

ОКЕАНЫ НА ЛЕДЯНЫХ СПУТНИКАХ ЮПИТЕРА И САТУРНА



О.Л. Кусков

**Институт геохимии
им. В.И. Вернадского РАН**

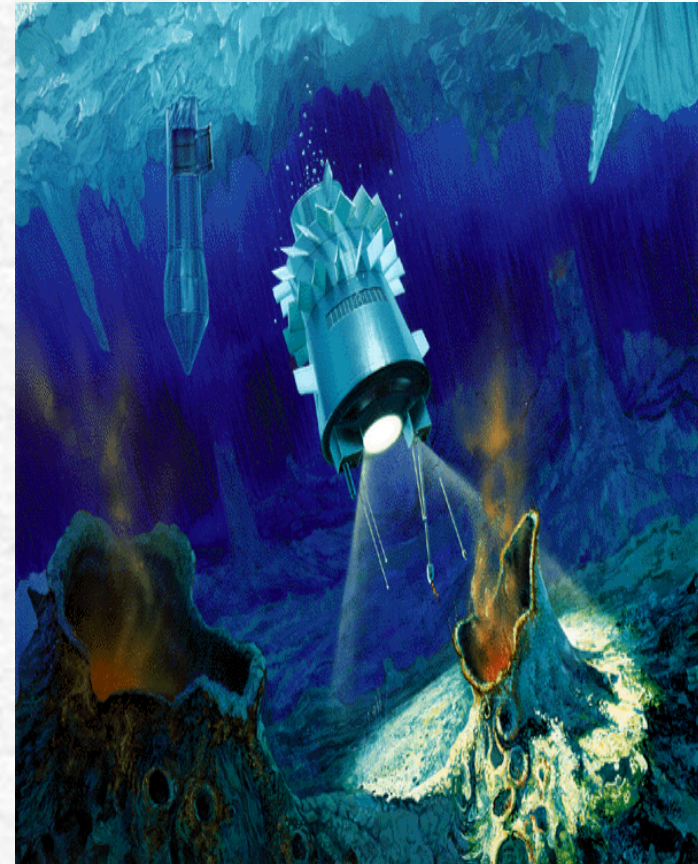
Сагитовские чтения – 2009

Спутники Юпитера и Сатурна

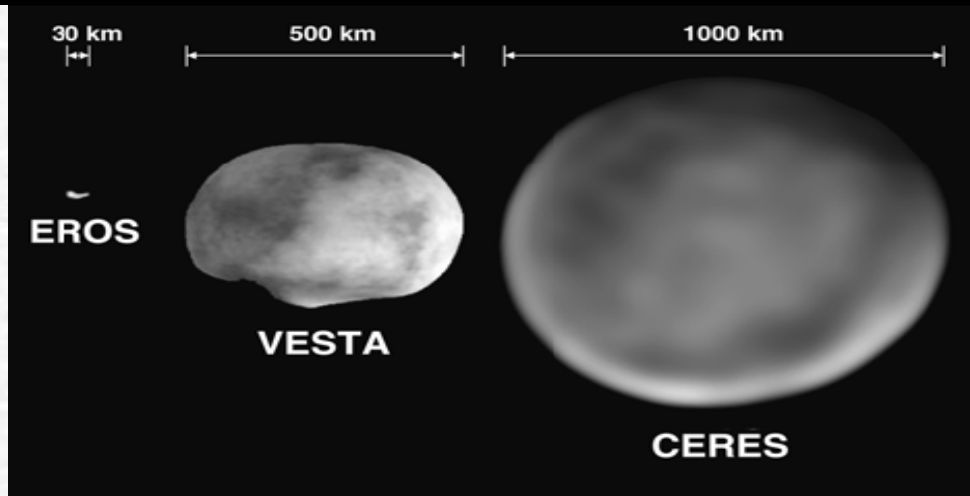
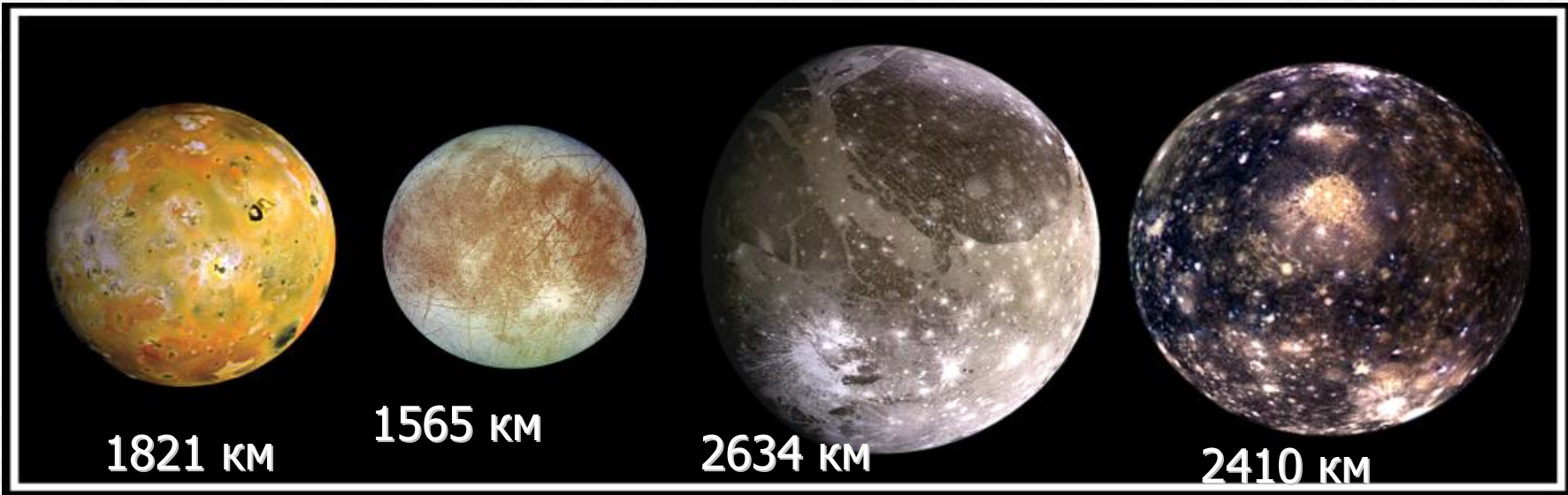
Основные факты:

открыто более **150** спутников.

