

## ЕВРОПА: МОЩНОСТЬ ВОДНО-ЛЕДЯНОЙ ОБОЛОЧКИ И РАЗМЕРЫ ЯДРА

Кусков О.Л., Кронрод В.А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

[ol\\_kuskov@mail.ru](mailto:ol_kuskov@mail.ru)

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№№ проектов 00-05-64371, 01-05-64318)

**Вестник Отделения наук о Земле РАН, № 1(20)'2002**

URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2002/informbul-1.htm#planet-6](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2002/informbul-1.htm#planet-6)

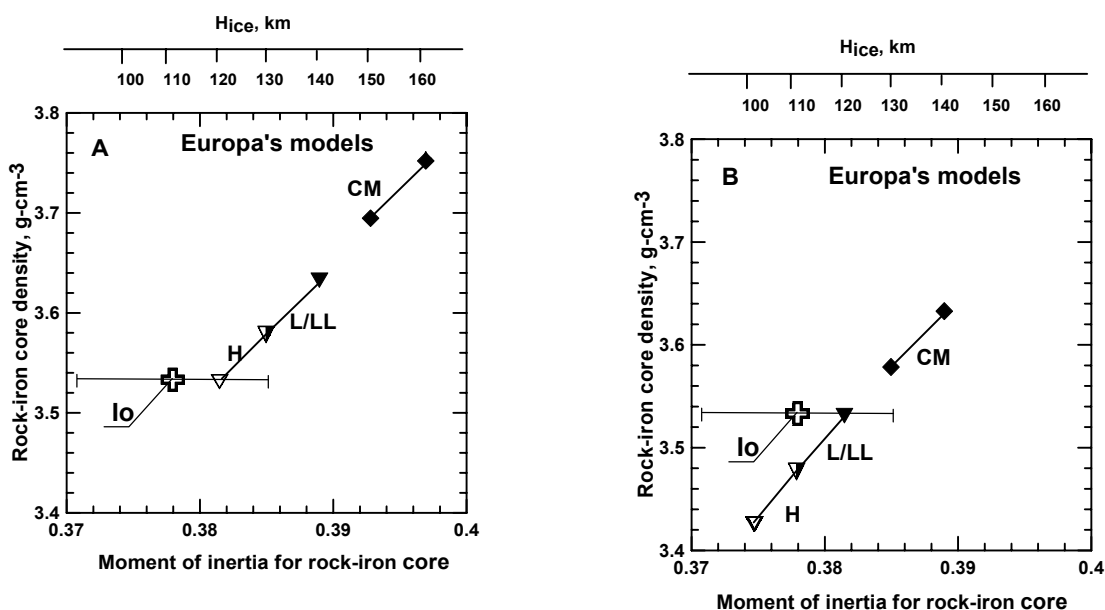
**Введение.** Спутник Юпитера - Европа занимает среднее положение среди галилеевых спутников. Отличительной характеристикой Европы является вероятное присутствие жидкой воды под тонкой ледяной корой, что приводит к гипотезе существования внеземных форм примитивной жизни. Имеются непротиворечивые геологические и геофизические признаки, говорящие о вероятном существовании водного океана под слоем льда. Присутствие водного океана подтверждается последними исследованиями зонда *Galileo* [1-2] по магнитному полю и морфологии ледяной поверхности спутника. Новые гравитационные исследования уточнили значения массы и момента инерции Европы и позволили провести оценки мощности оболочек спутника и размеров ядра [3]. Однако, простота моделей [3] не позволяет судить о химическом составе и минеральном строении спутника. Для понимания химического состава и внутреннего строения Европы требуются более полные модели, основанные на термодинамических, геохимических и геофизических ограничениях. Цель настоящей статьи состоит в определении основных характеристик строения Европы (мощность внешней водно-ледяной оболочки, плотность и состав мантии, размеры и масса ядра) на основе геохимических ограничений на состав обыкновенных и углистых хондритов и данных по моменту инерции и массе спутника. На этой общей основе построены самосогласованные модели химического состава и внутреннего строения Европы.

**Геофизические и геохимические ограничения.** Масса и момент инерции Европы служат основными входными данными для оценок важнейших параметров: (1) мощности водно-ледяной оболочки; (2) химического состава (отношение валового содержания железа к кремнию,  $Fe_{tot}/Si$ ; содержание железа в ядре  $Fe_m$ , где  $Fe_m = Fe^{\circ}$  (металл) + Fe из FeS); (3) массы и размеров ядра.

