

Коллоквиум

Земля на ранних этапах развития солнечной планетной системы

28-30 ноября 2016 года, ГАИШ МГУ

# Экзобиологический потенциал ледяных спутников планет-гигантов

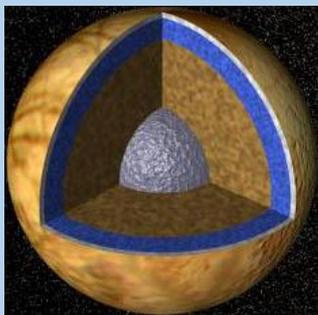
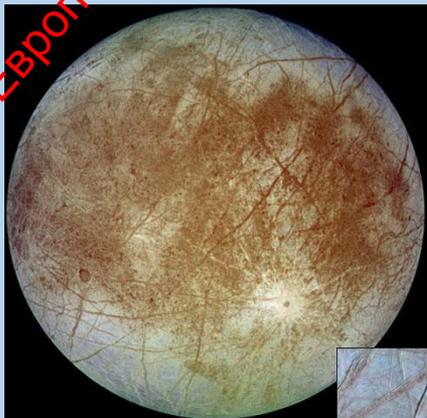


*жидкая вода*  
*органическое вещество*  
*энергия*

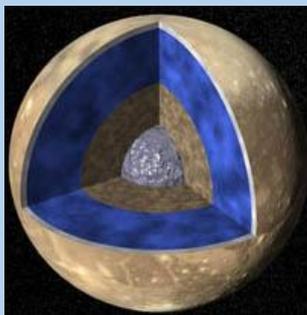
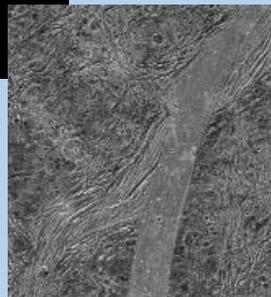


# Ледяные спутники

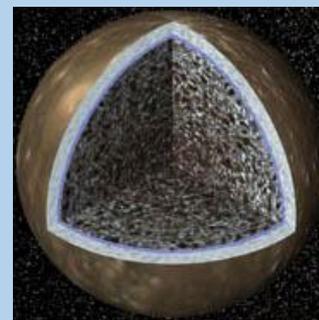
Европа



Ганимед



Каллисто



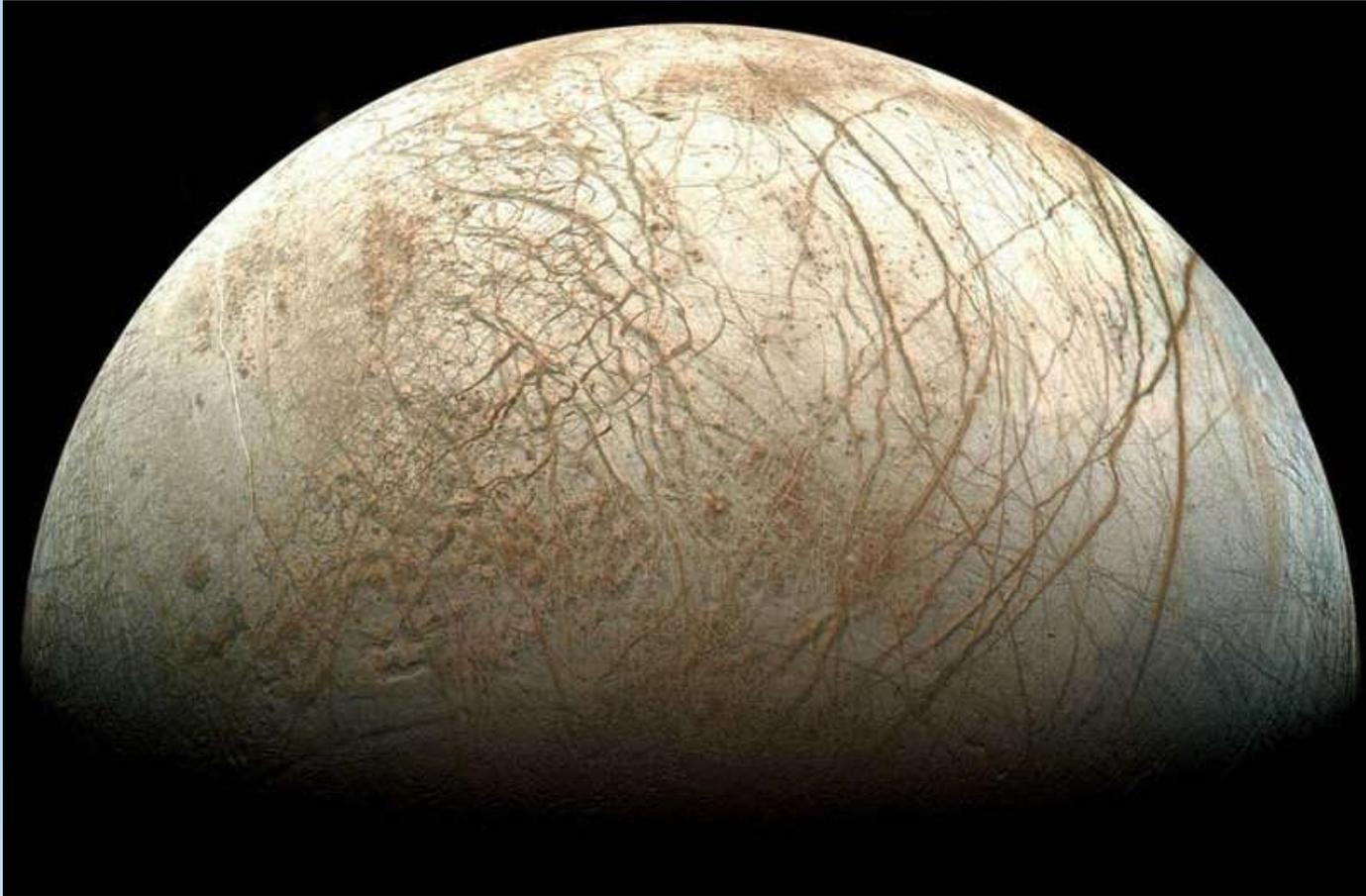
Титан



Энцелад

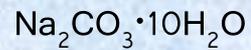
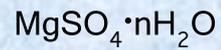


# *Европа*

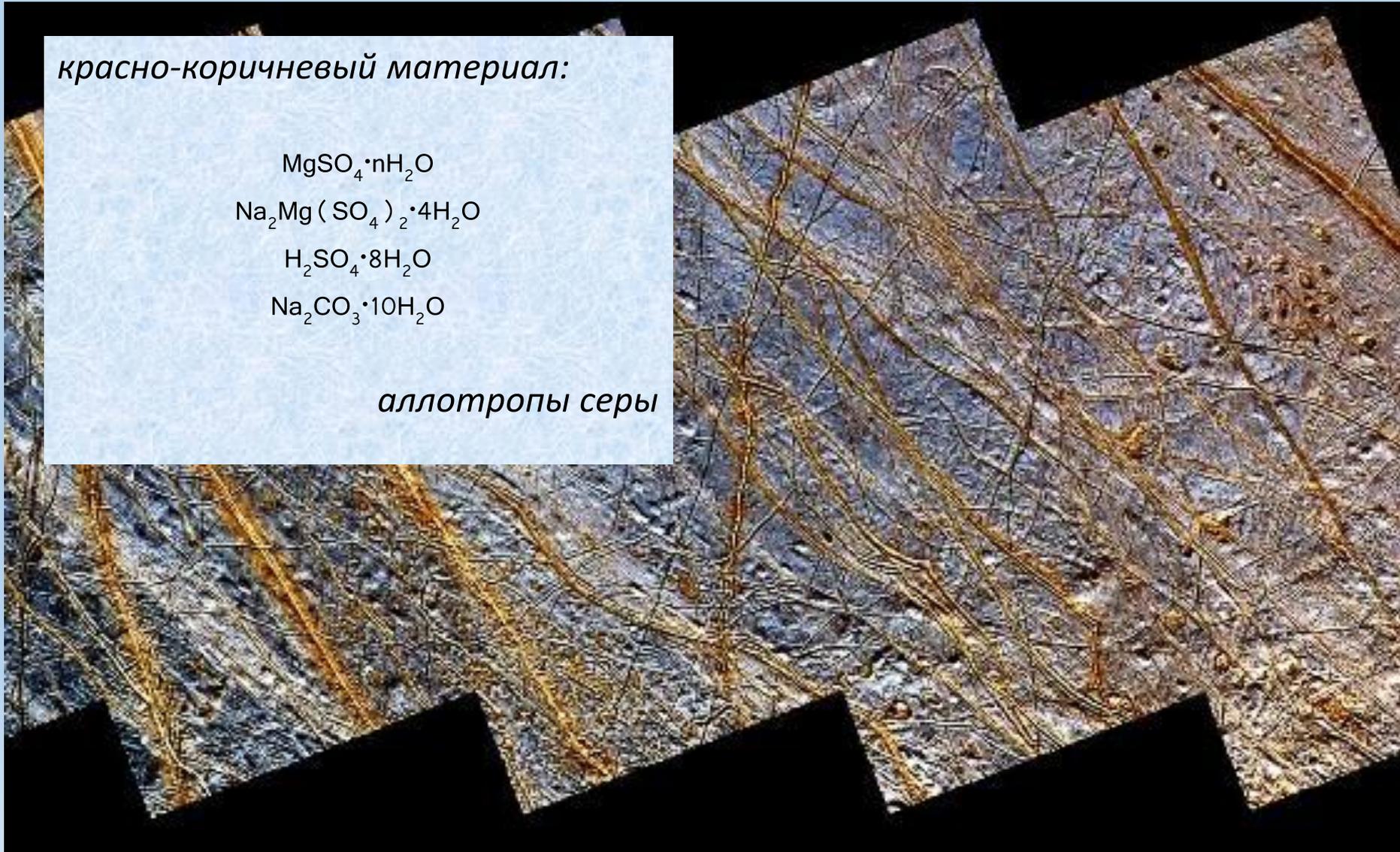


# поверхность Европы

*красно-коричневый материал:*



*аллотропы серы*



# Европа на Земле



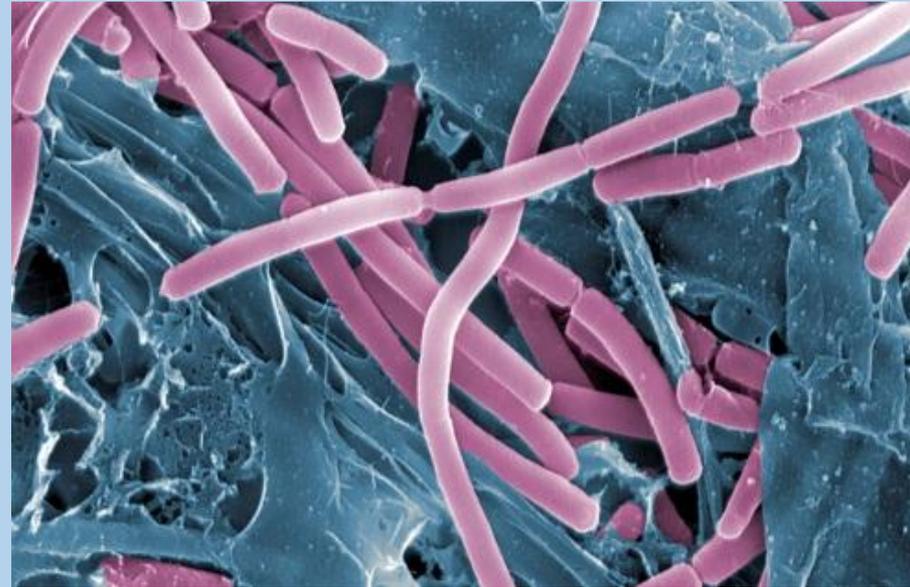
Борап Фьорд Пасс (Borup Fiord Pass), Канада

# моделирование условий внутри Европы

NaCl,  
MgCl<sub>2</sub>  
Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
MgSO<sub>4</sub>