- ☞ Водяной лед - основная составляющая вещества спутников (Европа, Ганимед, Каллисто, Титан, Энцелад, Тритон, Харон и др.)
- ☞ «Pioneer, Voyager, Galileo, Cassini» - ледяные миры систем Юпитера и Сатурна.
- ☞ В системе Юпитера обнаружено 63 спутника, галилеевы спутники – Ио, Европа, Ганимед, Каллисто.
- ☞ В системе Сатурна – 60 (Титан). В 2005 г. на Титан опустился спускаемый аппарат «Гюйгенс».
- ☞ **Основные вопросы и задачи:**
- ☞ (1) Модели состава и внутреннего строения Европы, Ганимеда, Каллисто, Титана;
- ☞ (2) Наличие океанов;
- ☞ (3) Существование примитивной жизни;
- ☞ (4) Состав и происхождение атмосферы Титана – одна из важнейших задач миссии «Кассини-Гюйгенс».



Галилеевы спутники

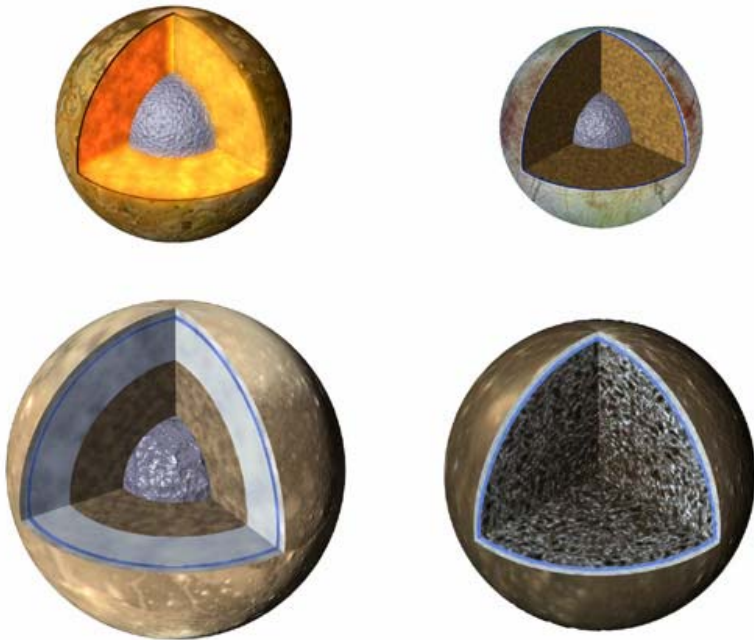


Характеристики спутников

	ρ , г/см ³	R, км	I/MR ²
Ио	3.53	1821	0.37685
Европа	2.99	1565	0.346
Ганимед	1.94	2634	0.3105
Каллисто	1.84	2410	0.3549

- Средние плотности уменьшаются с расстоянием от Юпитера, что указывает на более высокое содержание льда H₂O в составе внешних ледяных спутников.
- Уникальные сведения, полученные во время пролетов "Галилео", привели к целому ряду сенсационных сообщений о тектонической, вулканической и криовулканической активности спутников, наличии магнитных полей, металлических ядер и океанов на ледяных спутниках. Такая же уникальная информация получена и от пролетов "Кассини" вокруг Сатурна и его спутников, о химическом составе и внутреннем строении которых практически ничего неизвестно.

Основные задачи



- (1) Определение мощности и агрегатного состояния водно-ледяных оболочек спутников.
- (2) Степень дифференциации спутников на оболочки (силикатная кора, ледяная литосфера, водный океан, мантия, ядро); определение массы и размеров металлических Fe-FeS-ядер.
- (3) Построение современных моделей химического состава и внутреннего строения ледяных спутников, согласованных с данными геофизики и космохимии.

Фактические данные, Модели, Ограничения

Геолого-геофизические данные КА Galileo, Cassini-Huygens

- 1 – Космические снимки, спектральные данные, морфология поверхности – вулканы, кратеры, разломы
- 2 - Тепловой поток, магнитное поле,
- 3 - Гравитационное поле - момент инерции, плотность, масса,
- 4 - **Водно-ледяная оболочка** - агрегатное состояние и мощность с учетом фазовой диаграммы H₂O и льдов I-VII при высоких давлениях,
- 5- Состав и происхождение атмосферы спутников Сатурна – Титан, Энцелад

Модель: Рассматривается пяти-шести-слойная модель спутника, включающая водно-ледяную оболочку, трехслойную мантию и Fe-FeS ядро.

Геохимические данные - вещество метеоритов - обыкновенных (H, L, LL) и углистых (CI,CM,CV) хондритов,

Ядро: Fe-FeS, Fe, Fe-10%S, FeS

Аппарат моделирования

Термодинамика - Расчет фазовых равновесий при высоких P-T параметрах Na₂O-TiO₂-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O.