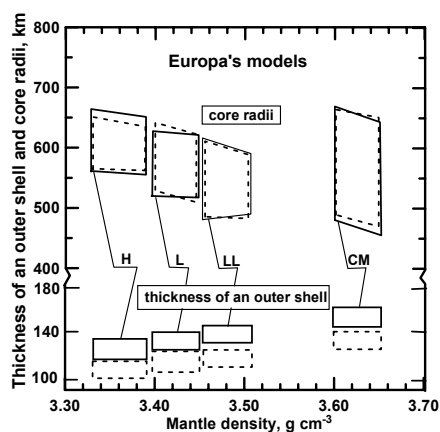
При численном моделировании задавались средняя плотность  $\rho$  ( $2.989 \pm 0.046$  г см<sup>-3</sup>), радиус  $R$  (1565 км), безразмерный момент инерции  $I^{\circ}/MR^2 = 0.346 \pm 0.005$  [3]. Распределения плотности в мантии и радиус ядра находились методом Монте Карло [4]. Рассматривалась пяти-шести слойная модель Европы, включающая водно-ледяную оболочку, трехслойную мантию и ядро. Мощность ледяной оболочки является свободным параметром. Плотность и момент инерции железосиликатного ядра (силикатная мантия + Fe-FeS ядро) зависят только от одной величины - толщины ледяной оболочки. Плотность льда задавалась  $\rho = 0.94$  г см<sup>-3</sup> на глубинах 0-10 км и  $\rho = 1.0$  г см<sup>-3</sup> на больших глубинах.

Если при дифференциации Европы образовалось ядро, то следует ожидать появления легкой коры. Учет плотности и мощности коры приводит к существенным изменениям момента инерции железосиликатного ядра и мощности водно-ледяной оболочки для модели дифференцированной мантии с образованием коры по сравнению с моделью недифференцированной мантии (модель без коры). Мощность коры и ее плотность составляют 60 км и 2.7 г см<sup>-3</sup>. Дополнительные ограничения на плотность мантии Европы получены на основании величин плотности равновесных фазовых ассоциаций, рассчитанных для составов (без летучих) силикатных фракций обыкновенных (H, L/LL) и углистых хондритов [5]. Мы выбрали состав CM хондритов как средний между составами CI (наиболее обогащенные летучими) и CV, CO (обедненные летучими).

Рассматривались две модели состава центрального ядра Европы: Fe-10 мас.%S ( $Fe_{0.84}S_{0.16}$ ,  $\rho = 5.7$  г см<sup>-3</sup>) для L/LL хондритов и FeS-ядро ( $\rho = 4.7$  г см<sup>-3</sup>) для CM хондритов. Фазовый состав и плотность мантии рассчитывались в рамках  $Na_2O$ - $TiO_2$ - $CaO$ - $FeO$ - $MgO$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$  системы, включающей твердые растворы. Расчет фазовых равновесий проводился методом минимизации свободной энергии Гиббса с помощью программного комплекса THERMOSISM [4].



**Рис. 1.** Зависимость момента инерции от средней плотности железокремнистого ядра Европы (хондритовая мантия + Fe-FeS-ядро). Крест соответствует средней плотности ( $3.529 \text{ г см}^{-3}$ ) и моменту инерции  $I_0$  ( $I/MR^2 = 0.378 \pm 0.007$ ).  $H_{sh}$  - мощность водно-ледяной оболочки. Отметим, что положение  $I_0$  ближе к L/LL хондритовой модели Европы, чем к CM хондритовой модели. (A) - недифференцированная мантия (модель без коры), (B) - модель с корой.



**Рис. 2.** Зависимость мощности водно-ледяной оболочки и размеров ядра Европы от плотности дифференцированной (штриховая линия) и недифференцированной мантии (сплошная линия). Мощность оболочки составляет 105-145 км для L/LL хондритовой модели. Модели CM хондритов с наибольшей плотностью мантии соответствуют наибольшей величине  $H_{sh} = 125-160 \text{ км}$ .

