы предполагаем, что реология льда неньютоновская. В этом случае по оценкам [5] в ледяной коре отсутствует конвекция. Распределение температуры в слое льда-I описывается уравнением теплопроводности. В водном океане и льдах высокого давления предполагается конвективный теплоперенос, профиль температуры идет по адиабате [4].

Модель внутреннего строения Каллисто приведена на Рис. 2. Максимальная мощность водно-ледяного слоя 315 км. Радиус железокаменного ядра может находиться в интервале 0-1280 км, для модели с жидким слоем всего несколько километров $R(\text{Fe-Si-core})=0-950$ км. Вышеприведенные оценки получены без ограничений на тепловой поток из Каллисто. Определены геофизически допустимые концентрации льда в мантии Каллисто (Рис.3). Концентрация льда становится почти постоянной по глубине (40 мас.%) при мощности водно-ледяного слоя 300-315 км.

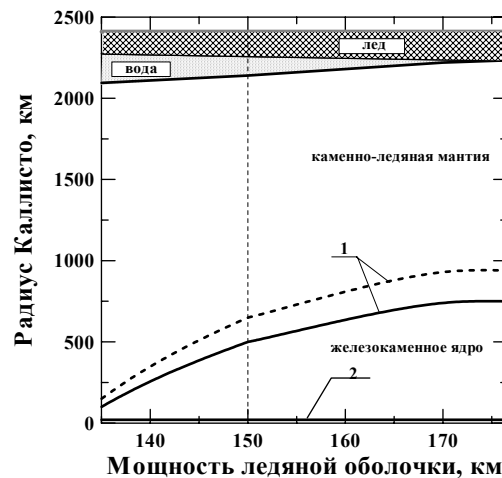


Рис. 2. Внутреннее строение Каллисто с внутренним океаном: толщина ледяной литосферы находится в интервале 135-150 км, толщина водного слоя составляет 120 - 180 км, а общая мощность водно-ледяной оболочки ~270-315 км. 1 - максимальные размеры железокаменного ядра. Сплошная линия - плотность железокаменной компоненты $\rho_{\text{Fe-Si}} = 3.62 \text{ г/см}^3$, штриховая - 3.15 г/см^3 . 2 - минимальные размеры ядра. Вертикальная линия соответствует мощности ледяной коры 150 км. В области 135-150 км тепловые потоки из Каллисто находятся в интервале $F=3.3-3.7 \text{ мВт/м}^2$.

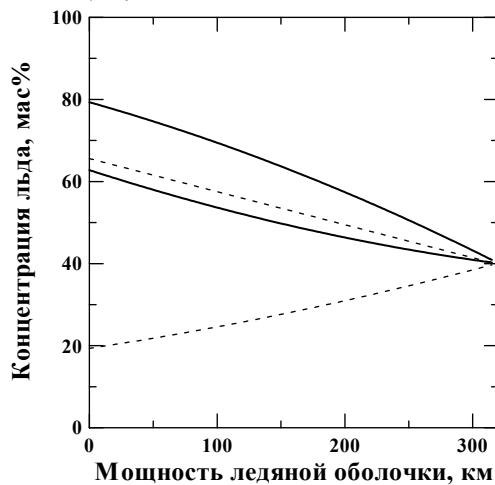


Рис. 3. Область допустимых значений концентраций льда H_2O в среднем (штриховая линия) и нижнем (сплошная линия) резервуарах каменно-ледяной мантии Каллисто.

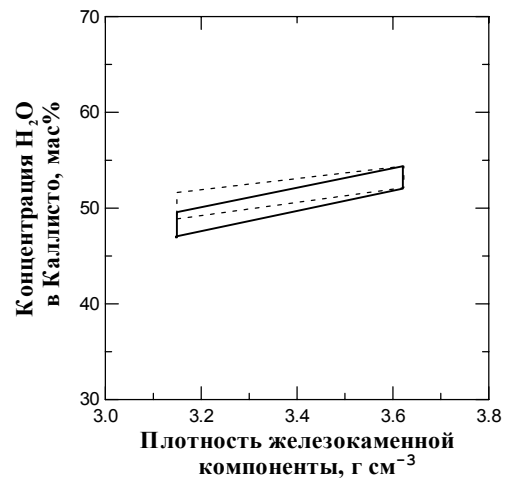


Рис. 4. Валовая концентрация H_2O в Каллисто. Сплошная линия – концентрация H_2O в каменно-ледяной мантии + водно-ледяная оболочка. Пунктирная – то же самое, но с учетом химически связанной H_2O в водосодержащих минералах.

Модели с постоянной концентрацией льдов в каменно-ледяной мантии Каллисто реализуются во всем диапазоне мощности водно-ледяной оболочки. С учетом химически связанной H_2O в водосодержащих минералах суммарная концентрация H_2O в Каллисто оценивается в интервале ~49-54 мас.%, рис. 4. Построена модель водно-ледяной оболочки на основе модели теплопереноса и фазовой диаграммы льдов высокого давления. Вода находится в жидкой фазе, если тепловой поток больше, чем 2 мВт/м^2 .

