



Общая геохимия

Лекция 4

Распространенность химических элементов.

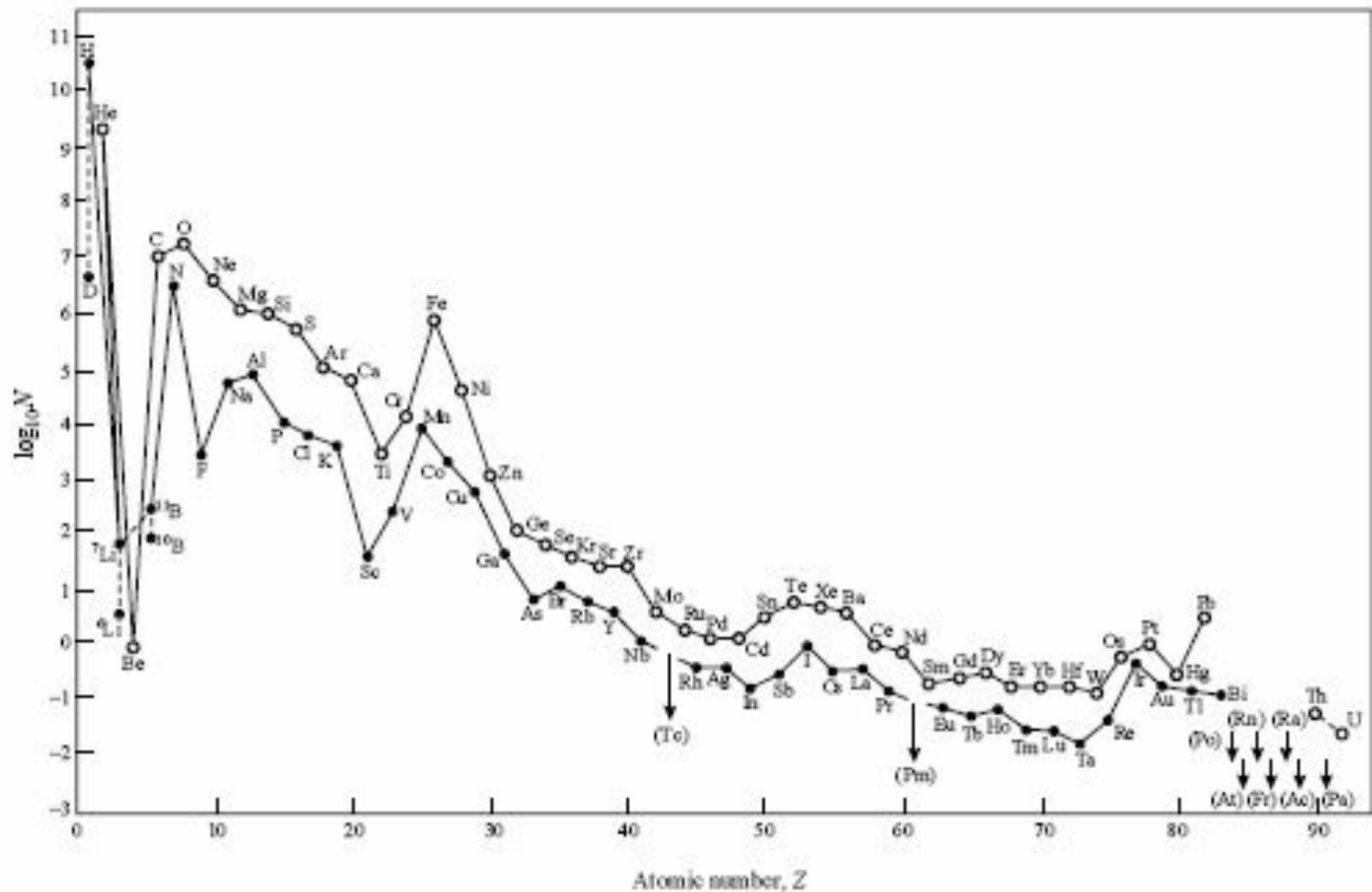


Figure 1.1 Cosmic abundances of the elements as a function of atomic number Z . Abundances are expressed as numbers of atoms per 10^6 atoms of Si and are plotted on a logarithmic scale, (From A. G. W. Cameron, *Space Sci Rev.* 15, 121–46 (1973) with some updating.)

- Космическая распространенность элементов отдельно для четных и нечетных номеров Z .

1. Все доступное для исследования вещество состоит из одних и тех же химических элементов; их количественные соотношения (распространенность), в пределах порядка величины, практически одинаковы (Вернадский, 1926).

2. Распространенность химических элементов в природе подчиняется следующим основным эмпирическим правилам:

*Распространенность уменьшается с ростом заряда ядра;

*Зависимость распространенности элементов от заряда ядра имеет две ветви - крутую для легких элементов (до Cu, Zn) и значительно более пологую для более тяжелых;

*Четные химические элементы распространены больше, чем их нечетные соседи («правило Оддо-Харкинса») – следствие большей энергии связи (исключения - H, He);

*Наблюдаются отчетливые максимумы на кривой распространенности элементов группы Fe (Cr, Mn, Fe, Co, Ni), а также менее выраженные в области Xe-Ba, Pt и Pb;

* Наблюдается резко пониженная распространенность Li, Be, B - неустойчивы при нуклеосинтезе;

* Соотношение протонов и нейтронов для устойчивых ядер с небольшим ат. числом (<40) = 1. Далее происходит рост сил кулоновского отталкивания, и для сохранения устойчивости ядра требуется вовлечение дополнительного числа нейтронов

- * Наиболее распространены четные элементы с атомной массой, кратной 4 (**Mg, Ca, Ti, Fe, O, Si**);
- * Особо устойчивы ядра с магическим числом протонов или нейтронов (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126): **He, O, Ca, Ni, Sr, Sn, Ba, Pb**.
- * Элементы, имеющие магические числа и протонов, и нейтронов, называют дважды магическими: **He, O, Ca, Pb**.

3. Космическая распространенность химических элементов определяется стабильностью ядер атомов (Вернадский, 1921, Goldschmidt, 1930).