$a_w$  от 1 до 0,955

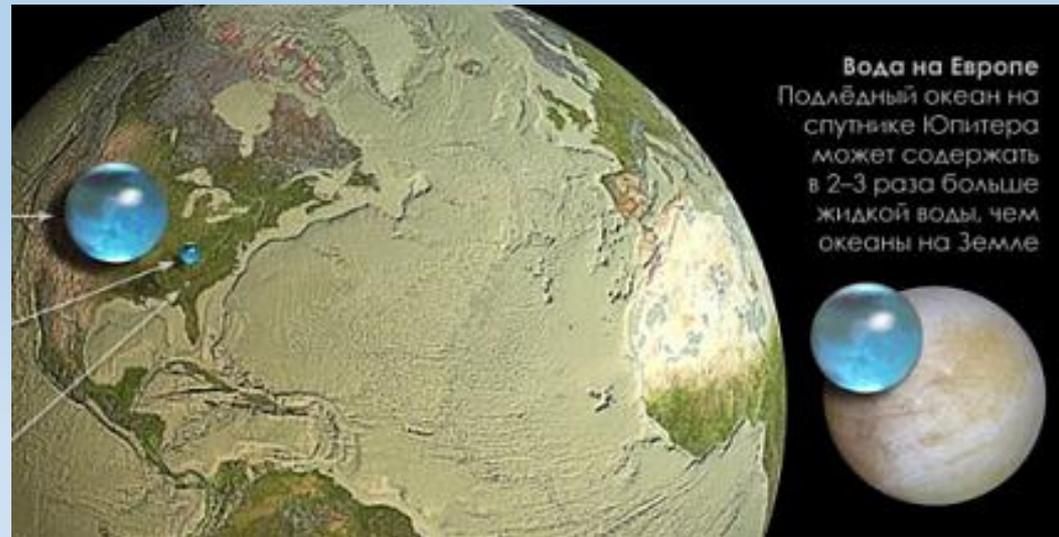
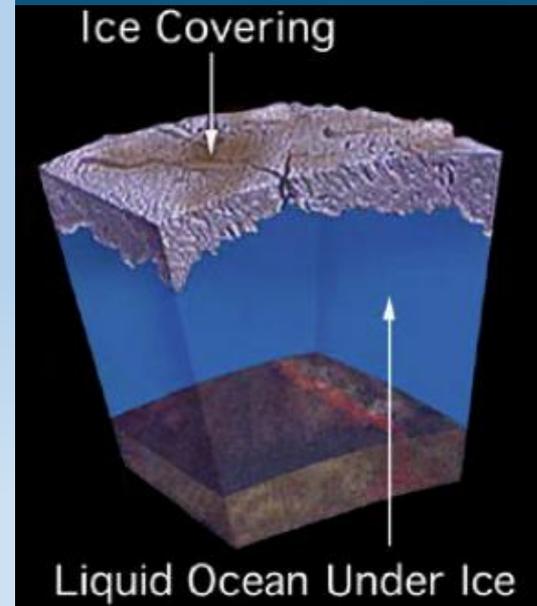
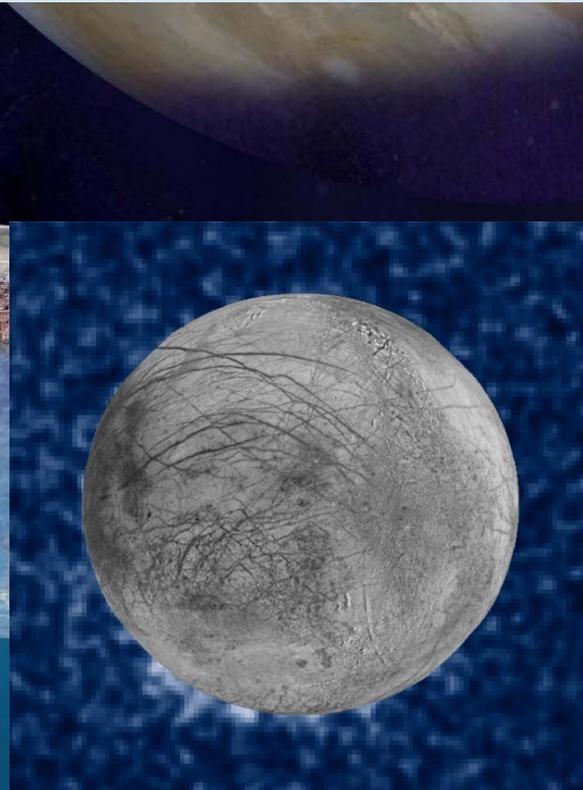
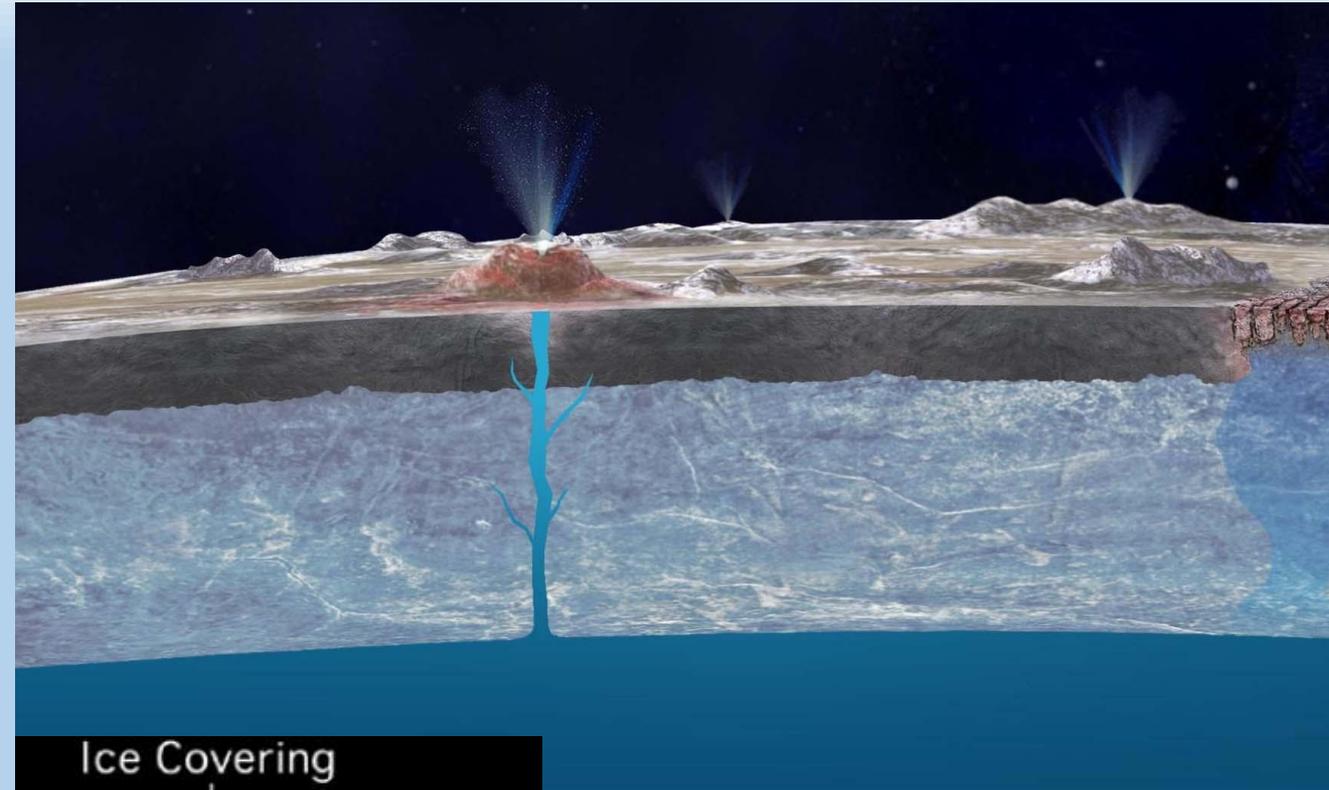
*Bacillus pumilus*  
*Halomonas halodurans*  
*Salinibacter ruber*



Даже обычные, не галофильные, бактерии способны адаптироваться к среде, содержащей большое количество солей океана Европы.

(от 2.4 to 220.3 г MgSO<sub>4</sub> на литр)

# внутреннее строение



# космические миссии к Европе

«Европа-Клипер» (США)  
9 научных инструментов



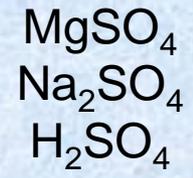
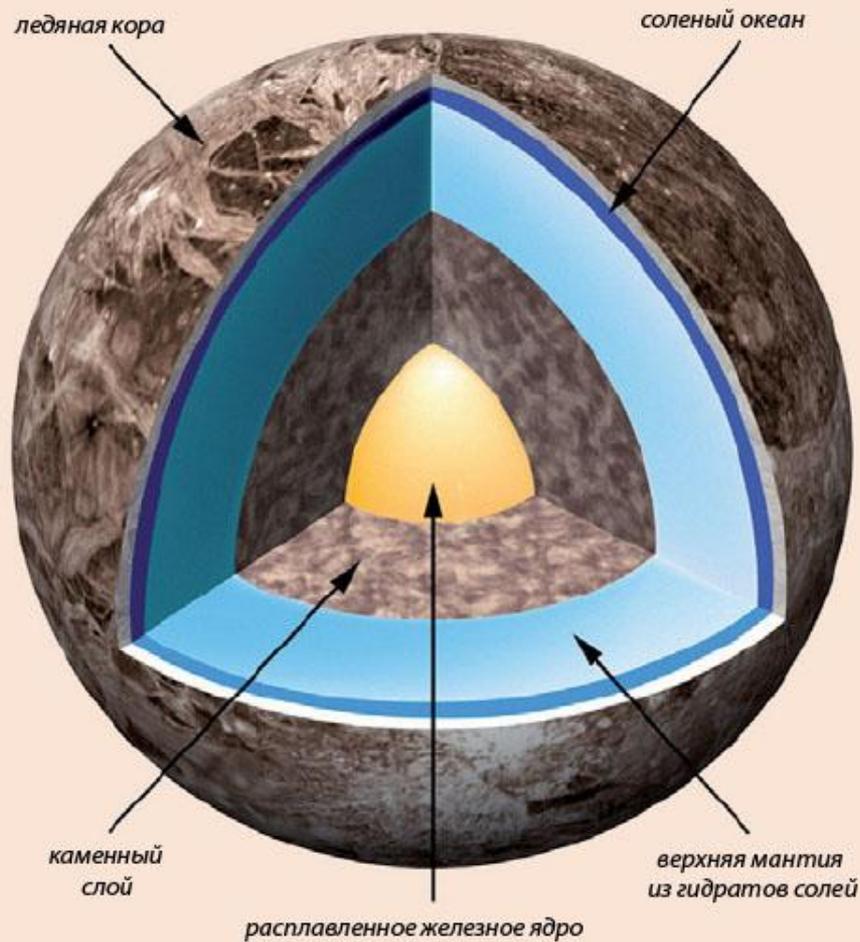
JUICE (Россия-Европа)  
2022 год



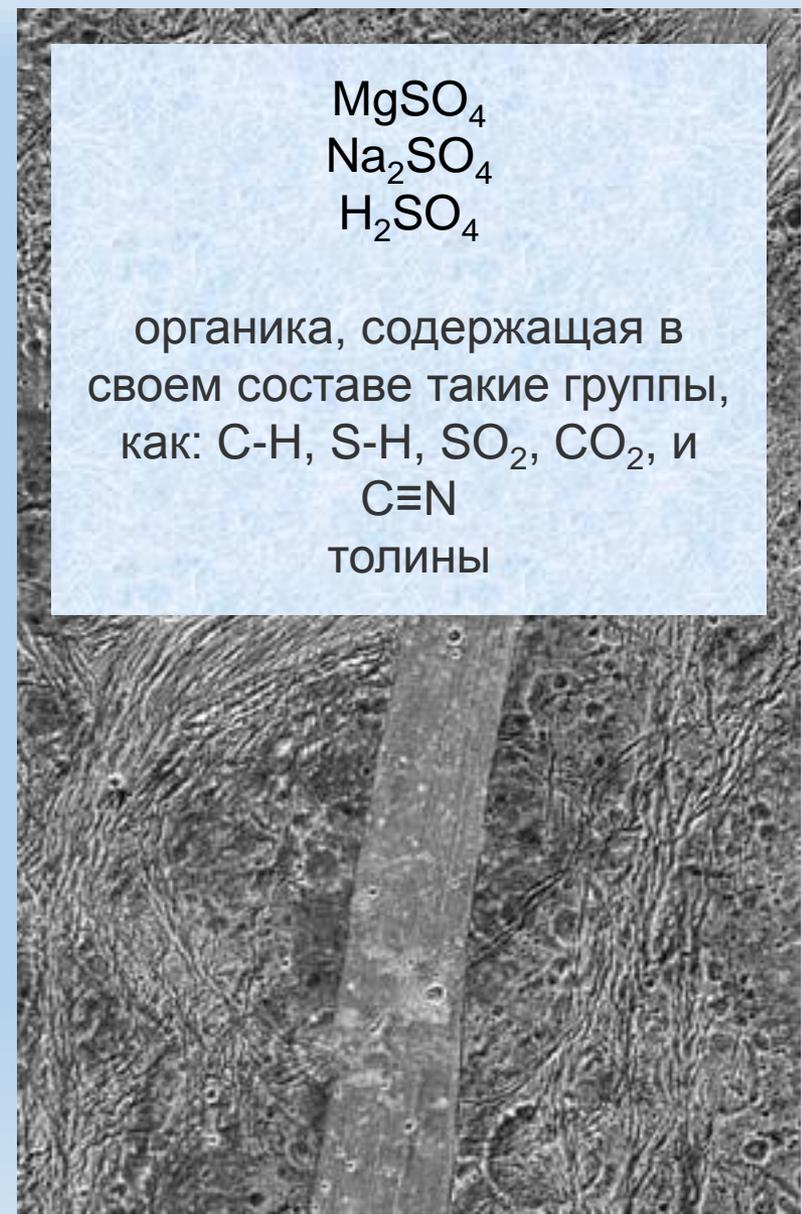
# Ганимед



# внутреннее строение Ганимеда



органика, содержащая в своем составе такие группы, как: C-H, S-H, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, и C≡N  
ТОЛИНЫ