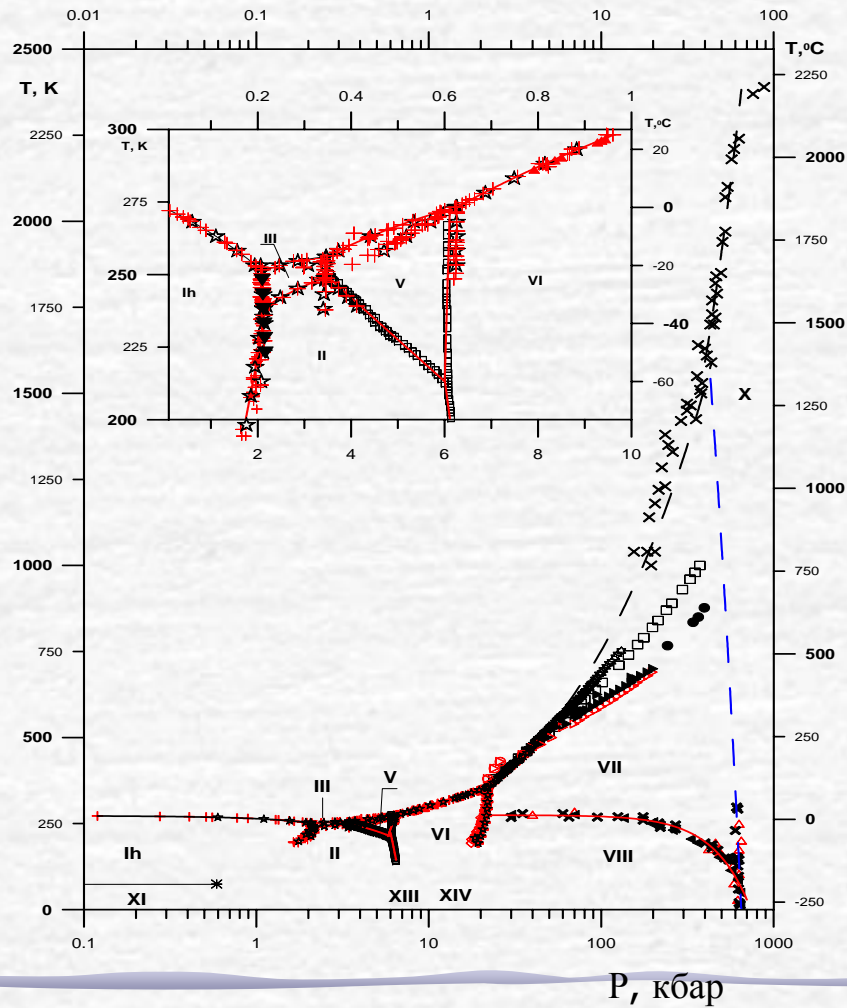
Уравнения состояния минералов – Ми-Грюнайзена-Дебая

Уравнения состояния льдов + фазовая диаграмма H₂O

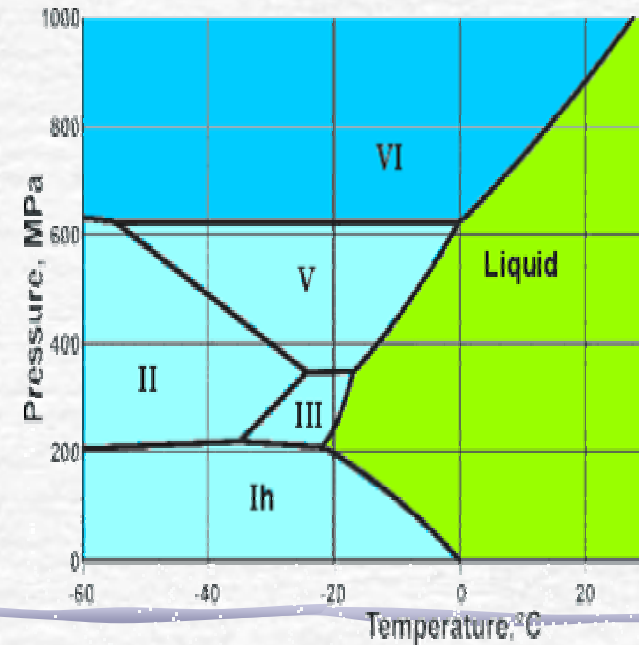
Метод Монте-Карло -

распределение плотности в мантии и размеры ядра находятся в одновременном цикле решением оптимизационной (обратной) задачи.

Фазовая диаграмма H_2O

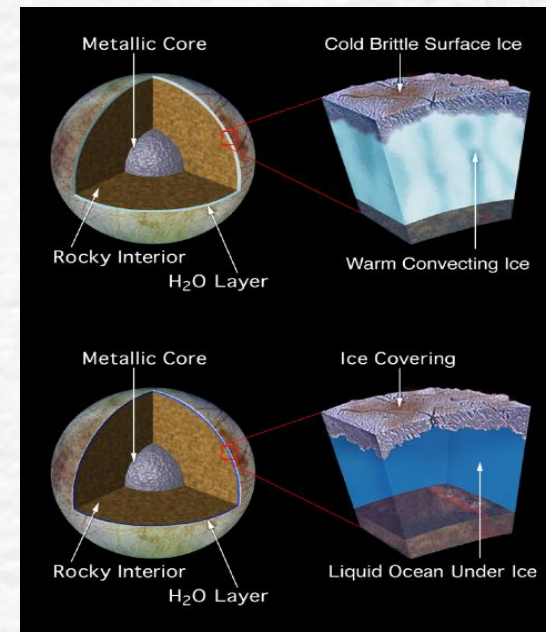
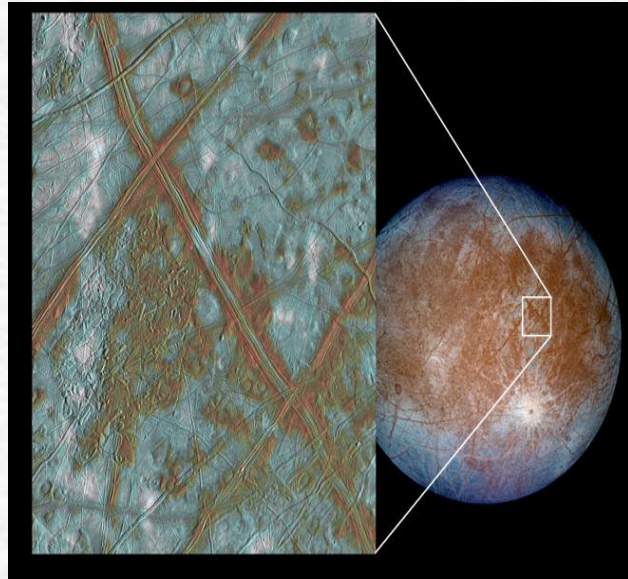