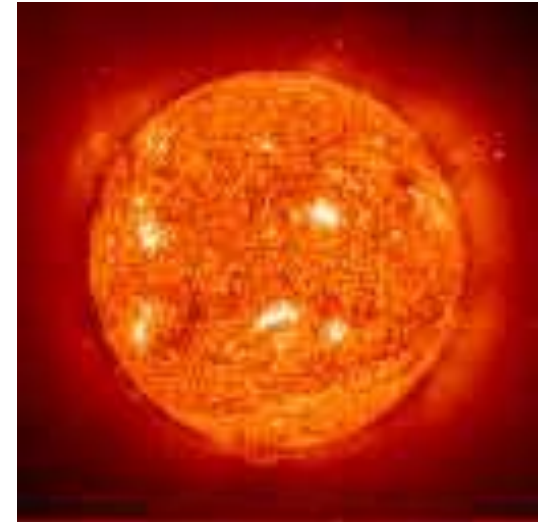
Химический состав космических тел

- Объекты космохимии представлены звездами (95% массы вещества Вселенной), газовыми и пылевидными туманностями, межзвездным газом, рассеянной космической пылью, планетами, кометами, метеоритами, нейтронами, протонами, электронами, кварками.

- Кларки солнечной атмосферы принято считать кларками космоса, которые рассчитывают на 10^6 атомов Si. В спектре солнечной атмосферы открыто более 70 элементов с преобладанием H (70% по массе), He (28), на долю остальных приходится 2%. Очень мало тяжелых элементов после железа.
- При давлении в центре звезды 10^{16} Па и температуре 10^7 К вещество состоит из свободных ядер и электронов (ионизированная водородно-гелиевая плазма).
- Возможно нейтронное сосуществование, например, пульсары – источник мощного пульсирующего радиоизлучения.

Химический состав Солнца

Element	% of total atoms	% of total mass
H	91.2	71.0
He	8.7	27.1
O	0.078	0.97
C	0.043	0.40
N	0.0088	0.096
Si	0.0045	0.099
Mg	0.0038	0.076
Ne	0.0035	0.058
Fe	0.030	0.014
S	0.015	0.040



За 4,5 Ga половина H превращена в He

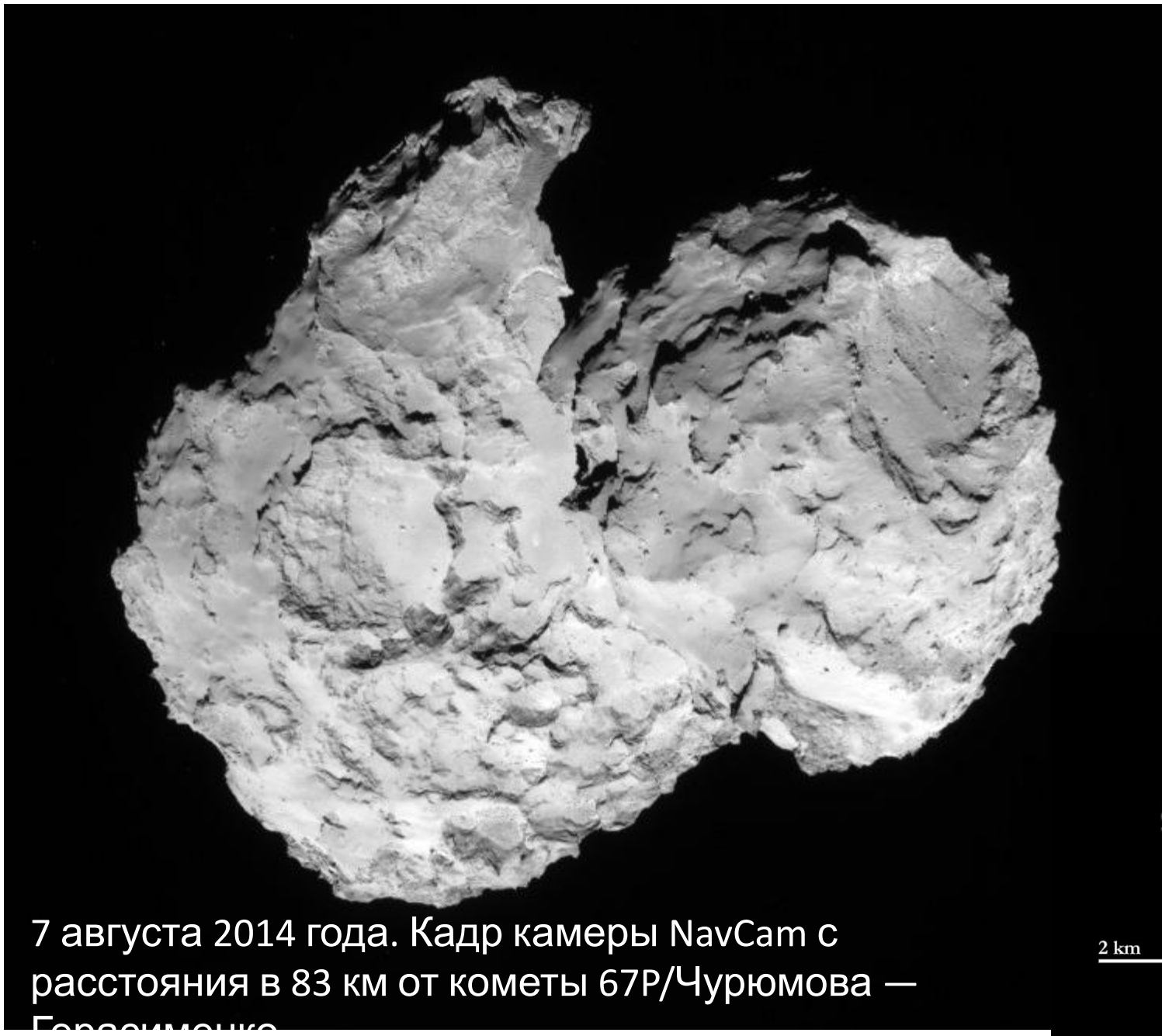
- Изотопный состав Солнца по углероду и инертным газам близкий к земному, что указывает на генетическое единство всех тел Солнечной системы.

Кометы

- Несмотря на относительно небольшое (по сравнению с астероидами) число комет, проникающих ежегодно в район орбиты Земли, их столкновения с Землей представляют большую угрозу.
- Так, по оценкам Бейли, примерно 10% земных и лунных кратеров образовались в результате столкновения Земли и Луны с кометами.
- Т.к. большинство комет имеют очень вытянутые орбиты, скорость столкновения их с Землей велика. 25% всех столкновений Земли с космическими телами, сопровождающихся выделением энергии, равной или большей взрыву миллиона мегатонн тротила, приходится на долю комет.