**Радиус ядра и мощность водно-ледяной оболочки.** Зависимость между геофизически допустимыми значениями плотности и моментом инерции железокремнистого ядра Европы (рис. 1)

показывает, что мощность водно-ледяной оболочки ( $H_{sh}$ ) и радиус Fe-FeS ядра зависят от распределения плотности в мантии (рис. 2). Если все металлические фазы Fe и FeS сосредоточены в ядре, минимальная плотность мантии соответствует модели H хондритов (малая концентрация FeO), а максимальная плотность - углистым хондритам (высокое содержание FeO). Показано, что допустимые отношения  $Fe_{tot}/Si$  в Европе и количество железа в ядре не согласуется с валовым составом H хондритов.

*Модель L/LL хондритов.* На рис. 1 показано, что состав Европы (мантия+ядро) может быть близок составу L и LL хондритов. Мощность оболочки для L/LL модели составляет  $H_{sh} = 115 \pm 10$  км ( $6.8 \pm 0.6\%$   $H_2O$  от массы спутника) в случае дифференцированной мантии и  $135 \pm 10$  км ( $7.9 \pm 0.5\%$   $H_2O$ ) для модели без коры (рис. 2); радиус ядра  $R_{core} = 505-640$  км;  $Fe_m = M(Fe_m)/M^* = 9.3 \pm 3\%$  для L хондритовой мантии и  $470-620$  км;  $Fe_m = 8.1 \pm 3\%$  для LL мантии (где  $M^*$  масса железокаменного ядра); отношение  $(Fe_{tot}/Si)_{wt} = 0.91-1.32$ . Количество железа в ядре и отношение  $Fe_{tot}/Si$  согласуются с составом L/LL хондритов, что говорит о возможности построения железокаменного ядра Европы из материала близкого по составу к L/LL хондритам.

*Модель CM хондритов.* Высокая плотность CM хондритовой фазовой ассоциации ( $3.60-3.67$  г см<sup>-3</sup>), состоящей в основном из Ol и Cpx, приводит к максимальной величине  $H_{sh} = 125-140$  км ( $7.4-8.2\%$   $H_2O$  от массы спутника) для дифференцированной мантии с корой и  $145-160$  км ( $8.4-9.2\%$   $H_2O$ ) для модели без коры (рис. 2). CM хондриты содержат около  $10\%$   $H_2O$ , что соответствует количеству воды в Европе для CM хондритовой модели. FeS ядро имеет радиус  $450-670$  км с отношением  $Fe_{tot}/Si = 1.43-1.83$ , что находится в хорошем согласии с углистыми хондритами CI, CM, CO, CV, CR, CK. Такое FeS-ядро ( $4.2-13.6\%$  массы железокаменного ядра) соответствует концентрации FeS в CM хондритах ( $8.2$  мас%), но расходится с концентрацией в CI хондритах ( $20$  мас % FeS в пересчете на состав без летучих).

Средняя плотность и момент инерции железокаменного ядра для модели L и LL хондритов ( $\rho^* = 3.476-3.636$  г см<sup>-3</sup> и  $I^* = 0.378-0.389$ ) близки к параметрам Ио (рис. 1). Сопоставление рис. 1 и 2 показывает, что учет коры с малой плотностью ведет к уменьшению момента инерции и мощности оболочки  $H_{sh}$ . Близость значений плотности и момента инерции Ио и железокаменного ядра Европы показывает, что их валовые составы могут быть подобны составам L/LL хондритов.

Данные по определению концентраций основных элементов в астероиде 433 Eros показывают, что состав обыкновенных хондритов может служить хорошим аналогом для этого астероида [6]. Мы также склоняемся к тому, что состав Европы по степени окисления ближе к L/LL хондритам, чем к углистым хондритам. Ледяная оболочка, возможно, сформировалась в результате аккреции сконденсировавшихся льдов воды из холодного протодиска Юпитера уже после образования железокаменного ядра. Температура плавления льда I понижается до  $251$  К при  $0.21$  GPa (лед-I – лед-III – тройная точка), что говорит о возможном существовании жидкой воды под слоем льда. Мощность внешнего слоя (лед + вода) составляет  $115 \pm 10$  км для L/LL-хондритовой мантии с корой и  $135 \pm 10$  км для мантии без коры.

## References

1. Pappalardo R.T. et al. (1999) J. Geophys. Res. 104E: 24015.
2. Kivelson M.G. et al. (2000) Sci. 289: 1340.
3. Anderson J.D. et al. (1998) Sci. 281: 2019.
4. Kuskov O.L., Kronrod V.A. (2001) Icarus. 151: 204.
5. Jarosewich E. (1990) Meteoritics 25: 323.
6. Trombka J.I. et al. (2000). Sci. 289: 2101.