Лед

Лед

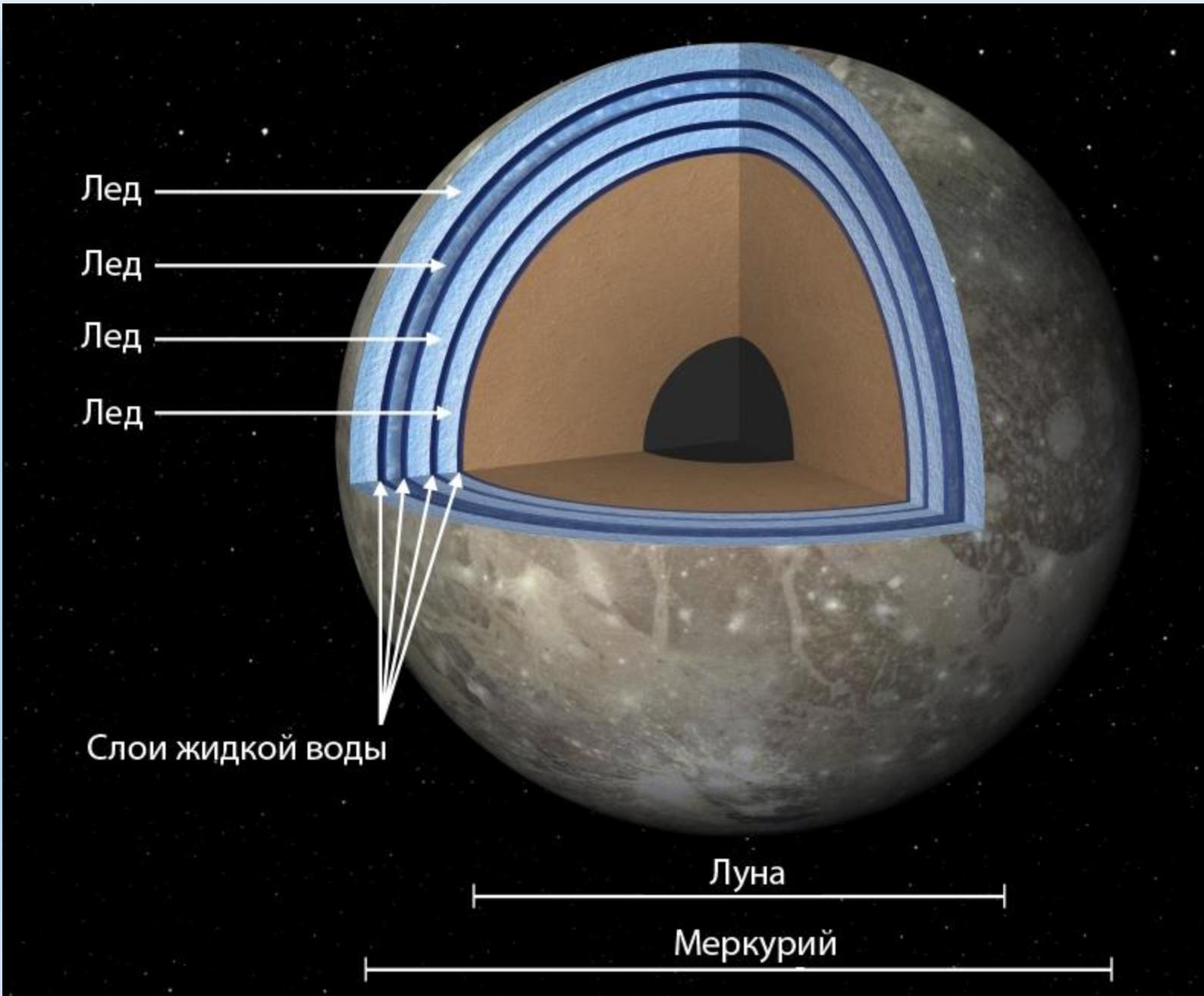
Лед

Лед

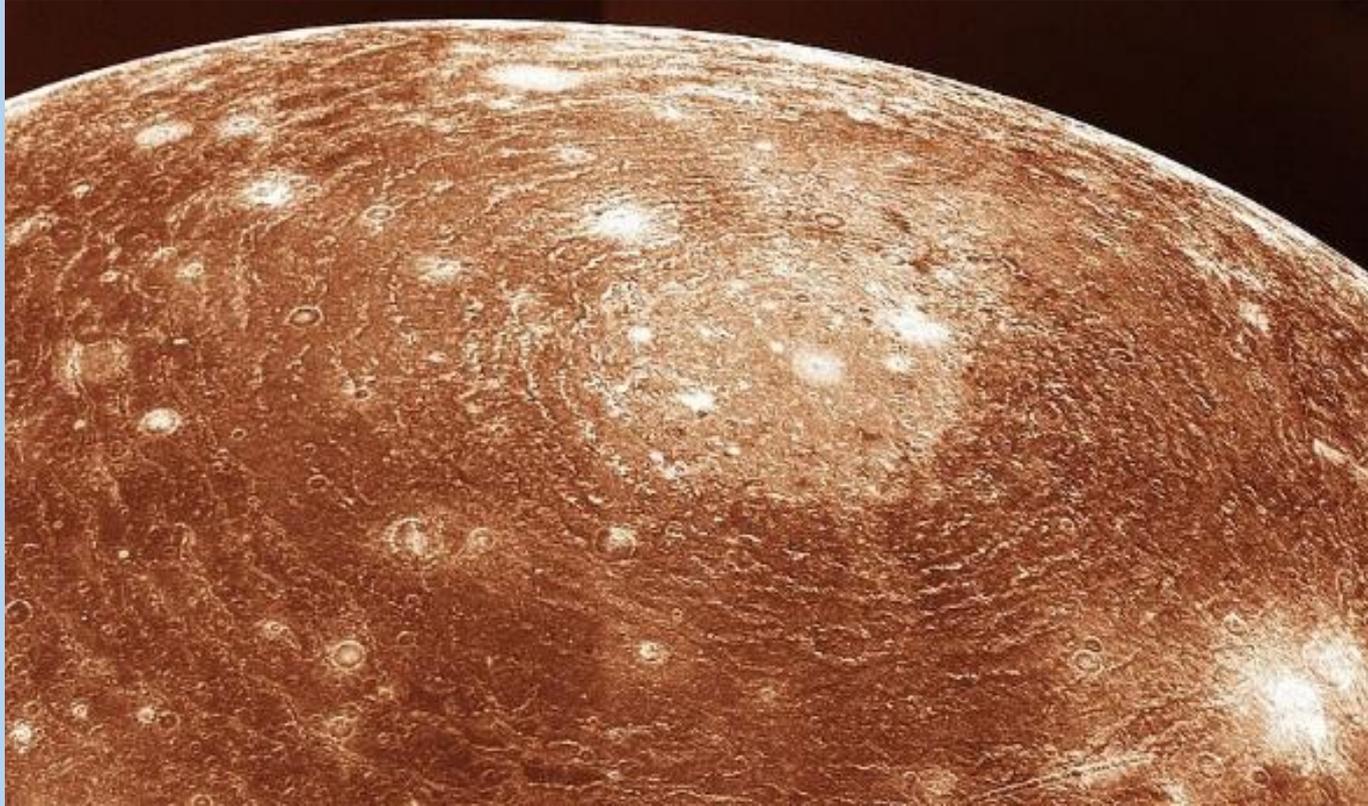
Слои жидкой воды

Луна

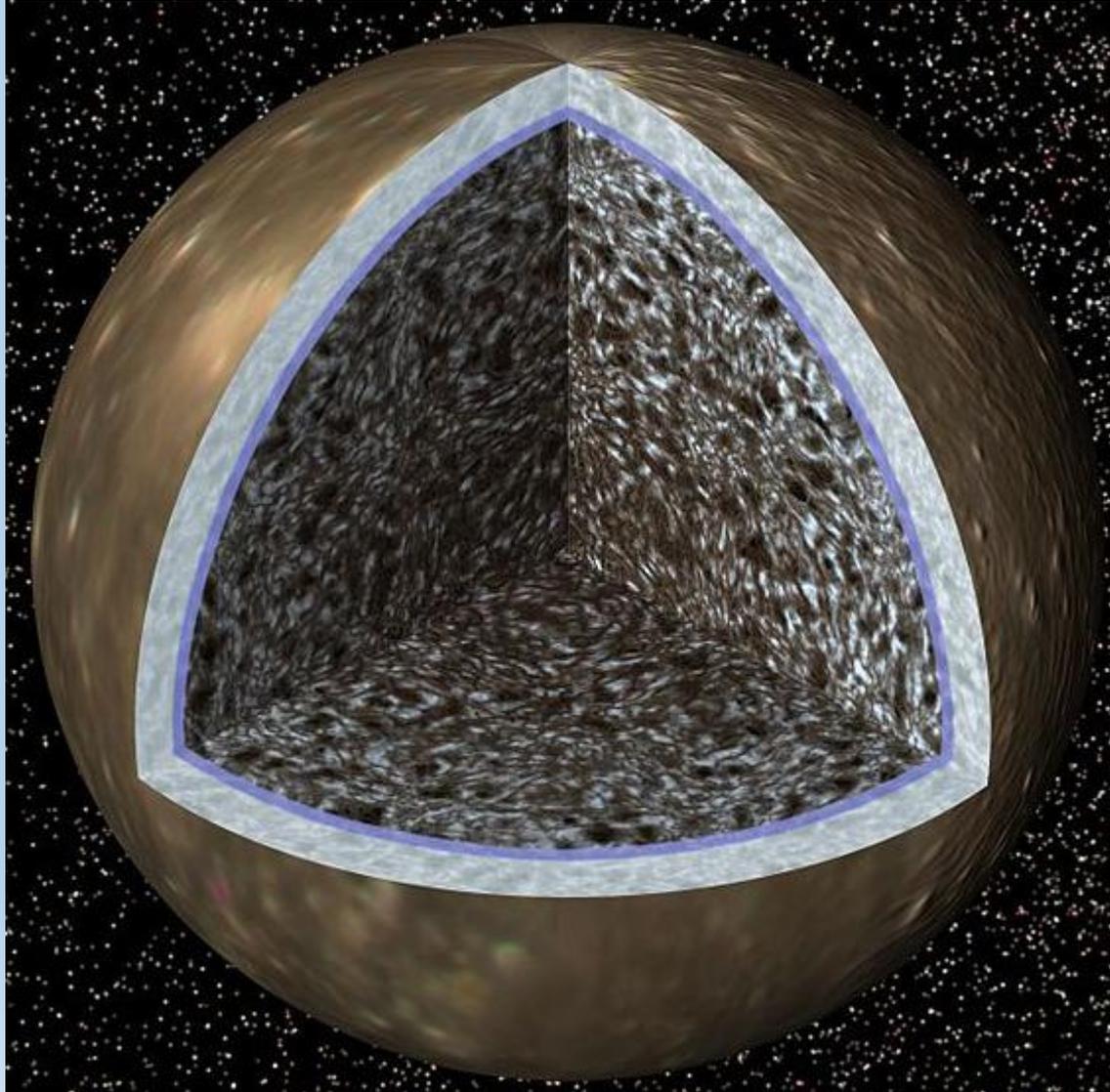
Меркурий



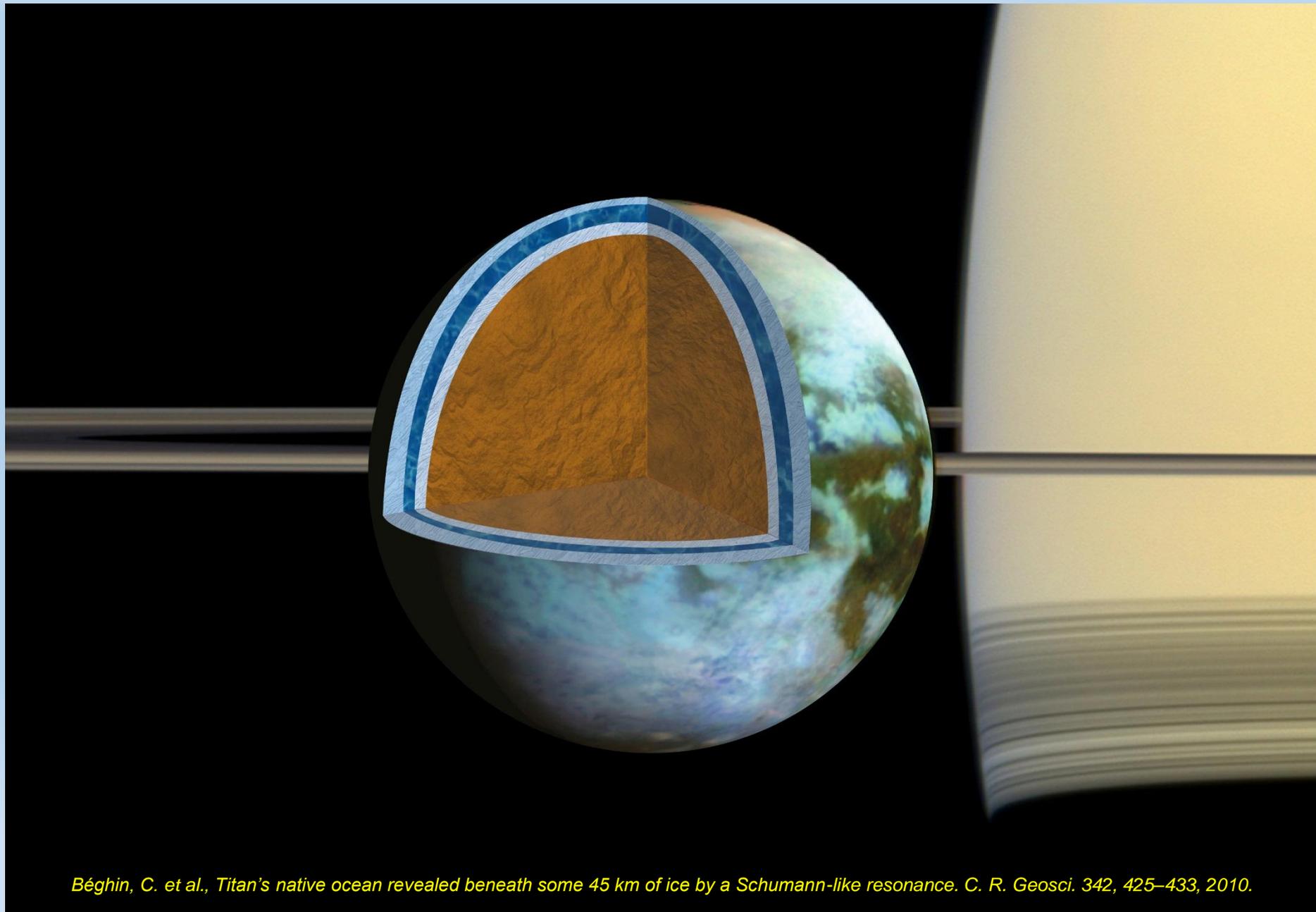
# *Каллисто*



*внутреннее строение*



# Туман



*Béghin, C. et al., Titan's native ocean revealed beneath some 45 km of ice by a Schumann-like resonance. C. R. Geosci. 342, 425–433, 2010.*

- давление 1.5 Bar
- основные компоненты:
  - N<sub>2</sub> (90%)
  - CH<sub>4</sub> (~9%)

*сложная атмосферная фотохимия (нитрилы, углеводороды и более сложная органика)*

**облачные слои:**

*несколько слоев органического тумана, состоящих из сложной смеси алканов, ароматических углеводородов, гетерополимеров;*

*толины синтезируются со скоростью до  $10^{-14}$  г/см<sup>2</sup>с.*

**сложная метеорология**

# толины

молекулярная структура  
толинов еще плохо изучена

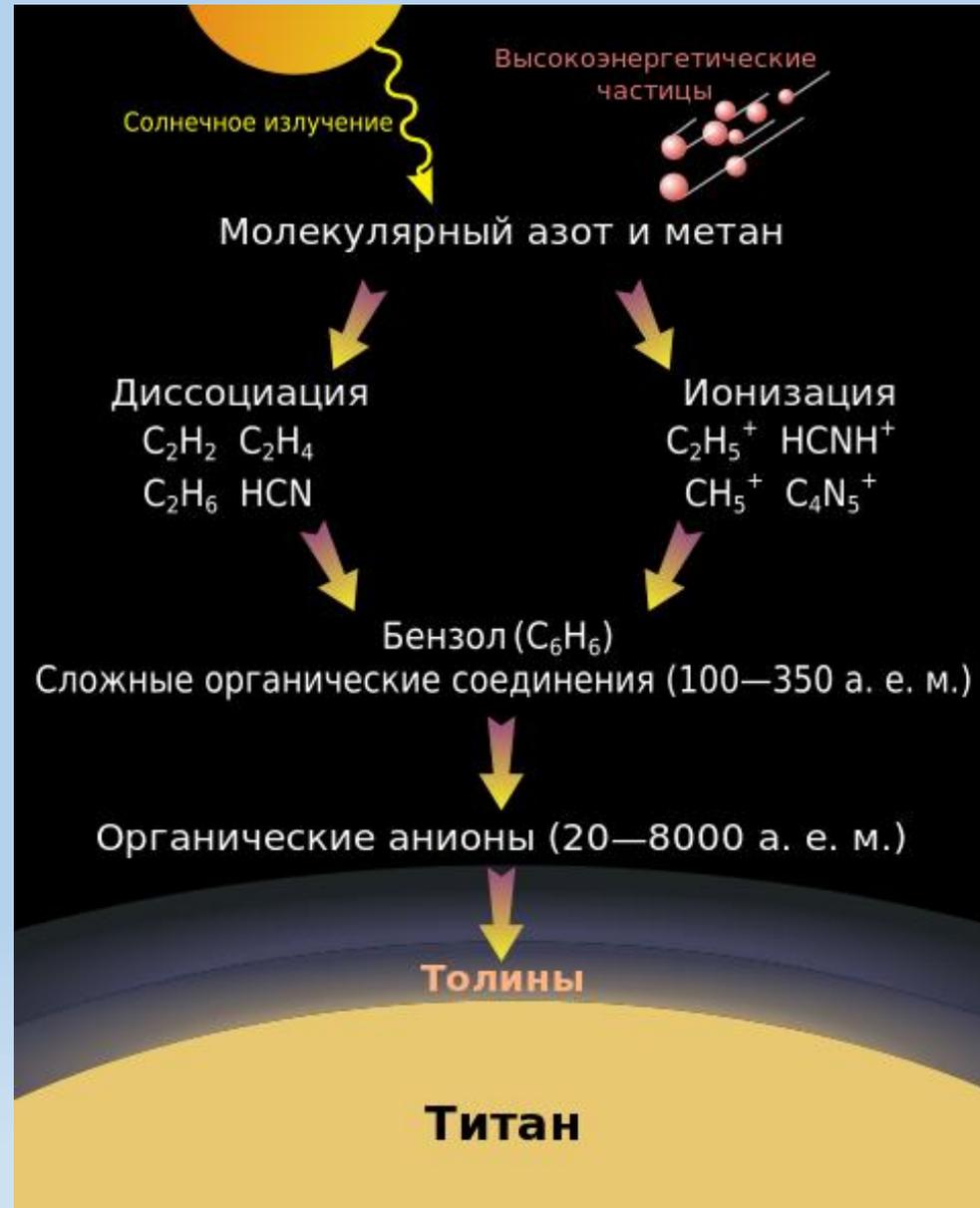
Рассматривается несколько  
возможностей, таких как:

полимеры синильной  
кислоты (HCN);

со-полимеры или олигомеры  
HCN–C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>;

полимеры HC<sub>3</sub>N;

со-полимеры HC<sub>3</sub>N–HCN.