- По современным взглядам, кометное ядро состоит из смеси водяного льда и пыли с замороженными легколетучими веществами и, возможно, крупными монолитными включениями более плотного вещества (боулдерами).
- Кометное вещество очень пористое и неоднородное. Его состав и физические характеристики могут сильно меняться в зависимости от положения в ядре.
- Большая часть поверхности кометы покрыта пылевой коркой, толщина которой может достигать до 1 метра.

- В настоящее время разработано несколько моделей кометного ядра. Наиболее известной является ледяная модель Уиппла. В этой модели предполагается, что ядро кометы есть монолитный конгломерат льдов H_2O , NH_3 , CH_4 , CO_2 и C_2H_2 , а также некоторое количество метеорного нелетучего вещества.
- В модели Б.Донна (Donn, 1991) разработан кластерный механизм образования кометного ядра, в результате которого ядро представляет собой очень рыхлое образование, подобное гигантскому снежному кому. Эта модель во многом объясняет некоторые очень низкие оценки плотности кометного ядра.



7 августа 2014 года. Кадр камеры NavCam с расстояния в 83 км от кометы 67P/Чурюмова — Герасименко

2 km

1950 км

Химический состав комет

H, O, C, N

Table 3 Relative production rates of molecules in comet Hale-Bopp (C/195 O1).

<i>Molecule</i>	<i>[X]/[H₂O]</i>
H ₂ O	100
HDO	0.06
CO	23
CO ₂	20
CH ₄	0.6
C ₂ H ₂	0.2
CH ₃ OH	2.4
H ₂ CO	1.1
HCOOH	0.08
NH ₃	0.7
HCN	0.25
DCN	0.25
HNCO	0.10
HNC	0.25
CH ₃ CN	0.02
HC ₃ N	0.02
NH ₂ CHO	0.015
H ₂ S	1.5
OCS	0.4
SO	0.3
CS	0.2
SO ₂	0.2
H ₂ CS	0.02
NS	0.02
H ₂ O ₂	<0.03
CH ₂ CO	<0.032
C ₂ H ₅ OH	<0.05
HC ₅ N	<0.032
Glycine I	<0.5

Source: Bockelee-Morvan and Crovisier (2002).

Table 4 Relative atomic abundances in gas and dust at comet Halley.

	<i>Geiss (1988)</i>	<i>Grün and Jessberger (1990)</i>	<i>Solar system</i>
H/Mg	39	31	25,200
C/Mg	12	11.3	11.3
N/Mg	0.4–0.8	0.7	2.3
O/Mg	22.3	15	18.5
N/C	0.03–0.06	0.06	0.2
O/C	1.8	1.3	1.6

Source: Huebner (2002).



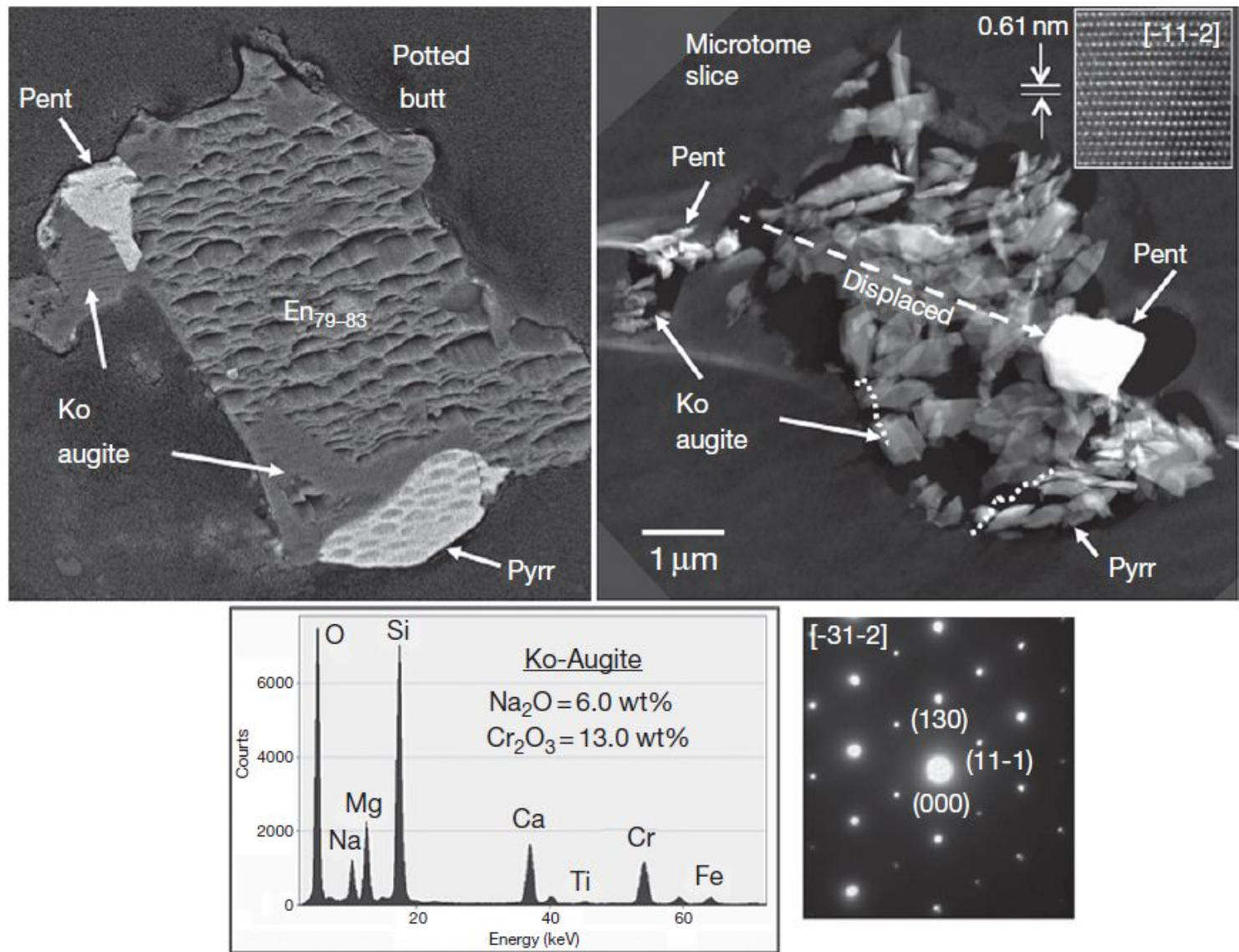


Figure 18 Backscattered electron microscope image of the cut face (left) and transmission electron microscope image (right) of a microtome slice of particle 27,1 from comet Wild 2. An energy-dispersive x-ray spectrum of kosmochloric augite is shown in the succeeding text. The particle is a mix of Mg-rich pyroxene slightly variable composition, kosmochloric augite, pyrrhotite, and pentlandite.