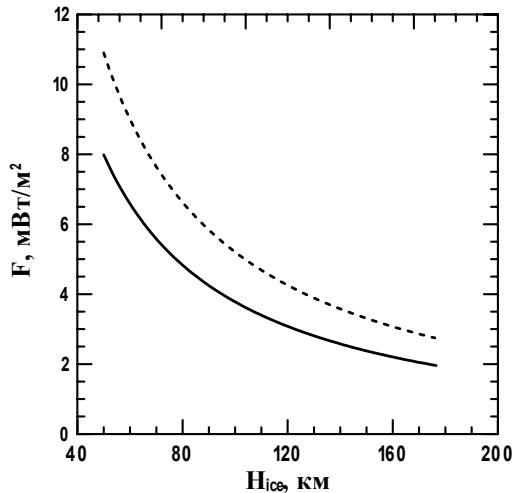


Рис. 5. Мощность ледяной коры из льда-I в зависимости от теплового потока с поверхности Каллисто. Штриховая линия – температура поверхности 100 K, сплошная – 130 K.

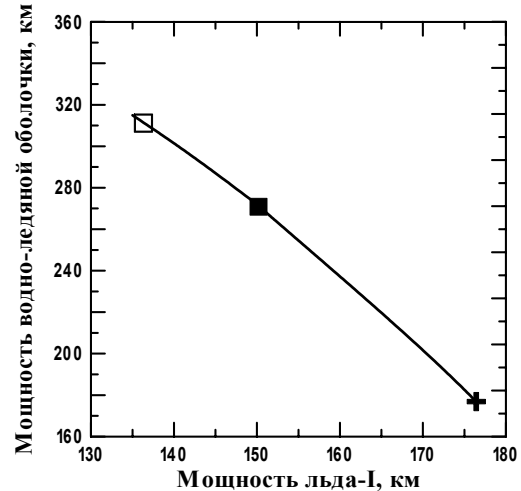


Рис. 6. Зависимость мощности водно-ледяной оболочки Каллисто (лед - I + вода) от мощности коры из льда-I. Символами обозначают фиксированные значения теплового потока F через ледяную кору и температуры T_1 на поверхности. Светлый квадрат - $F=3.3 \text{ мВт/м}^2$, $T_1=112 \text{ K}$; темный квадрат - $F=3.3 \text{ мВт/м}^2$, $T_1=100 \text{ K}$; крест - $F=2.7 \text{ мВт/м}^2$, $T_1=100 \text{ K}$.

Оценки теплового потока от радиогенных источников дают величину $3.3 - 3.9 \text{ мВт/м}^2$. Нами была определена максимальная величина теплового потока в 3.7 мВт/м^2 . В этом случае величина теплового потока из Каллисто при наличии водного океана находится в узком интервале $3.3 - 3.7 \text{ мВт/м}^2$. Зависимость теплового потока от мощности ледяной коры показана на рис. 5.

Мощность водно-ледяной оболочки непосредственно зависит от теплового потока или от мощности ледяной коры. Если тепловой поток находится в интервале $3.3-3.7 \text{ мВт/м}^2$, мощность водно-ледяной оболочки составляет 270-315 км. На рис. 6 показана зависимость мощности водно-ледяного слоя от мощности ледяной оболочки. При толщине водно-ледяной оболочки 270-315 км мощность ледяной коры составляет 135-150 км, мощность внутреннего океана – 120-180 км. Для этой модели радиус железокамennого ядра не превышает 600 км.

Заключение

Рассмотрены возможные модели строения Каллисто. Показано, что однослойная модель Каллисто с постоянной концентрацией льда от поверхности до центра, равно как и двухслойная модель спутника, дифференцированного на ледяную (водно-ледяную) оболочку и железокамennое ядро, не реализуются. Возможны модели с ледяной оболочкой мощностью вплоть до ~315 км и железокамennым ядром с радиусом вплоть до 1120-1280 км в различных сочетаниях с каменно-ледяной мантией. Модели с постоянной концентрацией льдов в каменно-ледяной мантии Каллисто реализуются во всем диапазоне мощности водно-ледяной оболочки. С учетом химически связанной H_2O в водосодержащих минералах суммарная концентрация H_2O в Каллисто оценивается в интервале ~49-54 мас.%. Для моделей с кондуктивным механизмом теплопереноса в слое льда-I исследованы сценарии строения Каллисто с внутренним океаном. Показано, что для современного теплового потока $F=3.3-3.7 \text{ мВт/м}^2$, соответствующего ожидаемому от радиогенных источников тепла, полная мощность водно-ледяной оболочки составляет ~270-315 км, ледяного покрова - ~135-150 км, а толщина подстилающего водного слоя ~120-180 км. Для этой модели размеры железокамennого ядра не превышают 500-600 км, концентрация льда

в каменно-ледяной мантии постоянна по глубине и составляет ~40 мас. %.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 03-05-64413, № 04-05-64867)
и гранта по программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 25)*

Литература

1. Zimmer C. et al., Subsurface oceans on Europe and Callisto // Icarus. 2000. V. 147. PP. 329-347.
2. Anderson J.D. et al., Shape, mean radius, gravity field, and interior structure of Callisto // Icarus, 2001. V.153. PP. 157-157.
3. Kuskov O.L., Kronrod V.A. Core sizes and internal structure of the Earth's and Jupiter's satellites // Icarus. 2001. V.151. PP. 204-227.
4. Kronrod V.A., Kuskov O.L. Chemical differentiation of the Galilean satellites of Jupiter: 1. An internal structure of Callisto's water-ice shell // Geokhimiya. 2003. № 9. PP. 968-983. (Geochem. Intern. 2003. V. 41).
5. Ruiz J. The stability against freezing of an internal liquid-water ocean in Callisto // Nature. 2001. V. 412. PP. 409-411.

*Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(22) 2004
Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии,
петрологии и геохимии 2004 года (ЕСЭМПГ-2004)
URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1/planet-17.pdf
Опубликовано 1 июля 2004 г*

© Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2004

*При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала,
ссылка на "Вестник Отделения наук о Земле РАН" обязательна*