- одна из наиболее сложных - более дюжины фаз льда. $T_{пл}$ льда-I понижается до 251 К с ростом давления до ~ 2 кбар - тройная точка (вода - лед-I - лед-III) - возникает возможность существования **внутреннего океана**.



Поверхность и модели Европы

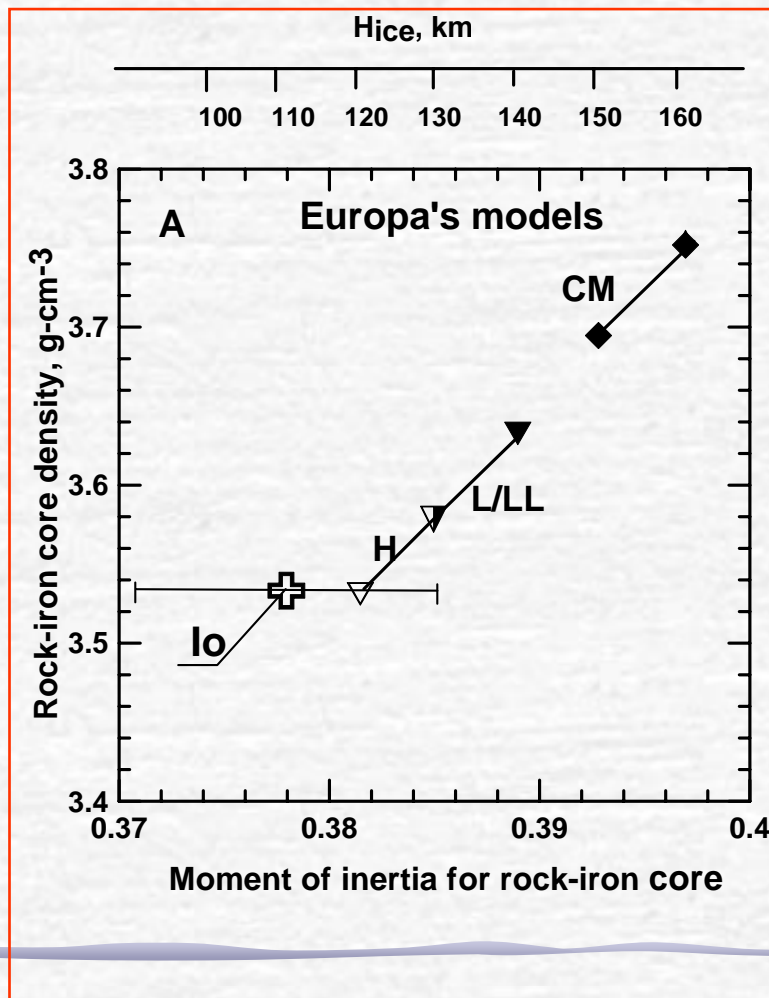
$$\rho = 2.989 \text{ г/см}^3, R = 1565 \text{ km}, I/MR^2 = 0.346 \pm 0.005$$



- ✓ **Поверхность спутника - трещины в ледяной коре шириной до 200 км (диапиризм, криовулканизм), океан в прошлом или существует сейчас.**
- ✓ **Модели водно-ледяной оболочки:**
- ✓ **(1) сплошной слой льда;**
- ✓ **(2) внутренний океан под оболочкой льда-I.**

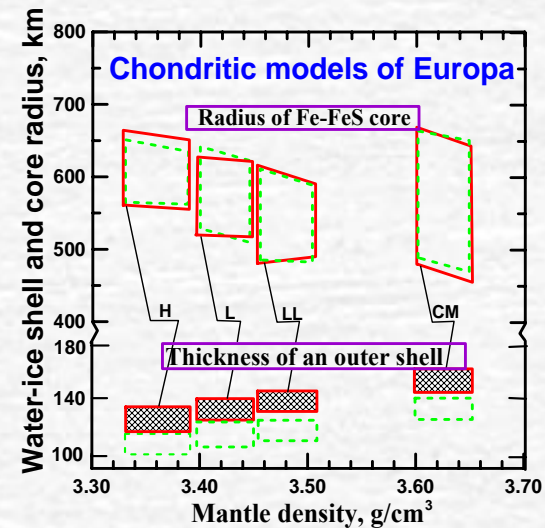
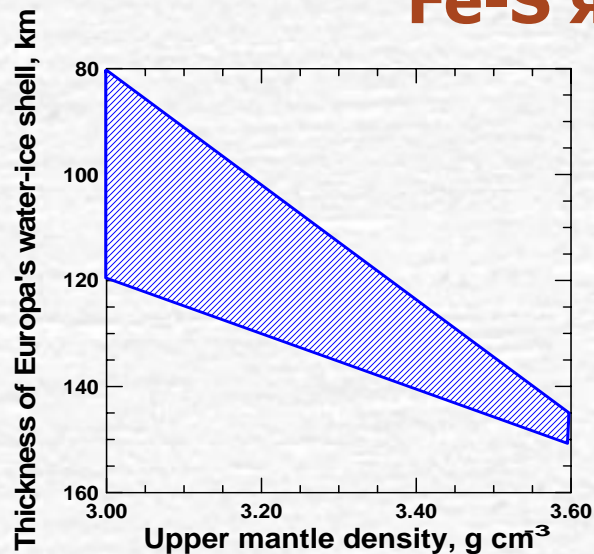
Космохимические модели Европы.