Химический состав ядра кометы

элемент	количество атомов, %	масса, %
Водород	43.9	4.2
Углерод	6.7	7.7
Азот	2.7	3.8
Кислород	40.2	65.5
Сера	1.0	3.1
Магний	1.9	4.5
Кремний	1.8	4.9
Железо	1.6	8.8
Никель+хром	0.1	0.6

- Кома (атмосфера) кометы образуется в результате сублимации вещества с поверхности кометы. Спектроскопическими методами в коме комет обнаружены атомы:
- H, O, C, S, Na, K, Ca, V, Mn, Fe, Co, N, Cu;
- двухатомные молекулы: C_2 , CH, CN, CO, CS, NH, OH, S_2 ; трехатомные молекулы: H_3 , C_3 , NH_3 , HCN, HCO, H_2O ; многоатомные молекулы: NH_3 , CH_3CH ,
- ионы: C^+ , Ca^+ , CO^+ , N_2^+ , H_2O^+ , H_2S^+ , OH^+ .
- *Сублимация* - возгонка, переход вещества из кристаллического состояния непосредственно (без плавления) в газообразное

- Был определен и процентный состав газовой компоненты комы:
- 80% — водяной пар (H_2O);
- 10–12% — окись углерода (CO);
- 2% — метан (CH_4);
- 1.5% — углекислый газ (CO_2);
- 1–2% — аммиак (NH_3);
- 1–2% — формальдегид (H_2CO).
- Было также определено, что газопроизводительность кометы Галлея равна ~ 18 т/с, а пылепроизводительность ~ 20 т/с.

- **Газовые туманности** состоят из сильно разреженных газов, представляющих собой извержения из звездной материи. Соотношение Н:Не:О в газовых туманностях 1000:10:0.01.
- **Космические лучи** – это поток атомных ядер очень высокой энергии, состоящих в основном из протонов (90%). Поток космических лучей за пределами Земли составляет 10 частиц/см²/мин. Космические нейтроны образуют вторичные радиоактивные изотопы в верхней части атмосферы, преобразуют атомные ядра азота; образуются радиоактивные изотопы Ве, Na, Al и др.

- ***Космические частицы*** – по сравнению с Солнечной системой беднее H, He, Li, Be, B, но богаче тяжелыми металлами.
- **Астероид** - небольшое планетоподобное небесное тело Солнечной системы, движущееся по орбите вокруг Солнца. Астероиды (малые планеты) значительно уступают по размерам планетам, хотя при этом у них могут быть спутники.
- ***Метеорит*** — твёрдое тело космического происхождения, упавшее на поверхность крупного небесного тела.

Метеориты



Хоба - крупнейший из найденных метеоритов. Также является самым большим на Земле куском железа природного происхождения (~60 т).



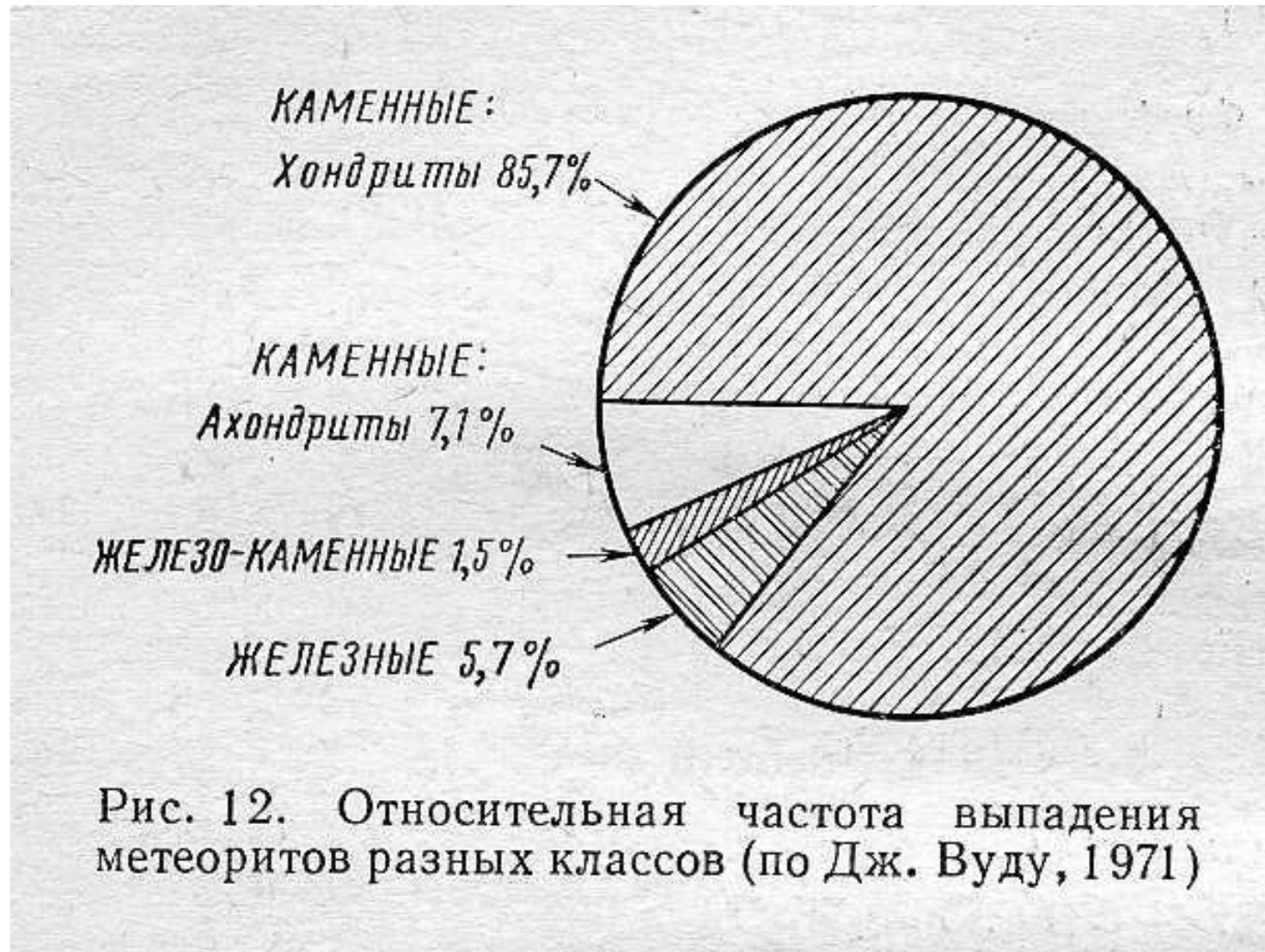
- Метеорит - камень, упавший на Землю из космоса.
- Метеориты - ценнейшие источники знаний о космосе, планетах и ранней истории Земли. Некоторые из них представляют собой очень древнее вещество, из которого образовывалась Земля, другие метеориты соответствуют ядру планет и могут рассказать о земном ядре, не доступном исследованию. Некоторые метеориты по происхождению из других космических тел.
- Изучением метеоритов занимаются науки метеоритика и космохимия. На сегодня найдено около 40 тысяч метеоритов.