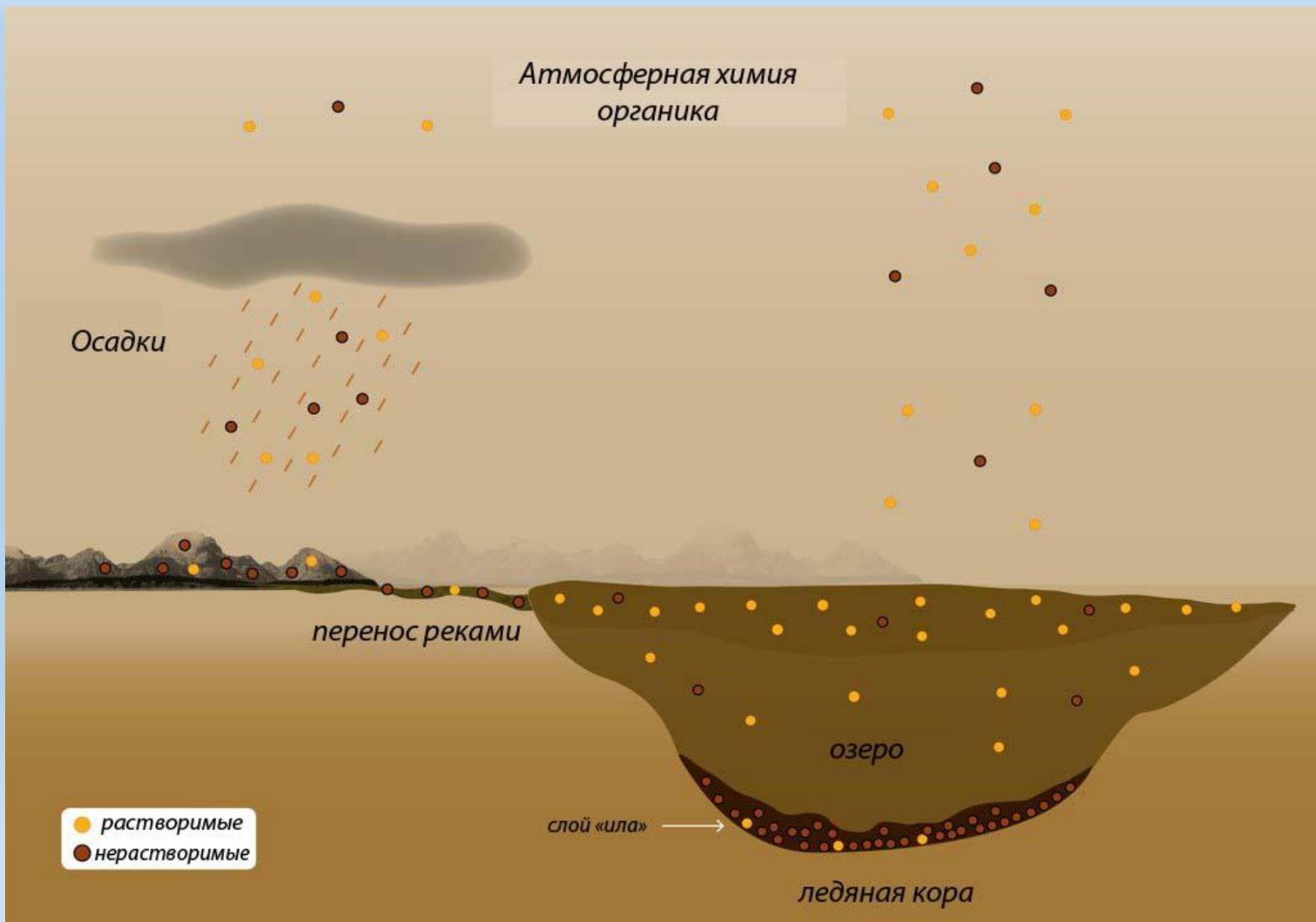




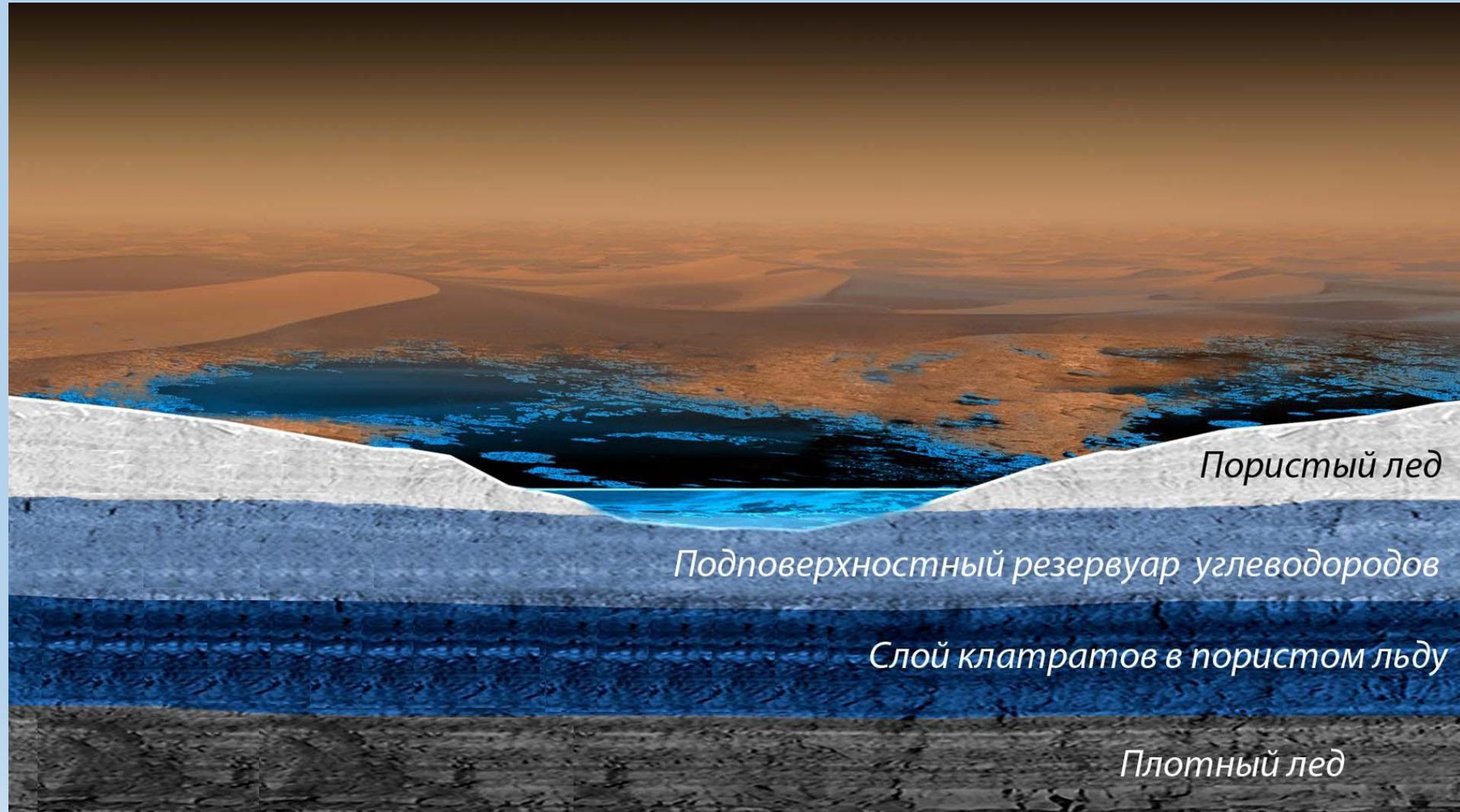
*поверхность*

*слой льда I,  
покрытый слоем  
сложного органического материала*

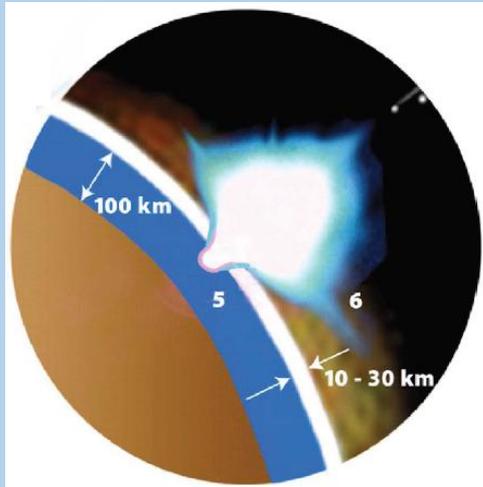
# концентраторы атмосферной органики



# *строение верхних слоев поверхности*

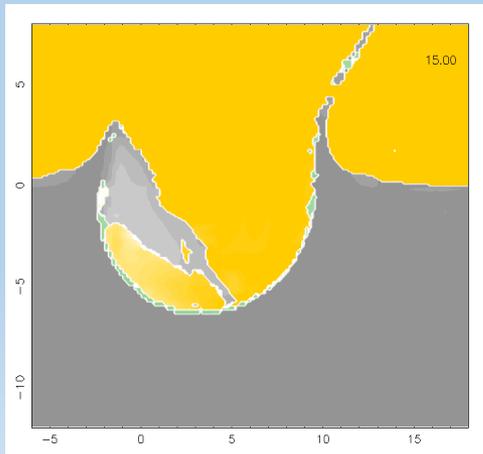


# поверхностная химия под воздействием метеоритных ударов

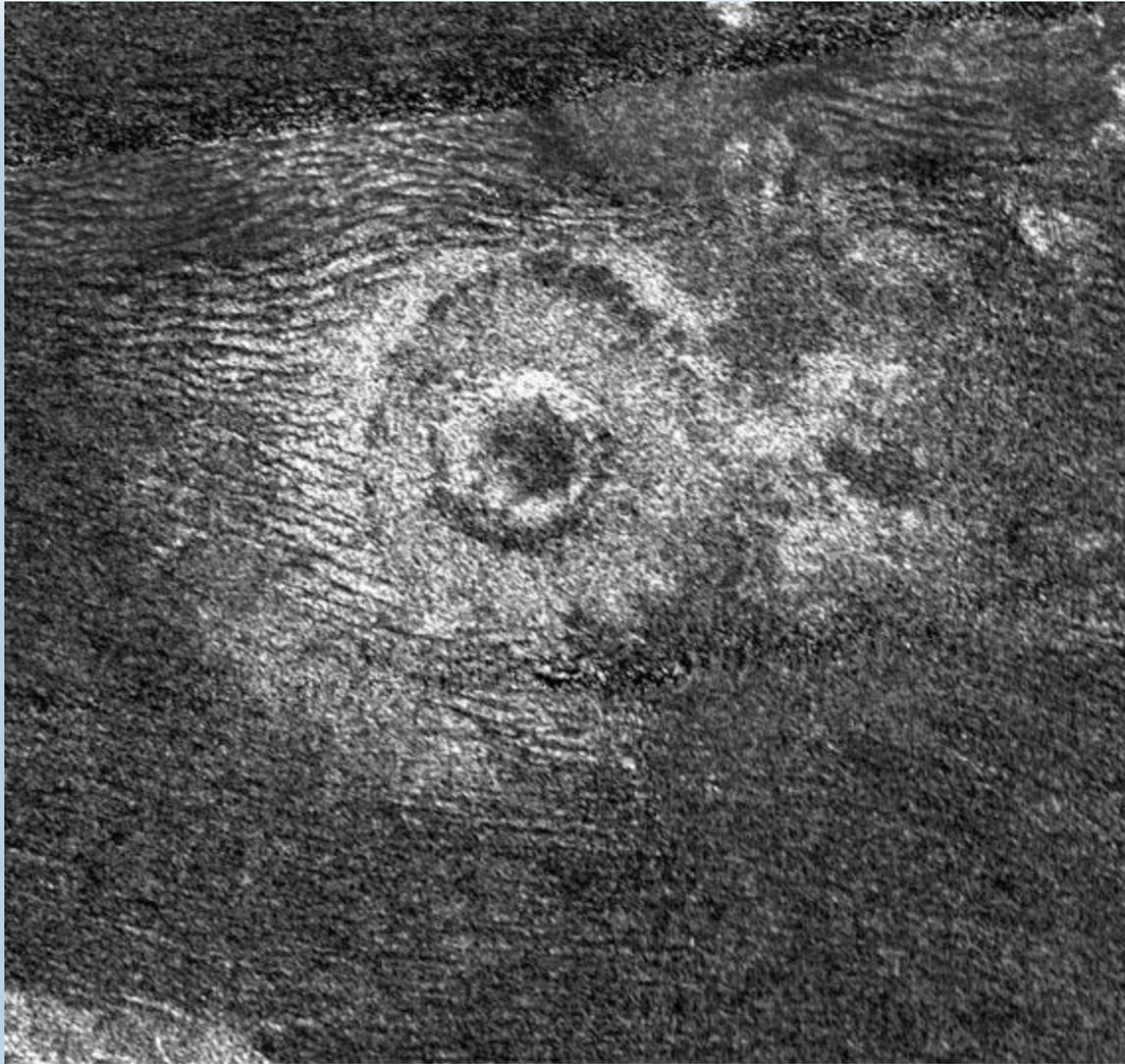


10% поверхности Титана может быть покрыта ударными кратерами, которые были в момент удара и некоторое время после него заполнены жидкой водой.

Время жизни таких объемов жидкой воды составляет  $10^4$ – $10^6$  лет, в зависимости от диаметра кратера и состава раствора. Время застывания  $1 \text{ км}^3$  воды в условиях Титана составляет  $10^5$  лет (Lunine *et al.*, 1998). Другие оценки времен жизни жидкой воды на поверхности спутника дают от  $10^2$ – $10^3$  для 15 км кратеров до  $10^3$ – $10^4$  для 150 км.



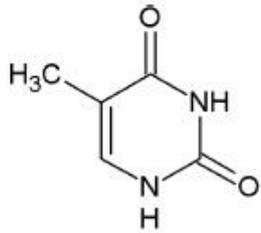
До 70% органического вещества подвергается воздействию жидкой воды достаточно длительное время.



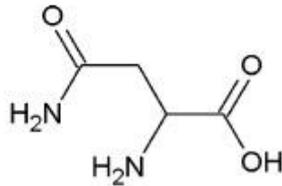
Ударный кратер диаметром около 40 км, окруженный выбросами от 15 до 20 км длиной.