Момент инерции и средняя плотность железокремнистого ядра (без H₂O оболочки)



- Масса и момент инерции Европы служат основными входными данными для оценок важнейших параметров: (1) мощности водно-ледяной оболочки; (2) химического состава (отношение Fe_{tot}/Si ; содержание железа в ядре); (3) массы и размеров ядра.
- Крест соответствует **средней плотности** (3.529 г/см³) и **моменту инерции I_0** ($I/MR^2=0.378\pm 0.007$). Отметим, что положение I_0 ближе к H/L/LL хондритовой модели Европы, чем к C- хондритовой модели.
- Только из геофизических данных состав спутников Юпитера может быть описан **любой** хондритовой моделью.

Мощность водно-ледяной оболочки и размеры Fe-S ядра Европы



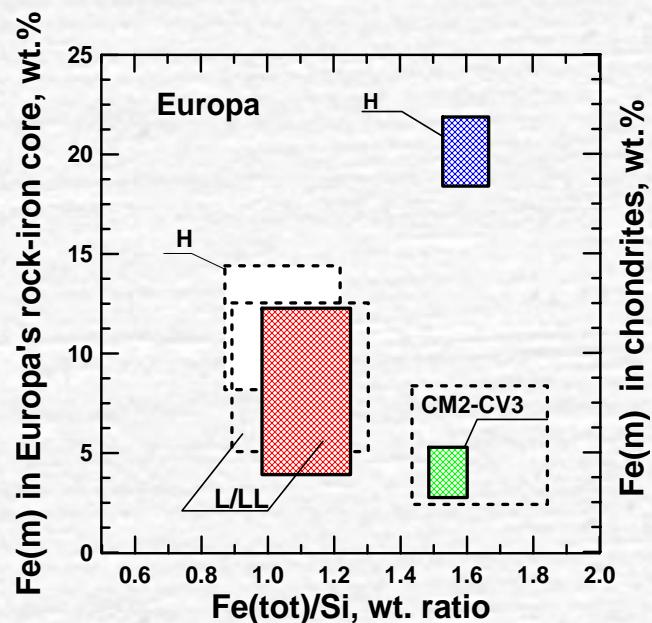
Решением обратной задачи методом Монте-Карло получен спектр геофизически допустимых ограничений на мощность H₂O-оболочки в зависимости от плотности мантии. Мощность H₂O-оболочки – 80-160 км, на порядок больше глубин земного океана. Присутствие водного океана подтверждается (косвенно) исследованиями *Galileo* по магнитному полю и морфологии ледяной поверхности спутника.

L/LL хондритовая модель: R(Fe-10%S-ядро) = 470-640 км; H(H₂O) ~ 110-140 км.

CM хондритовая модель: R(FeS-ядро) = 450-670 км; H(H₂O) ~ 150-160 км.

Элементные отношения.

Состав железокремнистого ядра Европы



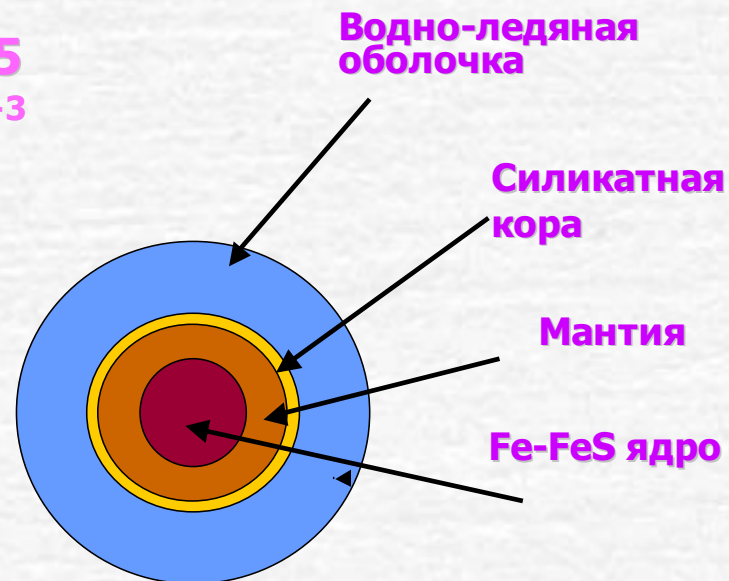
R_E , km	R (Fe-10%S -core), km	R_{ice} , km	M_{ice} , %
1565	470-640	110-140	6-8

- Геохимические ограничения:**
 - пустые области – модели Европы, заштрихованные – хондриты. Рис. детализирует состав спутника, т.к. позволяет сопоставить валовый химический состав железокремнистого ядра Европы с тем или иным классом хондритов.
- Элементные отношения:** количество железа, сульфида железа и Fe_{tot}/Si -отношения согласуются с составом обыкновенных L/LL хондритов.
- Модели C и H-хондритов- маргинальные.
- Лишь L/LL модели пригодны в качестве строительного материала сухого ядра Европы.
- Спутники Юпитера могли формироваться из одинакового набора планетезималей, близких к валовому составу родительских тел обыкновенных L/LL-хондритов.