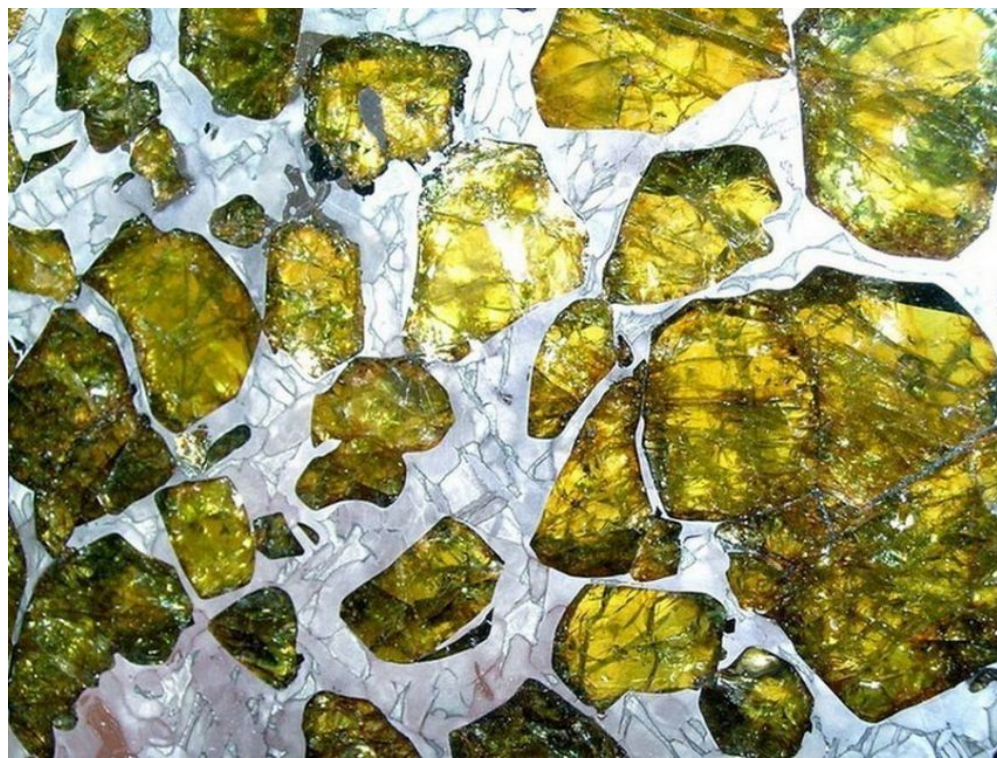
Классификация метеоритов

- Существует множество классификаций метеоритов. В большинстве классификаций они делятся на три обширных группы по основному слагающему компоненту: **железные, железо-каменные и каменные метеориты.**
- **Альтернативная классификация: хондриты и не хондриты**
 - Примитивные
 - Дифференцированные
 - Ахондриты
 - Железно-каменные
 - Железные

Геохимия метеоритов

O, Fe, Si, Mg, S, Ca, Ni, Al



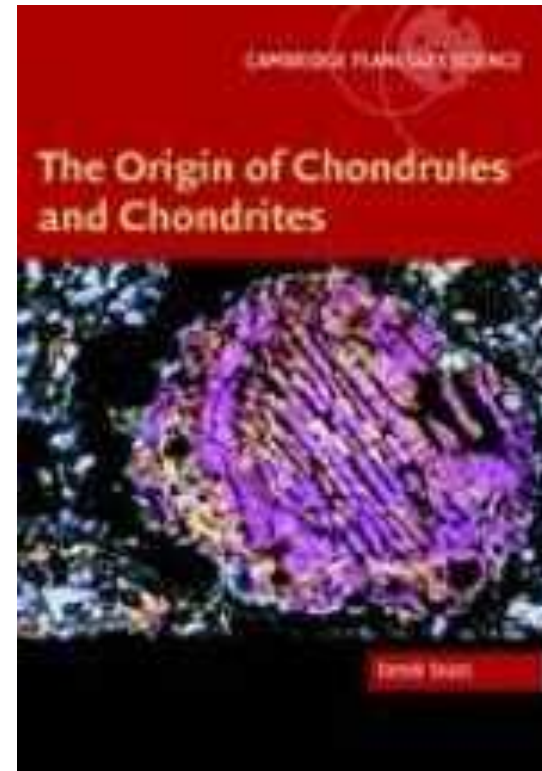
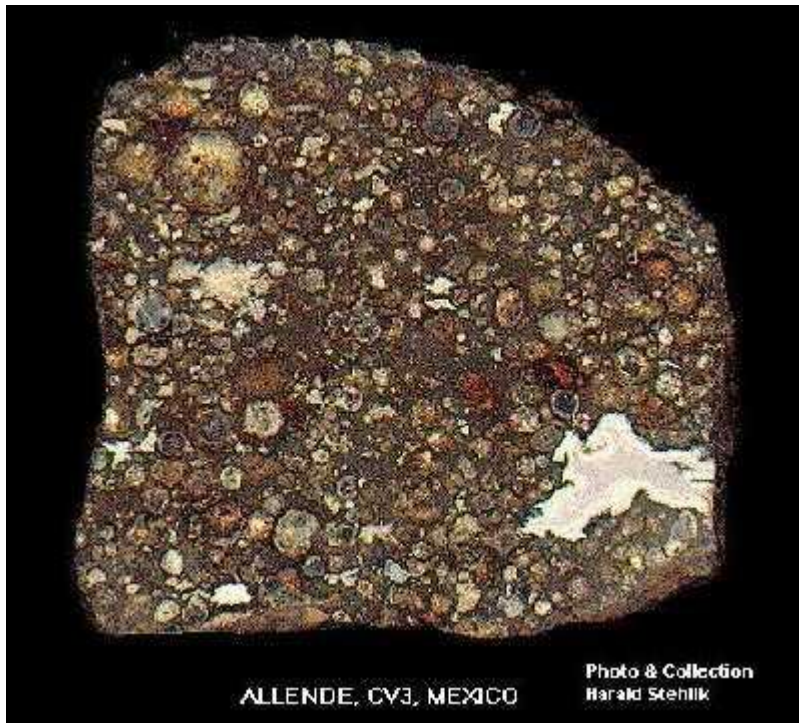