# толины. предшественники биомолекул

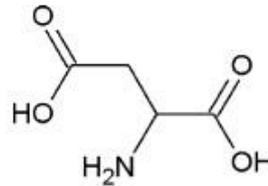
Neish et al., 2010



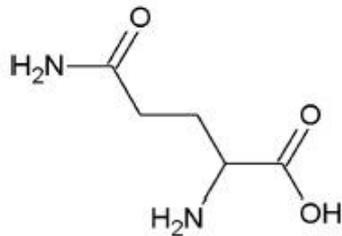
Thymine



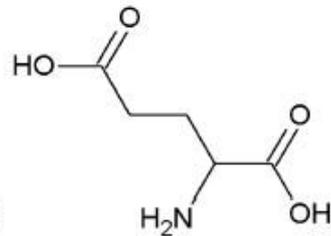
Asparagine



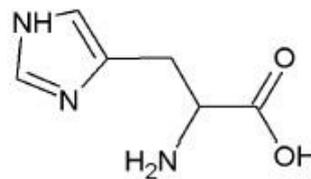
Aspartic Acid



Glutamine



Glutamic Acid

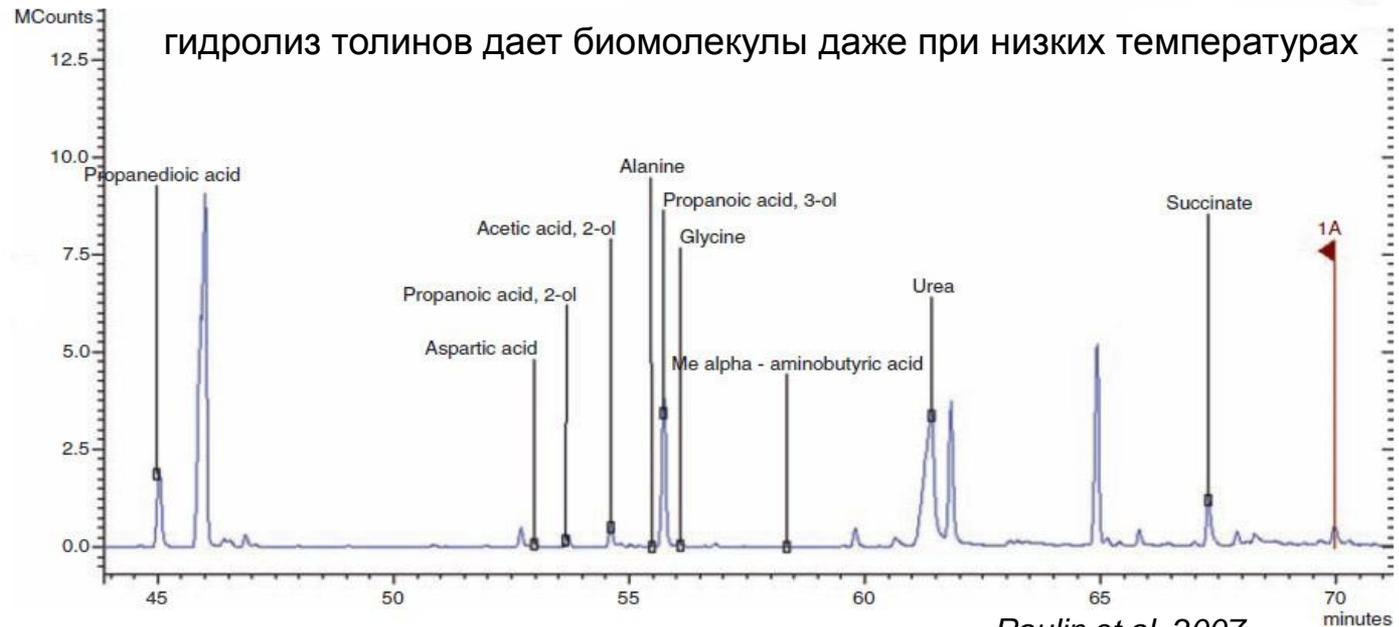


Histidine

толины содержат

нитрильные ( $-CN$ );  
изонитрильные ( $-NC$ );  
амино ( $-NH_2$ ,  $-NH-$  and  $-N<$ );  
имино ( $-C=N-$ ) группы

гидролиз толинов дает биомолекулы даже при низких температурах



Raulin et al., 2007

## *океан. химический состав*

- современный состав внутреннего океана любого ледяного спутника, вероятно, очень сложен;

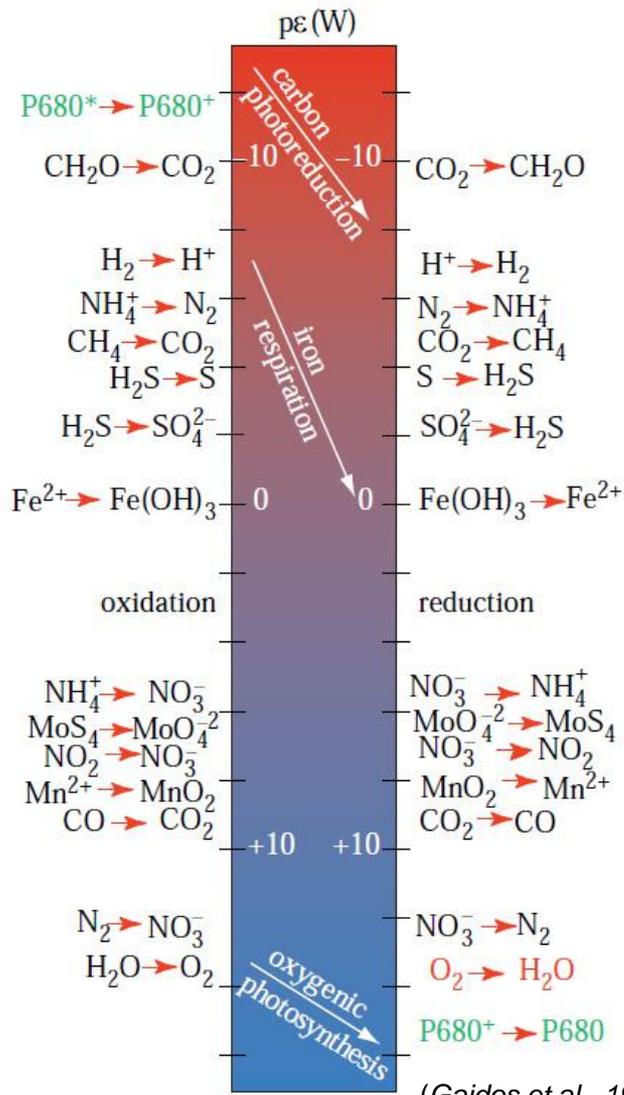
различные модели экстракции компонентов из хондритного материала показывают, что внутренний океан содержит большое число растворенных солей, состоящих из таких катионов, как:

- **K, Na, Mg, Ca, Mn, Fe**

и анионов:

- **$\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$**  плюс множество сложных органических соединений.
- Часть из этих соединений вполне может использоваться в биохимических процессах

# термодинамика жизни



Организмы для поддержания своей жизнедеятельности используют энергию окислительно-восстановительных реакций

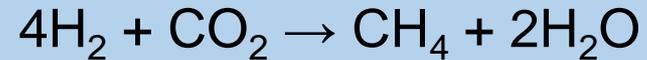
Основные из которых показаны на рисунке окислительно-восстановительных потенциалов

## возможные биохимические циклы

- *азотный цикл (N-cycle)*
  - *серный цикл (S-cycle)*
  - *цикл железа (Fe-cycle)*
  - *цикл метана (C-cycle)*
- *каждый из которых связан друг с другом*

# метаногенез

метаногенез – это биохимический механизм на основе восстановления диоксида углерода молекулярным водородом



CO<sub>2</sub> может служить единственным источником углерода для микроорганизмов.

С другой стороны, в качестве источника углерода метаногены могут использовать и простейшие органические вещества, такие как ацетат, формат, метанол и метиламины.

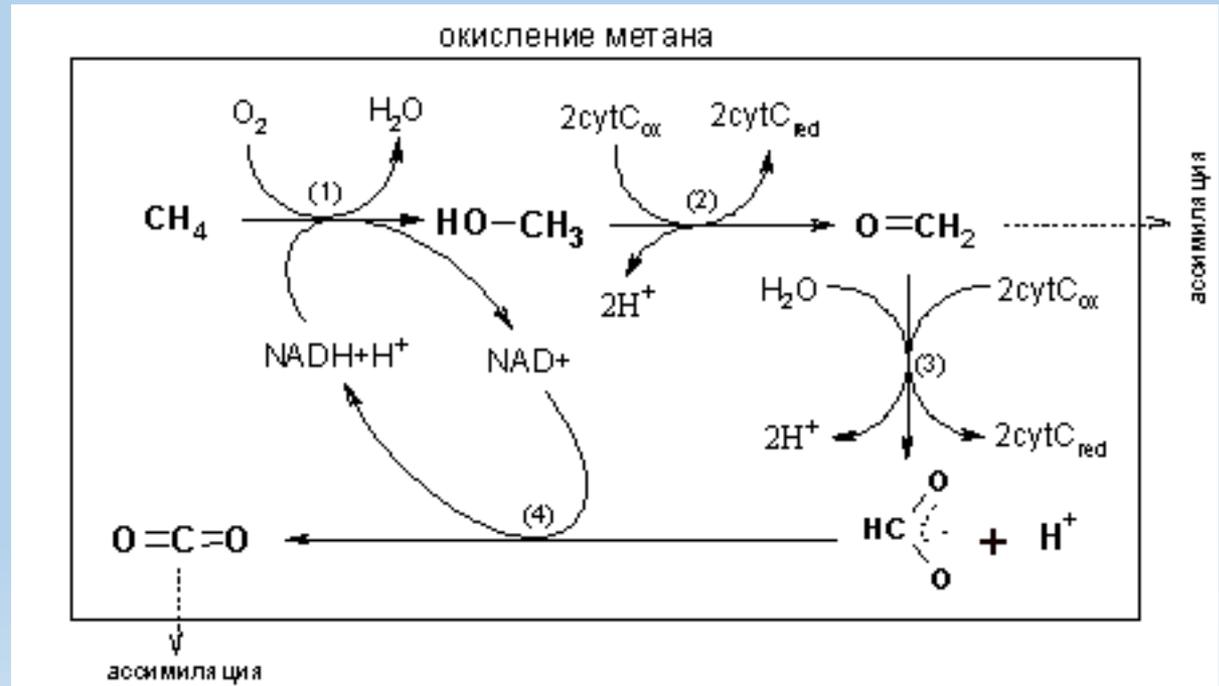
На Земле метаногены легко адаптируются к повышенной солености; они обнаружены в древних образцах вечной мерзлоты

# метанотрофия

метанотрофия – обратный процесс окисления метана в углекислый газ.



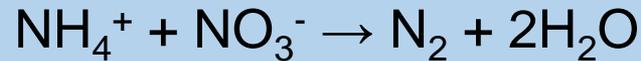
$\text{CH}_4$  может служить единственным источником и энергии и углерода для микроорганизмов.



Существуют археи, способные в кооперации с сульфатредукторами **анаэробно** метаболизировать метан

# бактерия, использующая ракетное топливо

обнаружены организмы, которые используют в качестве неорганического донора электронов ион аммония:

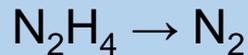


реакция имеет очень благоприятную энергетику (-357 кДж/моль) и представляет собой хороший источник энергии для метаболизма.

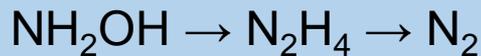
гидроксиламин ( $\text{NH}_2\text{OH}$ ) и гидразин ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ) участвуют в реакции в качестве интермедиатов

оба этих компонента широко распространены в атмосфере Титана

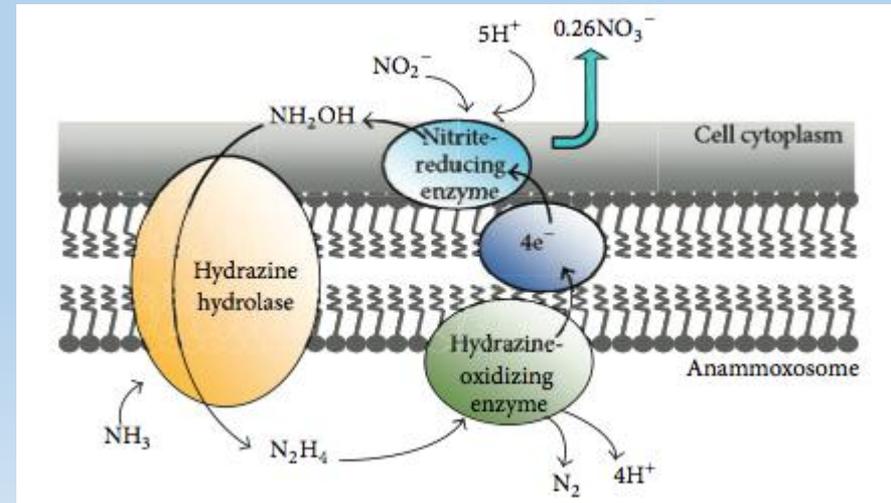
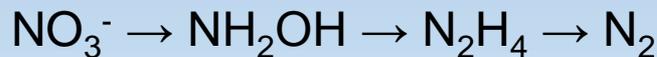
(*Jetten et al., 1999*)



через:

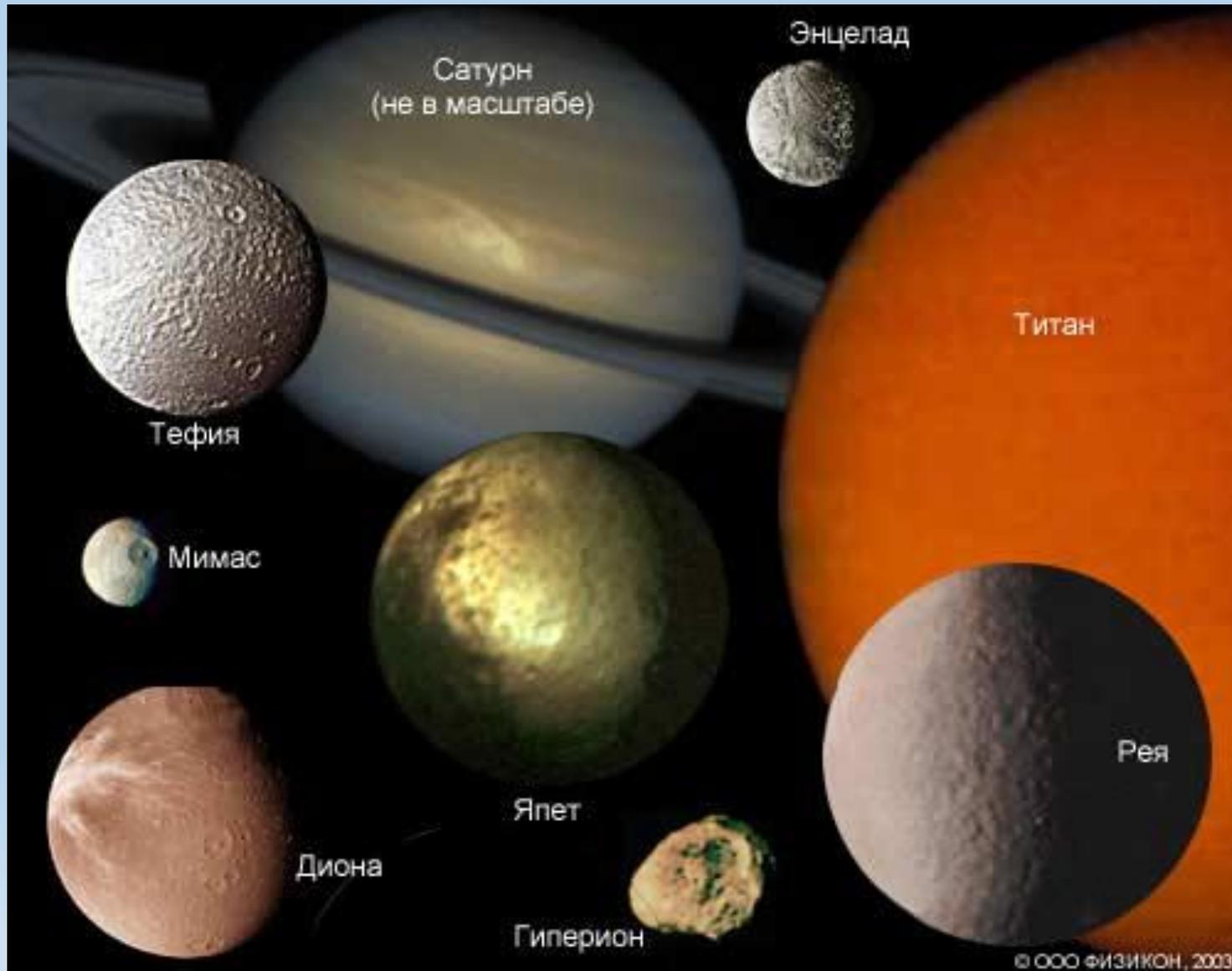


до

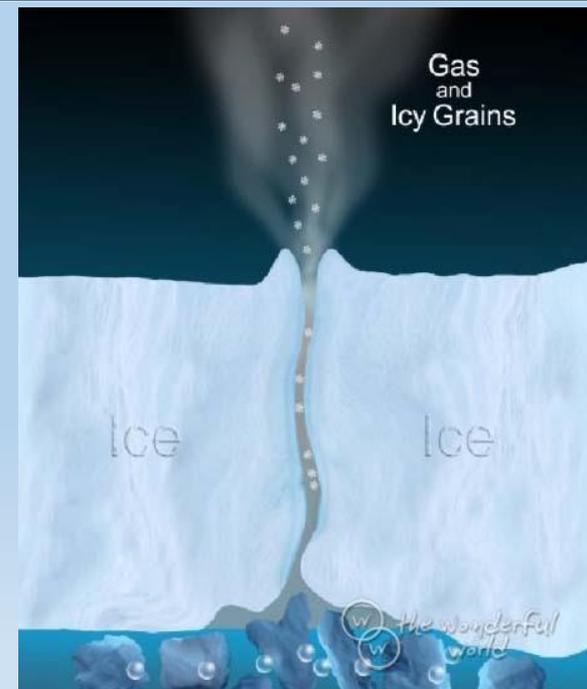
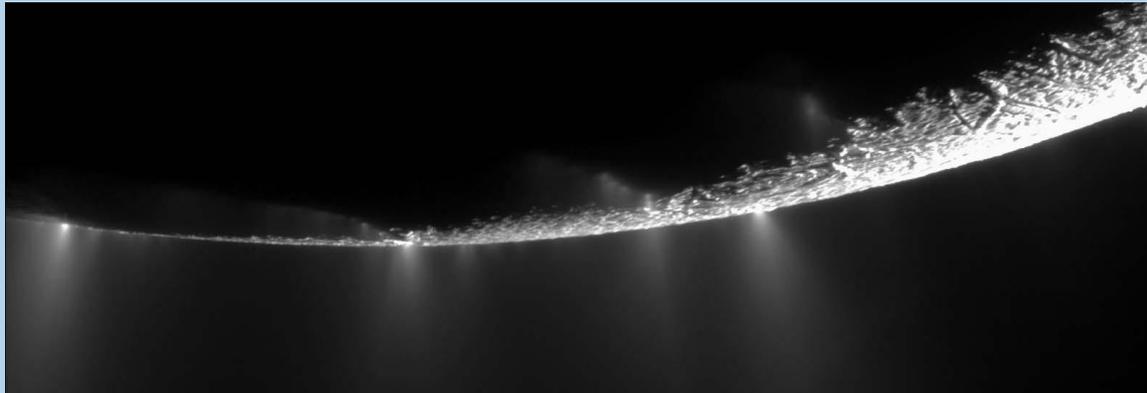


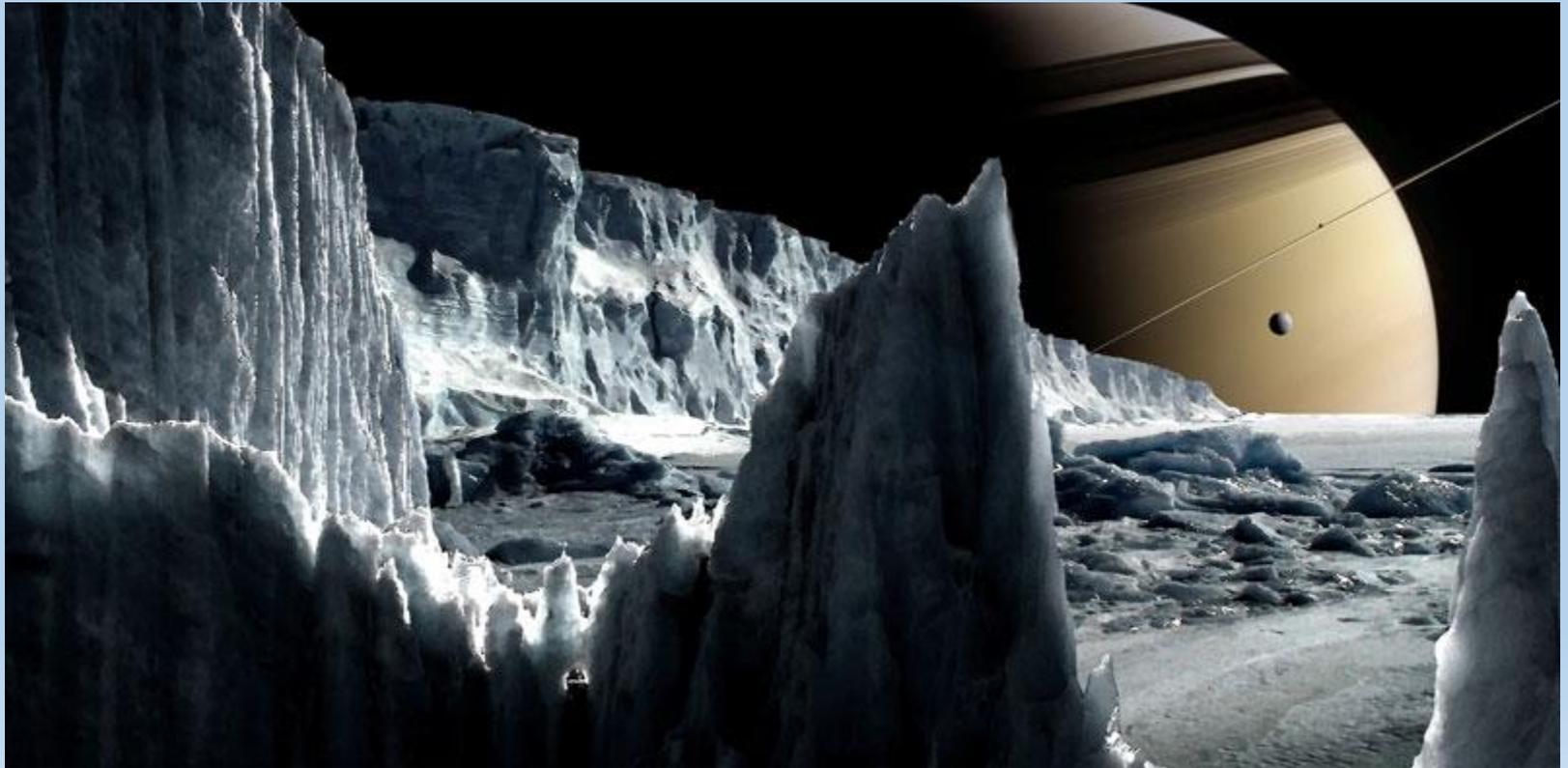
*Ni and Zhang, 2013*

# система Сатурна

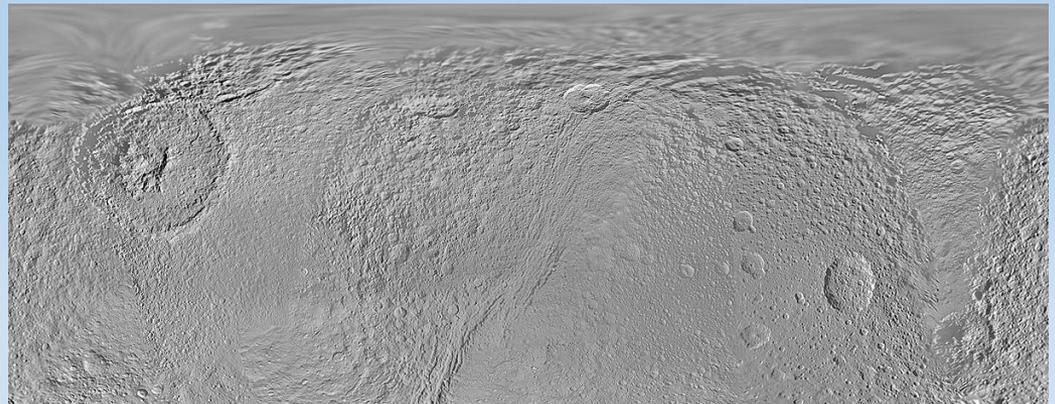
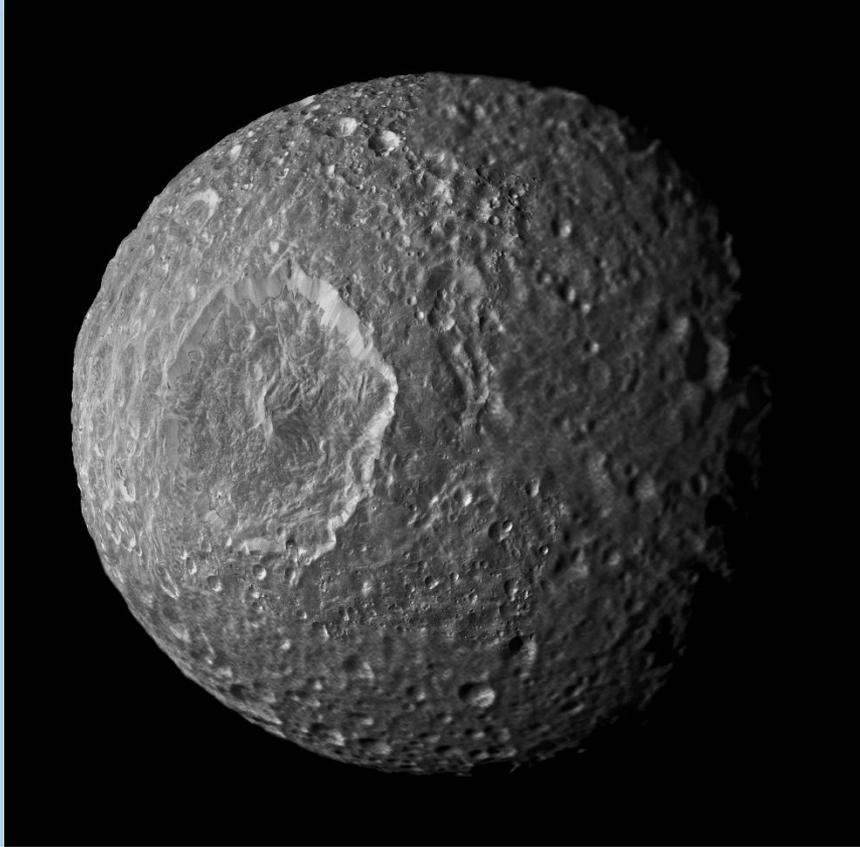