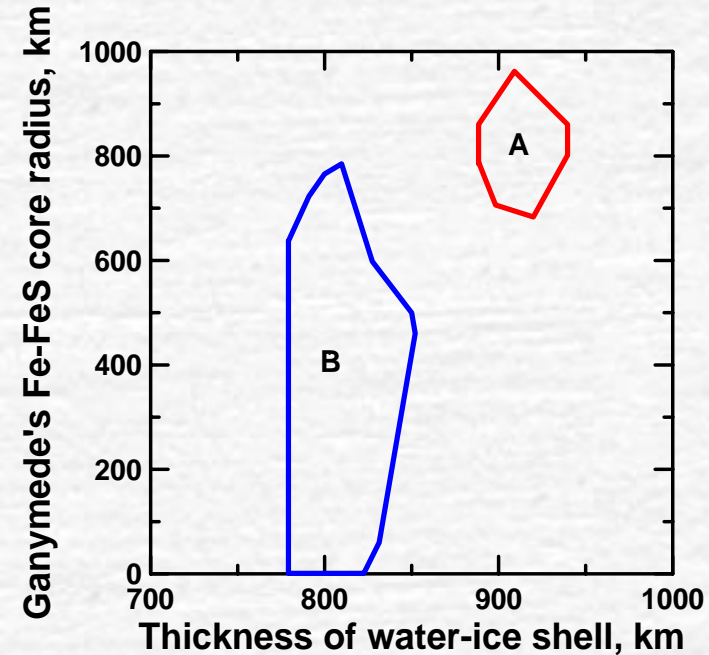
Ганимед – самый крупный спутник Солнечной системы

Модель Ганимеда

$R=2634 \text{ km}$
 $I/MR^2=0.3105$
 $\rho=1.936 \text{ g cm}^{-3}$

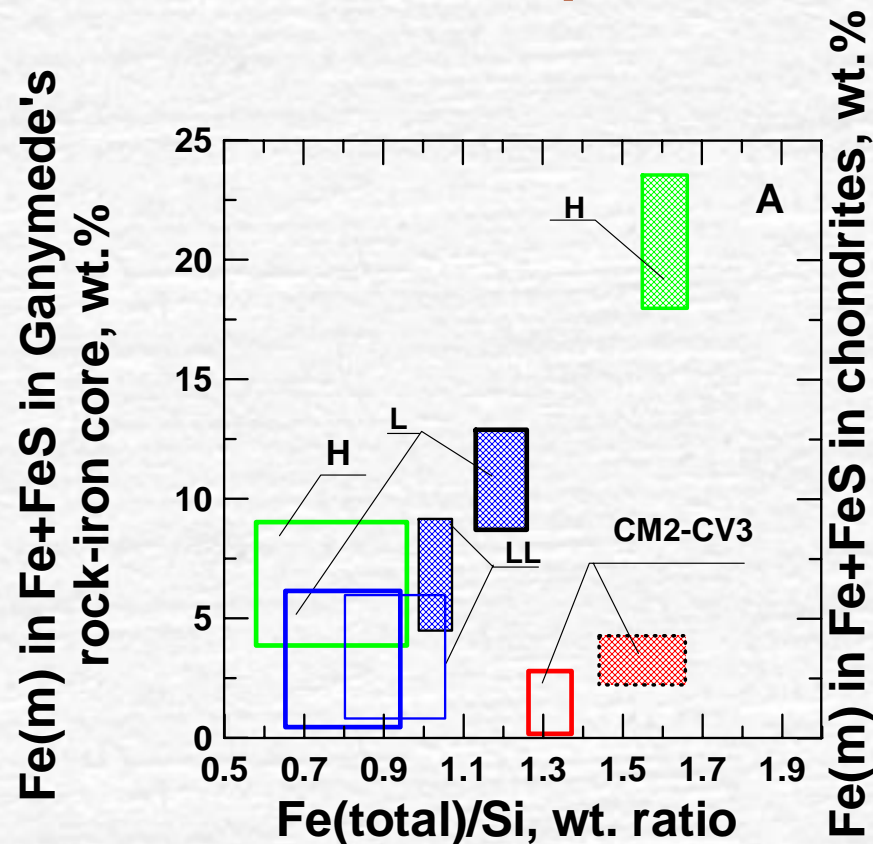


Модели Ганимеда



- ❏ (A) - модель с оболочкой из льдов высокого давления мощностью 900 км.
- ❏ (B) - модель с внутренним океаном и ледяной литосферой (лед-I) мощностью 30-120 км, под которой находится слой воды и льдов высокого давления; мощность водно-ледяной оболочки – 800 км.
- ❏ R(Fe-FeS-ядро) = 800-950 км.

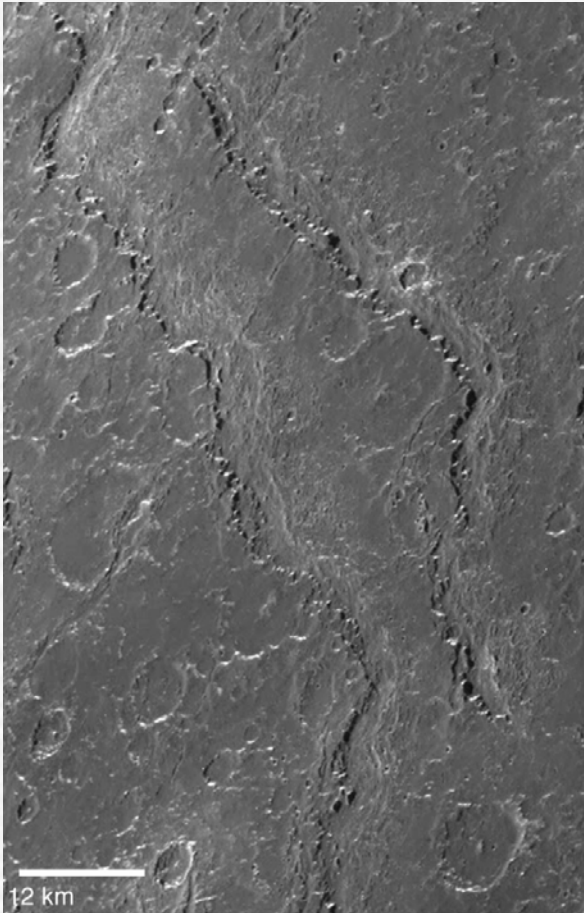
Модели Ганимеда с Fe-FeS-ядром и океаном под ледяной корой