Палласит (от Палласово железо) - класс в типе железно-каменных метеоритов. Представляют собой железно-никелевую основу с вкраплениями кристаллов оливина.

Названы в честь немецкого учёного Петера Палласа, зарегистрировавшего "необычный объект" под Красноярском.



- **Хондры** (от греч. *chóndros* — зерно) — округлое образование размером в среднем 0.5-1,0 мм, являющееся главным структурным элементом 90 % метеоритов, именуемых хондритами. Представляют собой быстро затвердевшие капли расплавленного силикатного вещества.



Средний состав метеоритного вещества
(в массовых %)

Элемент	Железо-никель (металлическая фаза)	Троилит (сульфидная фаза)	Каменная (силикатная фаза)	Средний состав метеоритного вещества
O	—	—	43,12	32,30
Fe	90,78	61,1	13,23	28,80
Si	—	—	21,61	16,30
Mg	—	—	16,62	12,30
S	—	34,3	—	2,12
Ni	8,59	2,88	0,39	1,57
Al	—	—	1,83	1,38
Ca	—	—	2,07	1,33
Na	—	—	0,82	0,60
Cr	—	0,12	0,36	0,34
Mn	—	0,046	0,31	0,21
K	—	—	0,21	0,15
Ti	—	—	0,10	0,13
Co	0,63	0,208	0,02	0,12
P	—	0,305	0,17	0,11

- **Алленде** (Allende) - метеорит класса углистых хондритов. Упал в Мексике 8.02.1969 года, и был отчетливо виден огненный шар, прочертивший атмосферу, затем яркая вспышка и дождь из падающих фрагментов. Общий вес метеорита Алленде оценивается в несколько тонн. 2 т обломков были собраны, однако отдельные образцы находят до сих пор.

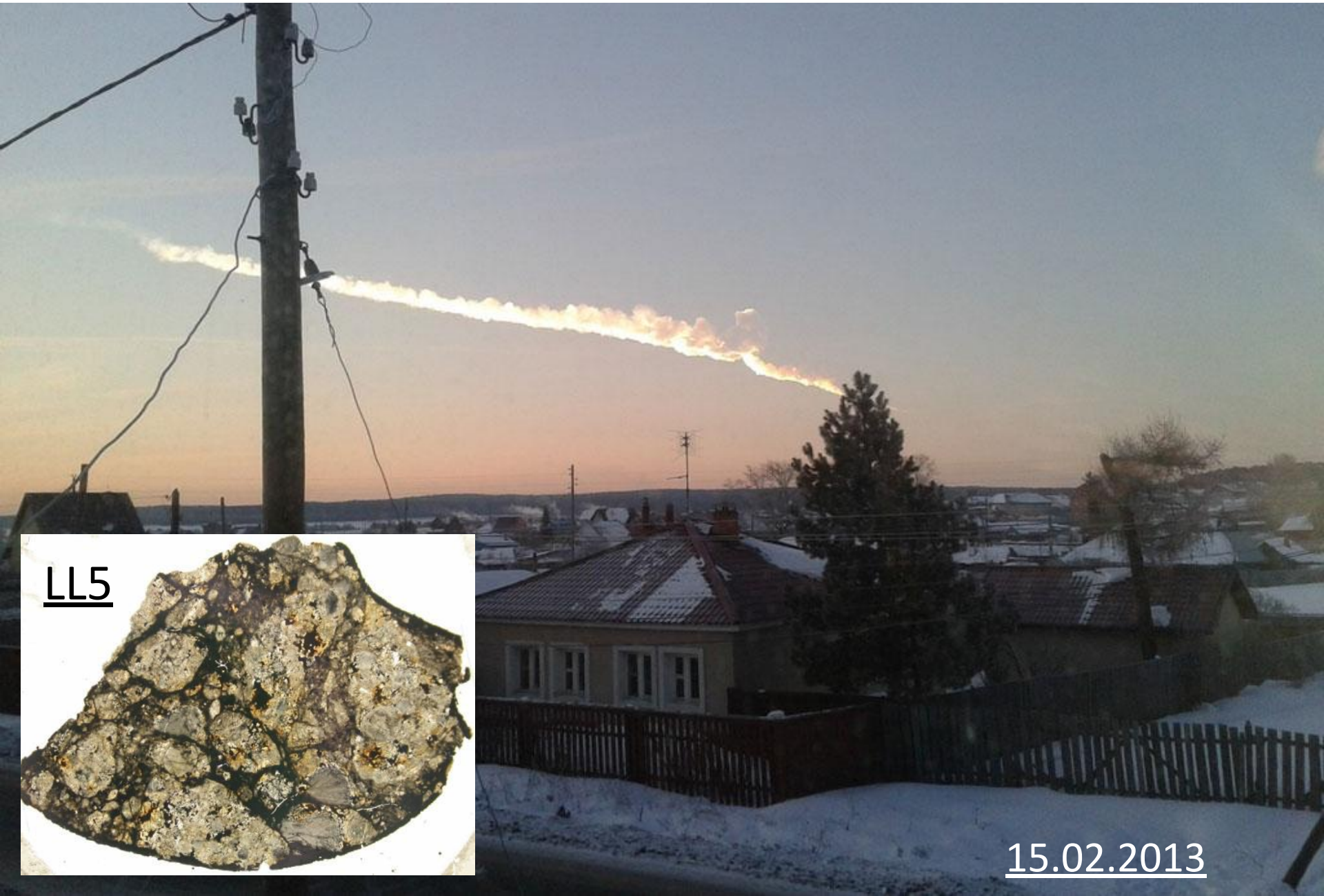
Метеорит Алленде является углистым хондритом, представляющим наиболее примитивную из известных форму материи во вселенной.