# гейзеры Энцелада

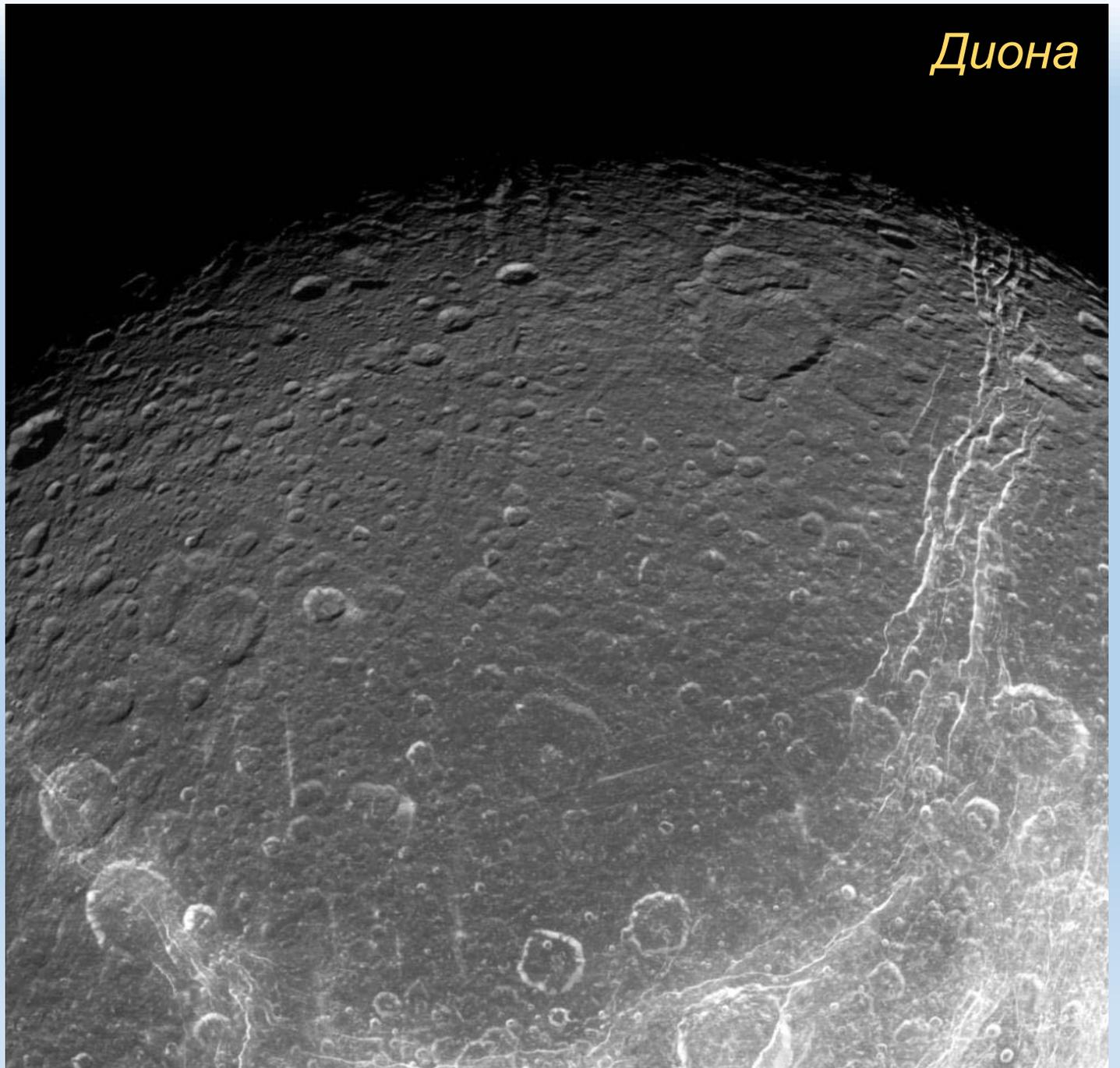




# *Мимас и Тетфия*

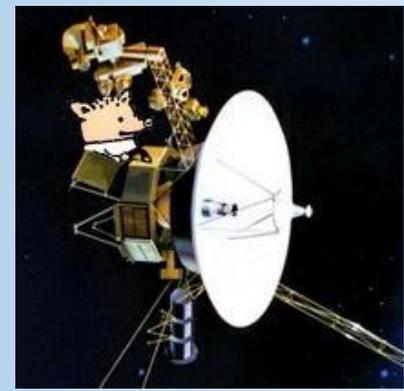


*Диона*

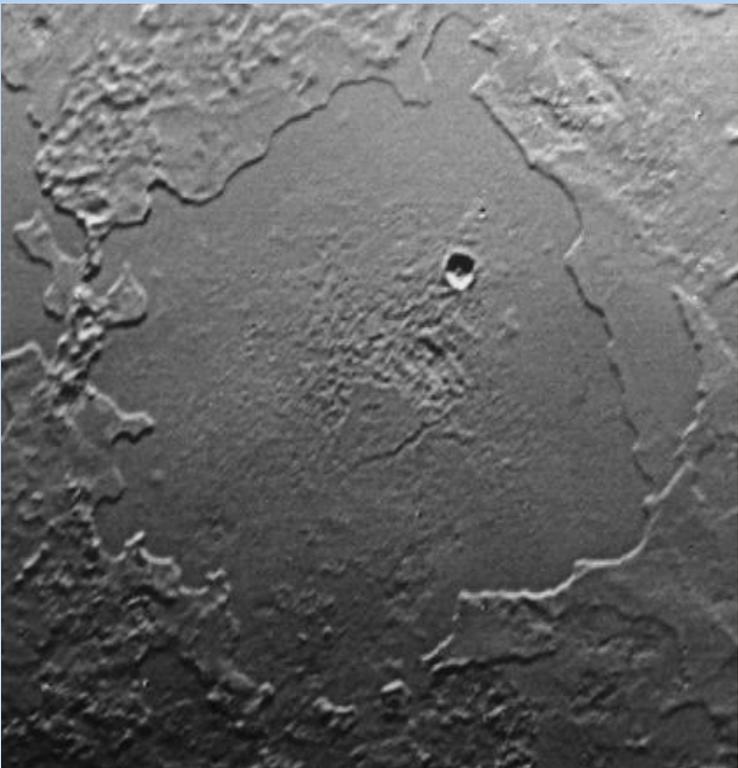
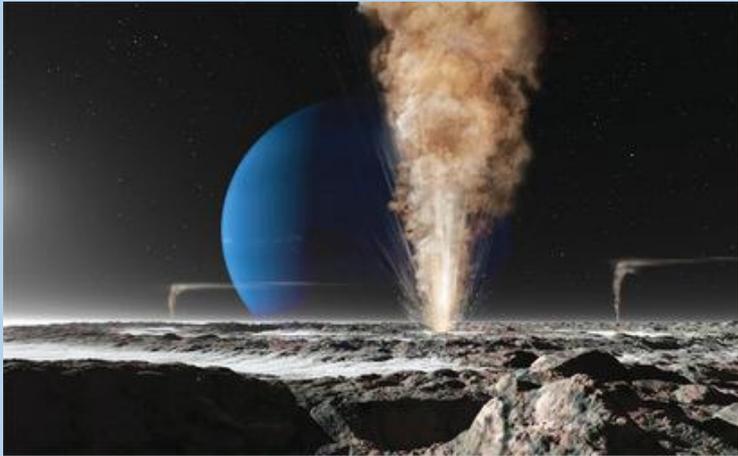


$\text{Na}_2\text{CO}_3$   
силикаты

# тропой Вояджера

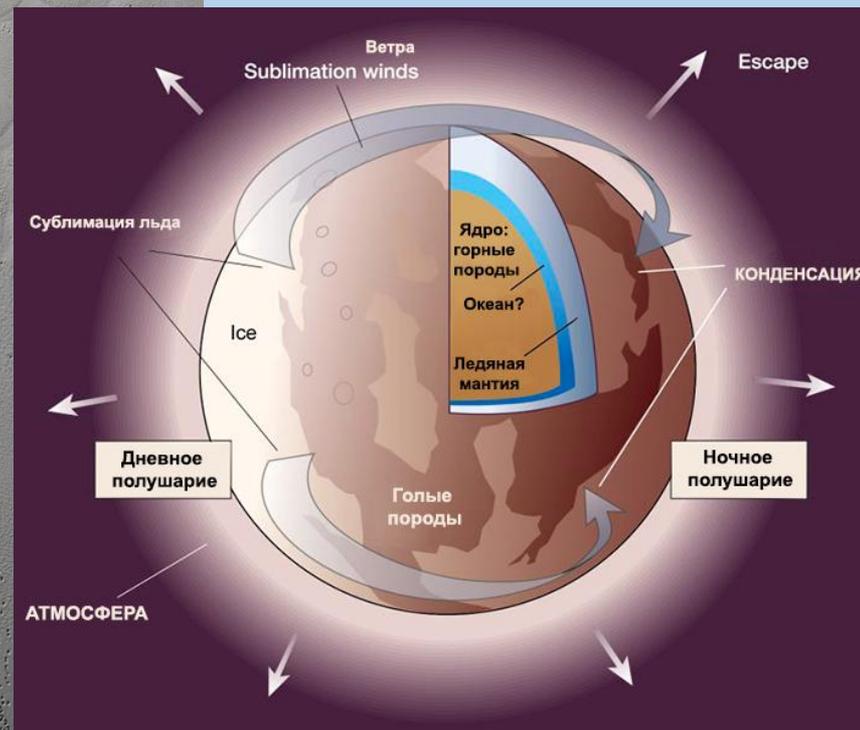
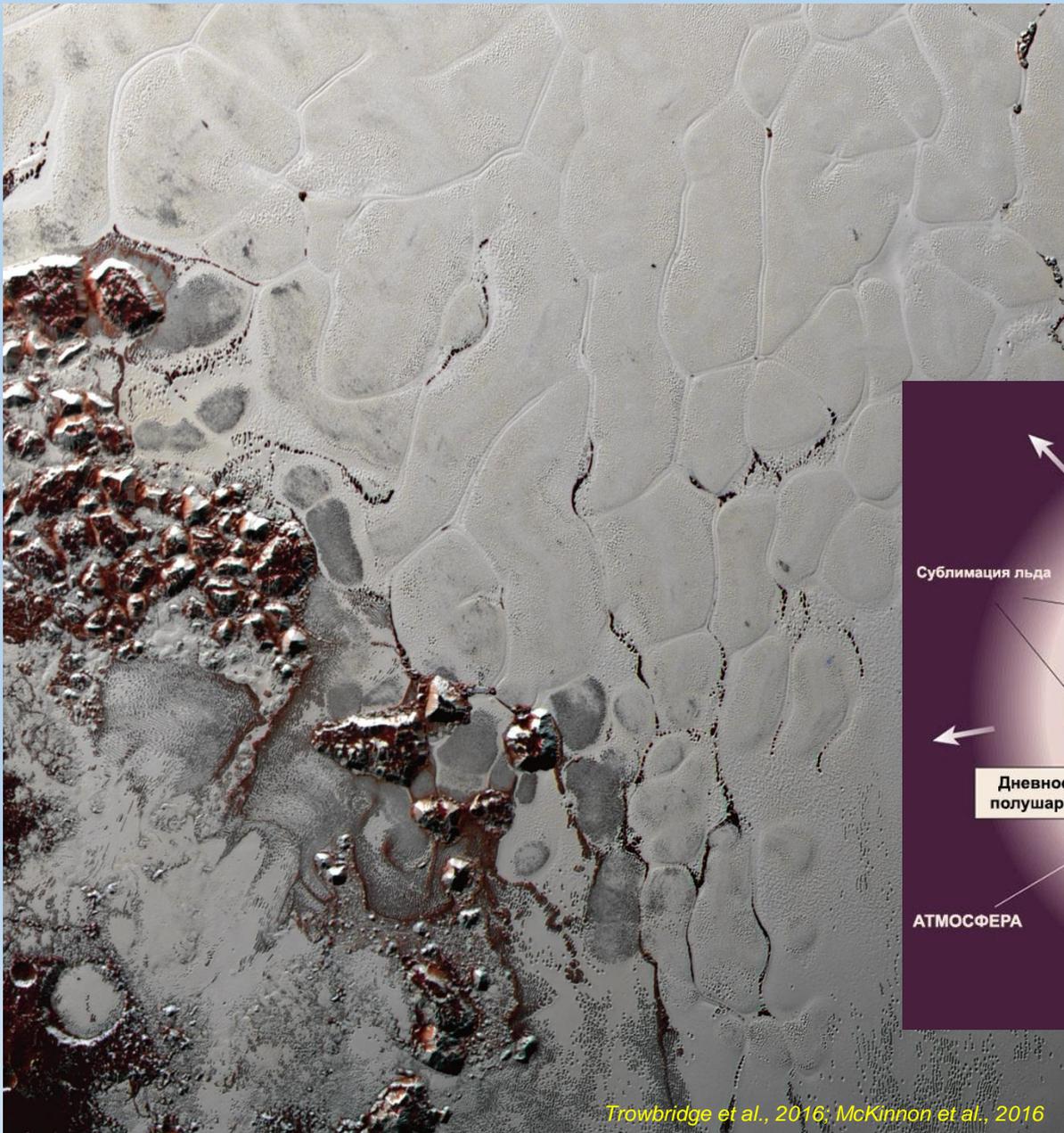


# Тритон



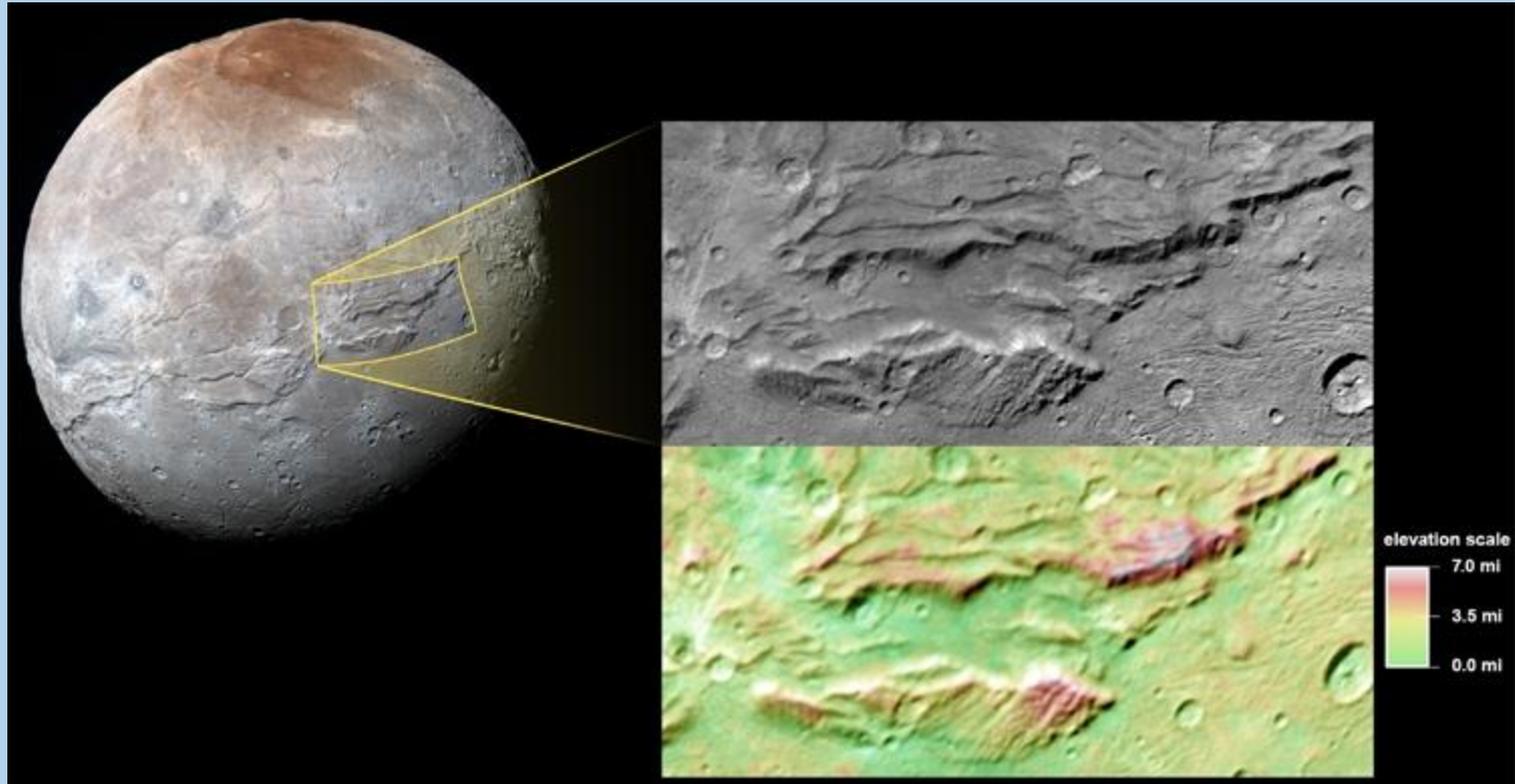
Лед на его поверхности нескольких оттенков. От сине-зеленого – там, где замерз чистый азот до красноватого, в местах, где присутствуют примеси железа.

# Плутон



Trowbridge et al., 2016; McKinnon et al., 2016

# Харон

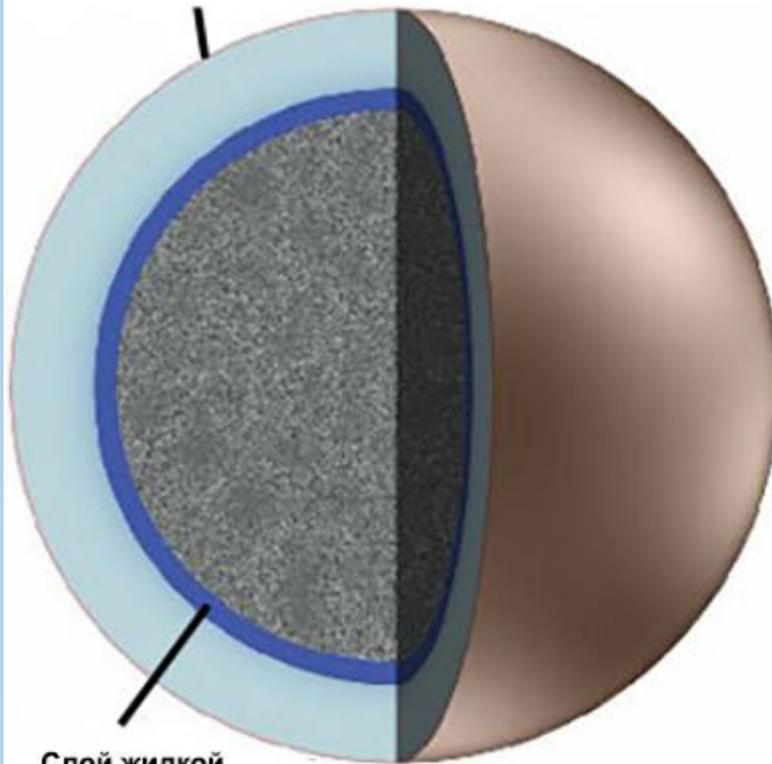


*Полоса каньонов протяжённостью около 1800 км и глубиной до 7,5 км*

*Существование океана в недалеком прошлом?*

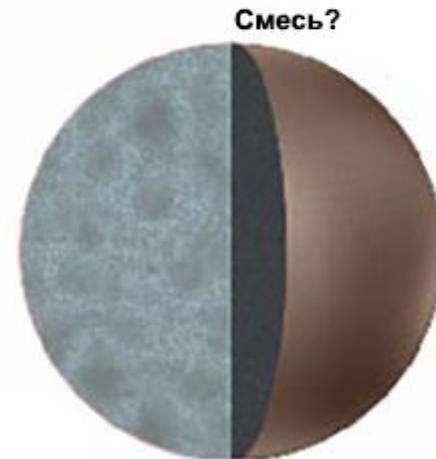
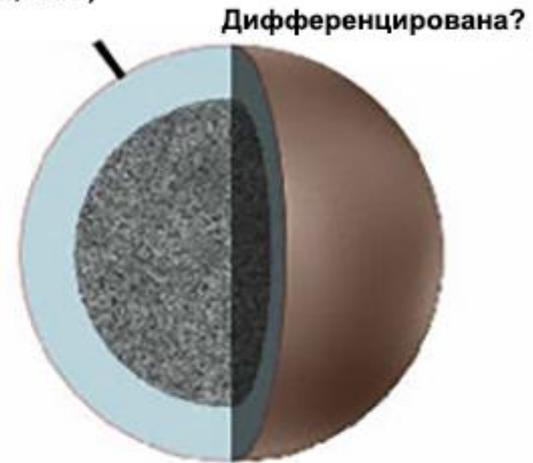
# ПЛУТОН