- Элементные отношения для железокаменного ядра (пустые области) и хондритов (заштриховано). Модель исключает вещество H-хондритов и углистых хондритов в качестве аналога материала для Fe-S-ядра Ганимеда (как и для Европы).
- При L/LL-хондритовом составе реализуются модели Ганимеда как с ледяной оболочкой, так и с внутренним океаном.
- Источник магнитного поля остается неясным. Stevenson (2003) связывает наличие магнитного поля Ганимеда с расплавленным Fe-S ядром. Kivelson et al. (2002) - с океаном на глубине 150 км.

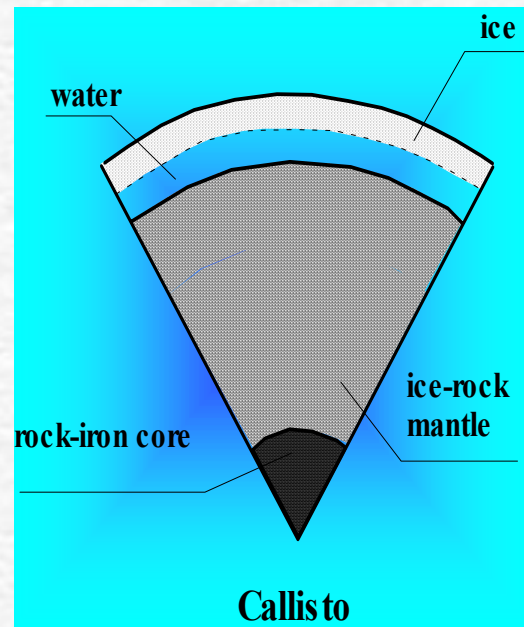
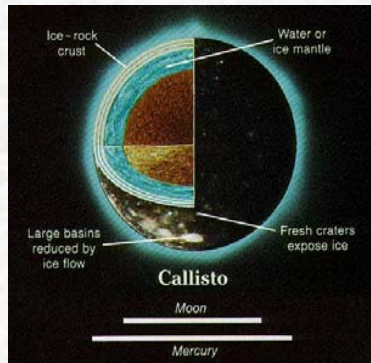
Каллисто

$R=2410$ км, $I^*=0.3549$, $\rho=1.834$ г/см³



- Поверхность Каллисто - наиболее древняя среди галилеевых спутников – покрыта множеством кратеров (сотни км в диаметре); тектоническая активность не выявлена.
- Размеры и плотность Каллисто и Ганимеда сопоставимы. Оба спутника состоят из смеси льдов H₂O и железокремнистого ядра, которое может быть **дифференцированным** на силикатную мантию и центральное Fe-FeS-ядро (**Европа, Ганимед**) или **недифференцированным** (смесь силикатов и Fe-FeS) как у **Каллисто**.

Модель Каллисто

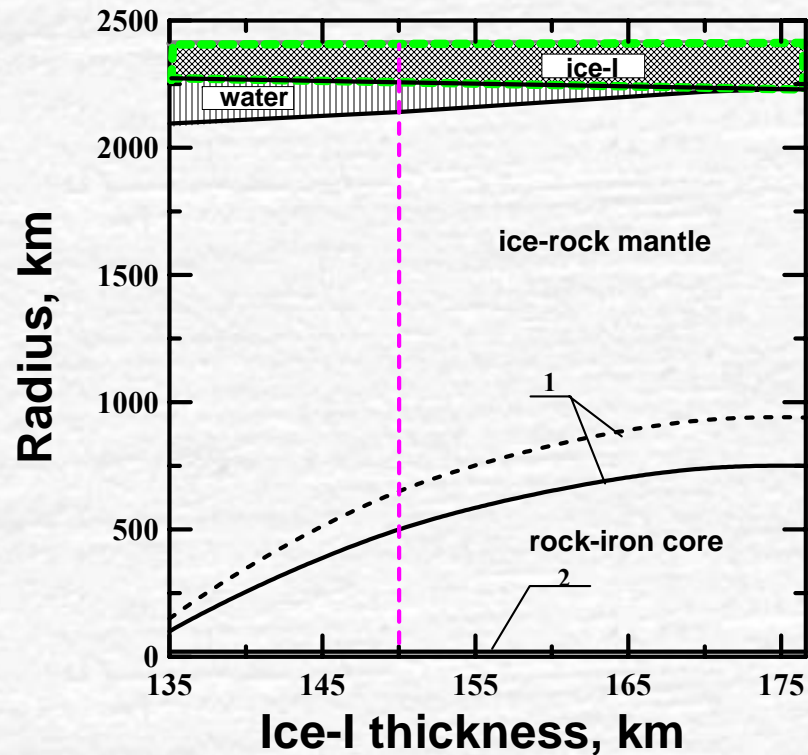


модель из трех химически разных оболочек:

- (1) внешней водно-ледяной оболочки (ледяная кора из льда-I ± подстилающий водный слой (океан) ± льды высокого давления);
- (2) каменно-ледяной мантии, состоящей из смеси льдов высокого давления и хондритового материала (силикатов и/или гидросиликатов + Fe-FeS сплав);
- (3) центрального железокремнистого (Fe-Si) ядра, не содержащего льда.