- Одна из гипотез образования углистых хондритов заключается в том, что в "самом начале времен" частички межзвездной пыли слипались друг с другом, нагревались и образовывали породы, сходные с углистыми хондритами.
- Другая теория, общепринятая на сегодня, заключается в том, что углистые хондриты образуются на самых поздних этапах остывания солнечной небулы, когда температура падает до 500-200 С. В этих условия могут осаждаться относительно летучие элементы и вода с углеродом.
- Тип углистых хондритов "CV3", к которому относится "Алленде", является одним из наиболее примитивных типов и характеризуется составом очень близким к валовому составу Солнечной Системы. До падения "Алленде", метеориты типа "CV3" были очень редки, всего 16 находок.

- **Строение**
- Мелкозернистая основная масса Алленде сложена железистым оливином. Общее содержание железа около 24 %, но при этом никелистое железо встречается в нем очень редко.
- На полированной поверхности метеорита заметны пальцеподобные включения. Они представлены смесью высокоТ оксидов и силикатов Ca, Al и Ti. Такие включения были названы **CAI** (calcium-aluminium inclusions). Предполагается, что такие включения кристаллизовались самыми первыми и могут быть старше Земли. Возраст оценивается в 4.6 миллиарда лет

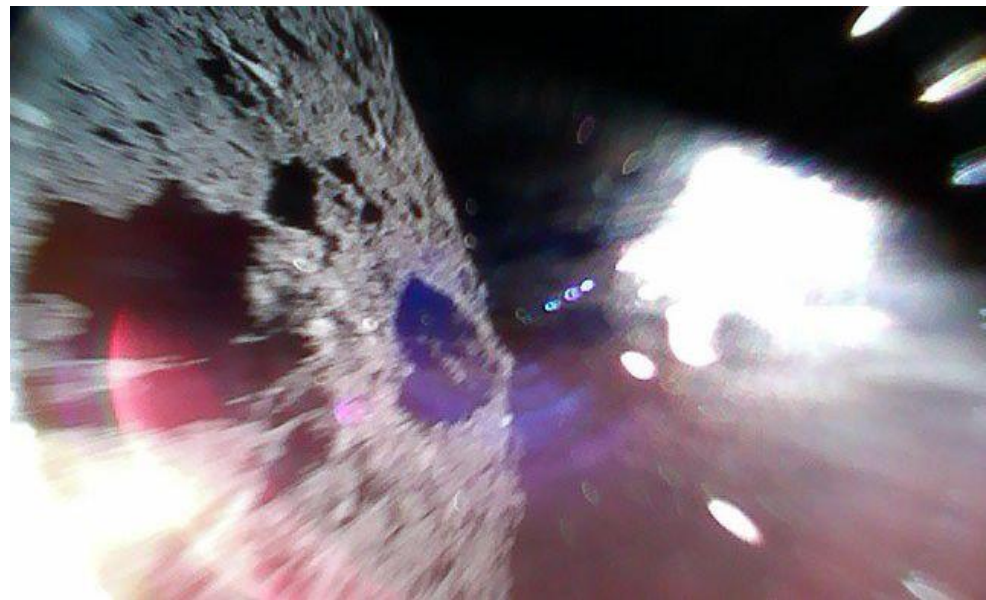
метеорит «Челябинск»



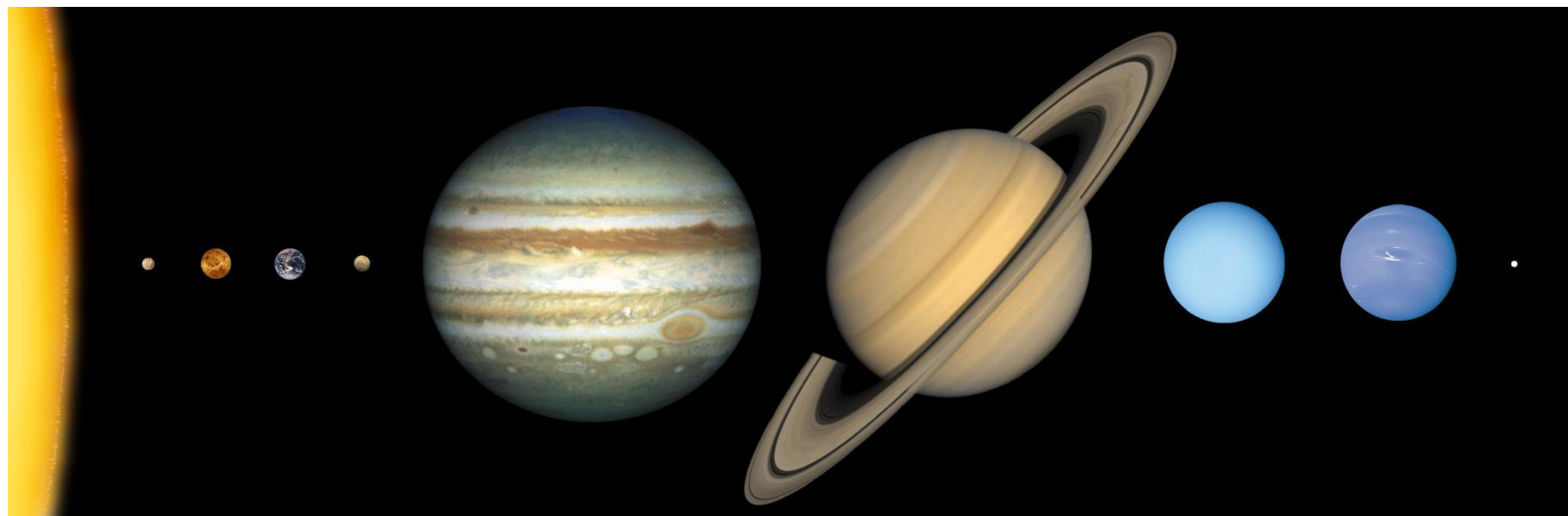
15.02.2013

Японские посадочные аппараты, выпущенные 21.09.2018 г. на поверхность астероида Рюгу космической миссией «Хаябуса-2», прислали на Землю первые фотографии с поверхности. Фотография была сделана во время «прыжка» по поверхности астероида. На снимке видна поверхность астероида, засветка части снимка произошла из-за солнечного света.