Ледяная поверхность  
(N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, предположительно органика)



# ХАРОН

Ледяная поверхность  
(NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O)



Водяной лед

Горные породы

Горные породы и смесь льдов

# транснептуновые объекты

2003 EL<sub>61</sub>



2005 FY<sub>9</sub>



Sedna



Orcus



Quaoar



2002 TX<sub>300</sub>



2002 AW<sub>197</sub>



Varuna



Ixion



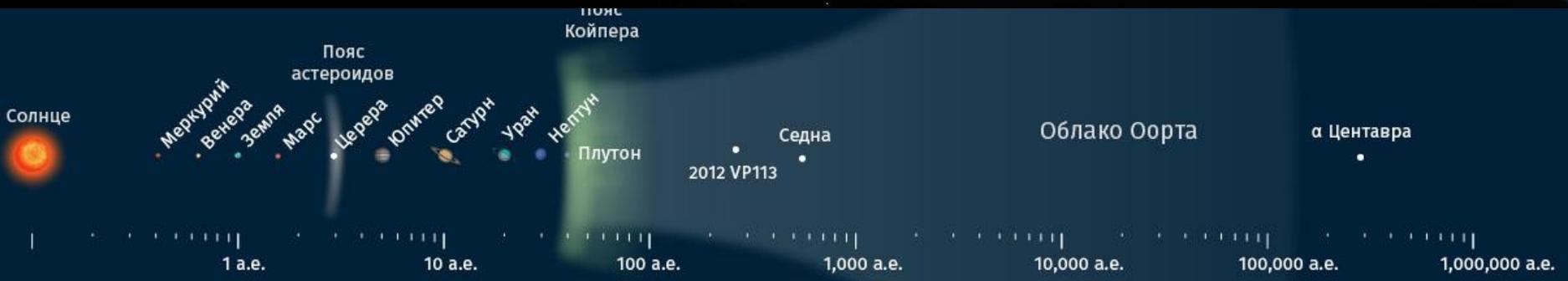
Vesta

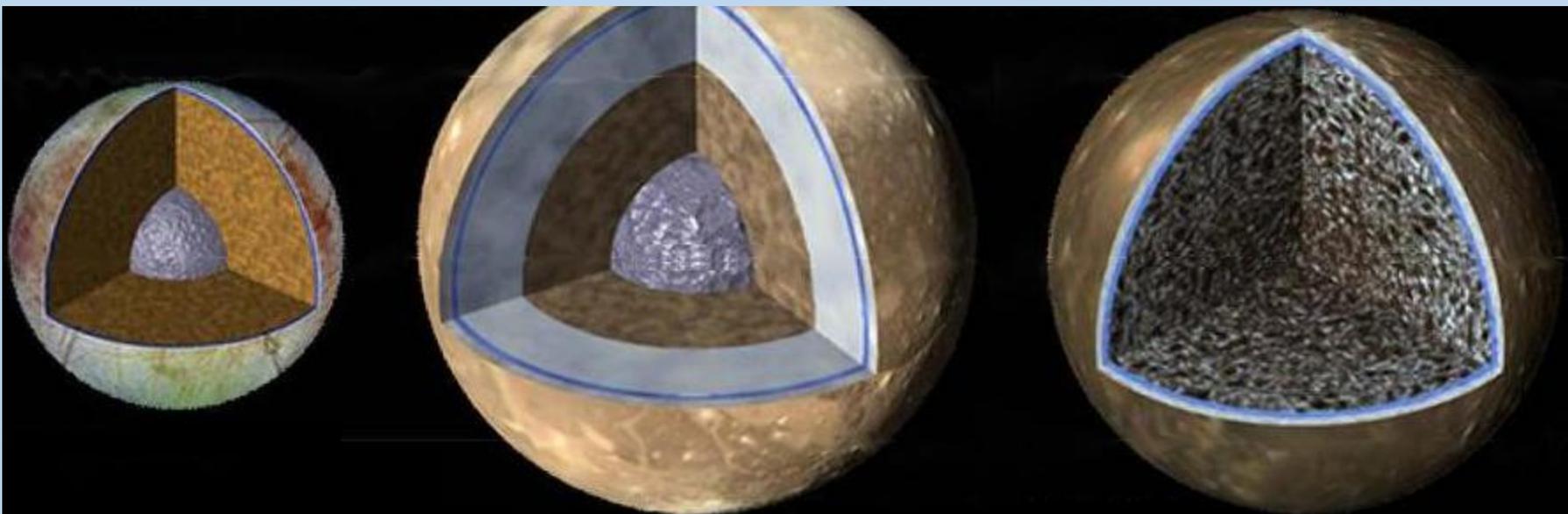


Pallas



Hygiea

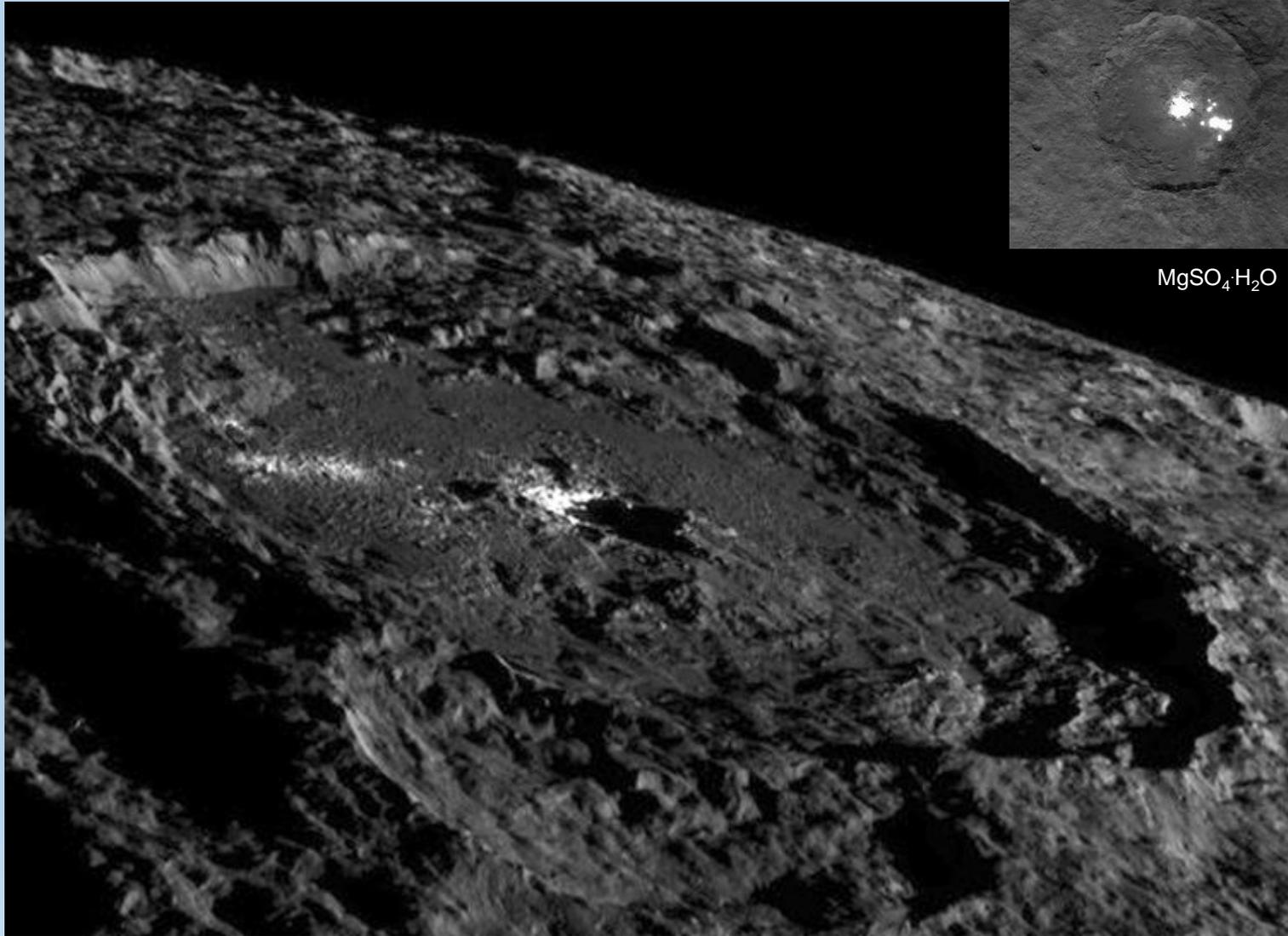




Европа  
 Ганимед  
 Каллисто  
 Титан  
 Энцелад  
 Рея  
 Плутон  
 Тритон  
 Титания  
 Оберон  
 Эрида



# Церера



кратер Оккатор, в котором находятся яркие образования.

Солевые отложения?

# условия для жизни на ледяных спутниках

жидкая вода, которая существует геологический период времени  
наличие широкого набора неорганических и органических веществ,  
необходимых для метаболизма

источники энергии:

- радиогенное тепло ядра;
- приливная энергия;
- потоки тепла от вулканической активности;
- удары метеоритов;
- солнечная энергия атмосферной фотохимии;
- молнии в атмосфере;
- космические лучи;
- электроны планетарных магнитосфер;
- химический потенциал окс-восст. реакций

## **Процессы метаболизма при -196 °C**

---

клетки бактерии *Colwellia psychrerythraea*  
способны встраивать значительные количества [<sup>3</sup>H]-лейцина в свои белки  
при температуре -20, -80 and -196°C

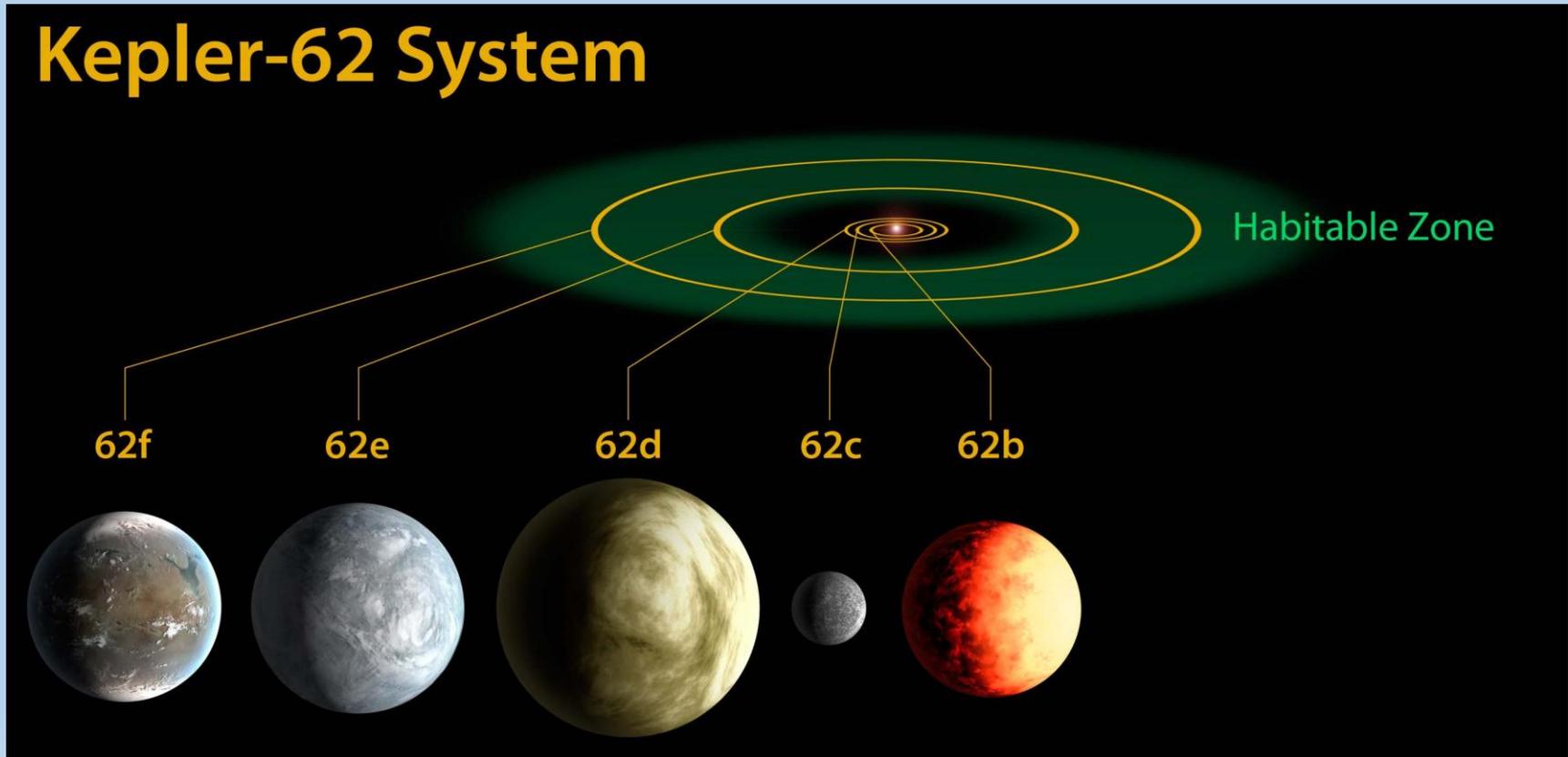
## *пыльные тропинки далеких планет*

- внутренние океаны ледяных спутников планет-гигантов могут быть широко распространены во внесолнечных планетарных системах*
- существование таких возможных экосистем значительно расширяет зону обитаемости в любой планетарной системе*



- Во Вселенной не исключено существование суперземель (экзопланет, которые в несколько раз крупнее Земли) с пригодными для жизни подледными океанами.
- Наличие воды в жидком состоянии обеспечивается высоким давлением и внутренними источниками тепла.

## Kepler-62 System



- Среди открытых экзопланет наиболее вероятными кандидатами на наличие подледных океанов являются Kepler 62e и Kepler 62f, открытые в 2013 году. Радиус этих небесных тел соответственно в 1,6 и 1,4 раза больше земного.

# Спасибо за внимание!

[exobio@mail.ru](mailto:exobio@mail.ru)

**Симаков М.Б.**

группа экзобиологии

Институт цитологии РАН

Санкт-Петербург