Концентрация льда H₂O в каменно-ледяной области переменна по глубине и может изменяться от 100% (чистый лед) до полного отсутствия льда (Fe-Si-компонента). Их соотношения в спутнике подлежат определению.

Модель Каллисто с внутренним океаном



- Ледяная литосфера: 135-150 км, Океан мощностью 120 - 180 км,
- Общая мощность водно-ледяной оболочки ~ 270 -315 км.
- Каллисто представляет особый случай планетарного тела, состоящего из недифференцированной каменно-ледяной области, в которой не происходило разделение льда и скального материала, и имеющего в центре железокремниевое ядро (свободное от льда).

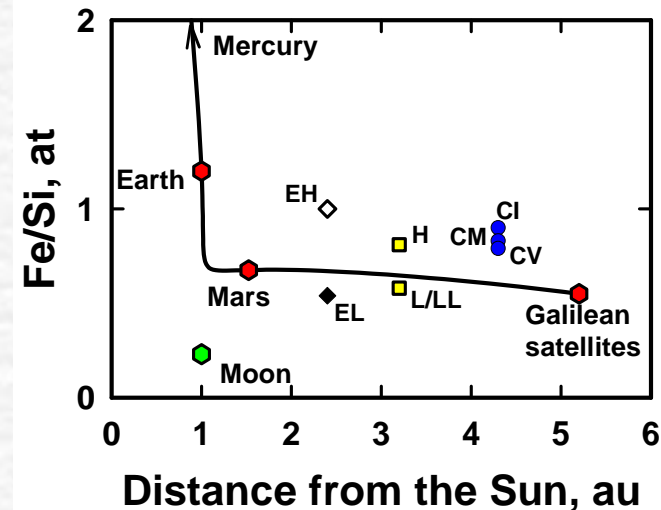
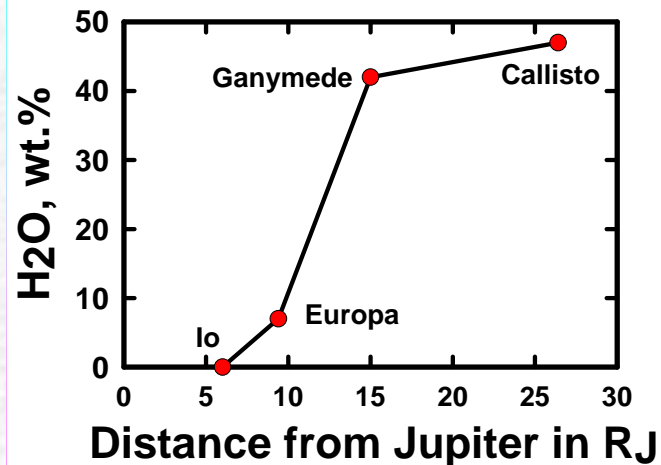
Наличие океана согласуется с магнитометрическими данными Galileo.

Водно-ледяные оболочки

Оболочка, км	Каллисто (Kuskov, Kronrod, Icarus, 2005)	Титан (Sohl et al. Icarus, 2003)	Ганимед (Kuskov, Kronrod, Icarus, 2001)
Ледяная кора, лед-I	150	70	120
Океан	150	220	140
вода + льды-V-VI	0	600	600
Полная мощность H ₂ O оболочки	300	900	850

- Ганимед – дифференцированный спутник с Fe-S ядром.
- Титан – дифференцированный спутник без Fe-S ядра.
- Каллисто представляет особый случай планетарного тела, состоящего из недифференцированной каменно-ледяной области, в которой не происходило разделение льда и скального материала, и имеющего в центре железокремниевое ядро (свободное от льда).
- Все три спутника имеют внутренние океаны ?

H₂O и Fe/Si-фракционирование в Солнечной системе



- Характерная особенность ледяных спутников - присутствие льдов (до 50 мас %), в основном льда H₂O, но также и льдов метана, аммиака и других. Образование тел внешней Солнечной системы происходило при температурах ниже $T_{\text{конд}}$ льда H₂O.
- Ио – безводный спутник, Европа - 6-8%. Содержание H₂O в виде воды, льдов и водных минералов в Ганимеде, Каллисто и Титане около 50%.

Заключение: Океаны на ледяных телах и Будущие проекты

Предполагаемые океаны на ледяных телах



при кондуктивном транспорте тепла в слое льда-I (Ruiz, 2005), можно ожидать, что слой воды существовал или существует как на крупных спутниках, так и на телах среднего размера типа объектов пояса Койпера



- ❏ (1) Европа и Ганимед дифференцированы на водно-ледяную оболочку, кору, безводную мантию и железо-сульфидное ядро.
- ❏ Титан и Каллисто – частично дифференцированные спутники.
- ❏ (2) Галилеевы спутники различаются по содержанию воды, но не по содержанию петрогенных элементов (валовому составу). Они могли формироваться из одинакового набора планетезималей, близких к составу родительских тел обыкновенных L/LL-хондритов.
- ❏ (3) Построенные модели водно-ледяной оболочки предполагают устойчивость (незамерзание) океана под ледяной корой Каллисто, что согласуется с магнитометрическими исследованиями "Галилео". Для Ганимеда и Титана возможны модели с океаном.
- ❏ (4) **Ложка дегтя.** Малая толщина водно-ледяной оболочки Европы и близкие плотности воды и льда не позволяют доказать или опровергнуть наличие океана.
- ❏ (5) Обсуждаются проекты запуска орбитального аппарата на Европу. Космический зонд будет оснащен длинноволновым радаром, позволяющим определить наличие или отсутствие водного слоя под ледяной корой. Пробы грунта, наличие примитивной жизни ...