В будущем на поверхность астероида отправится более тяжелый аппарат MASCON, а также будет проведен эксперимент по созданию ударного кратера и забору вылетевшего вещества. Возвращение на Землю взятых

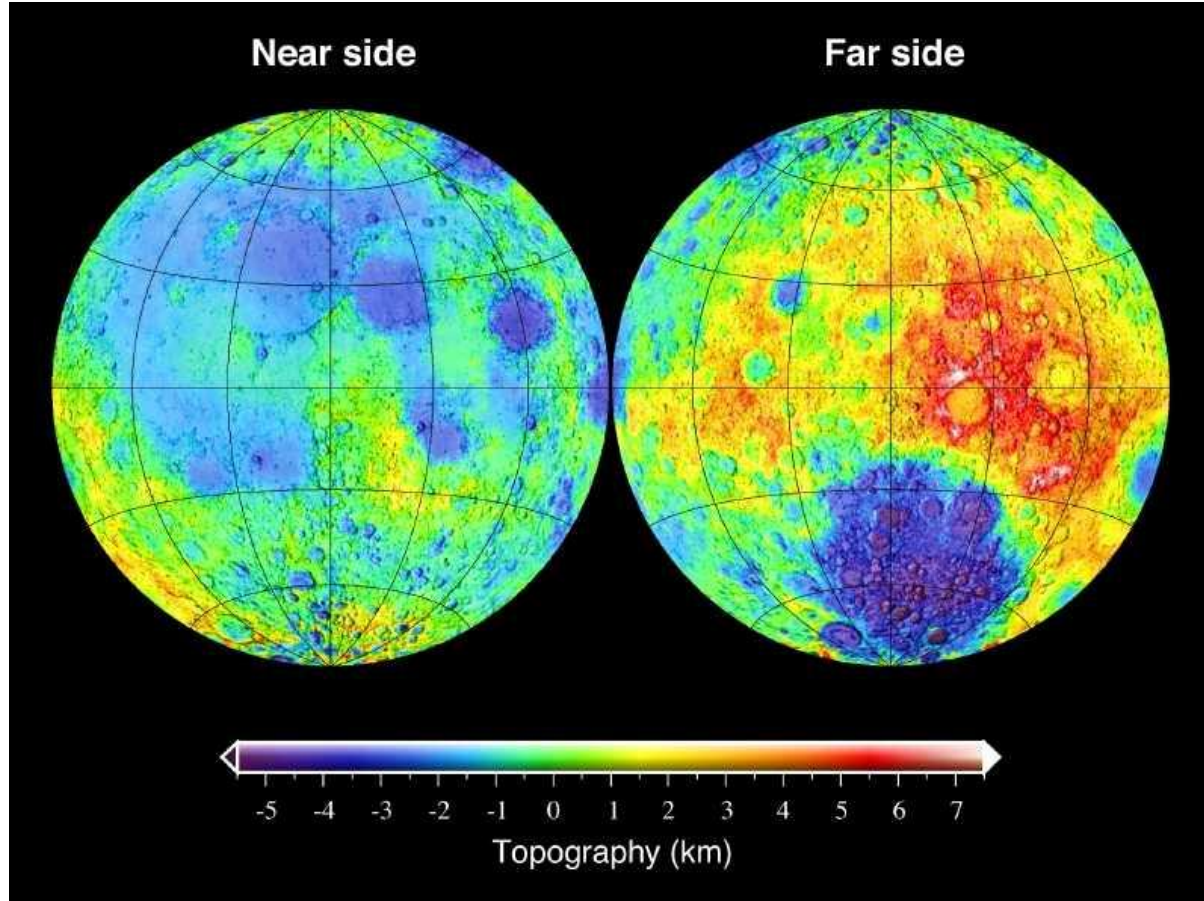


Химический состав планет Солнечной системы



Луна

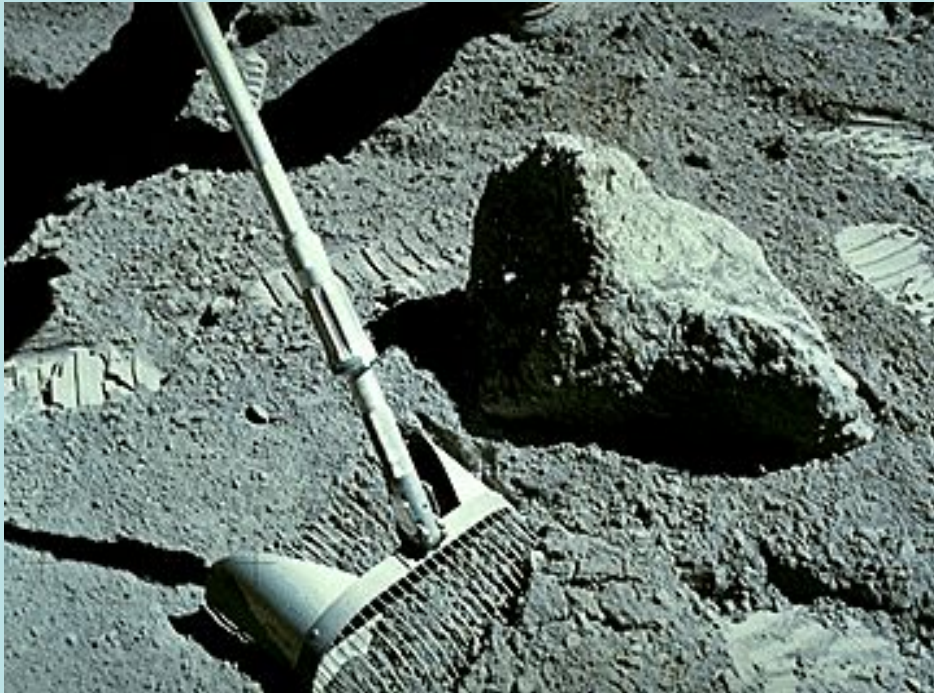
- Состав лунного грунта существенно отличается в морских и материковых районах Луны. Лунные породы обеднены железом, водой и летучими компонентами.





□ Driving the Lunar Roving Vehicle, Astronaut Harrison Schmitt

□ The Rover greatly enhanced lunar exploration on the last three Apollo missions by allowing much longer traverses around the landing sites



- Astronaut Collecting walnut-sized rocks with a rake
- These samples proved to be extremely valuable because they provided a broad sampling of the rock types present at a landing site



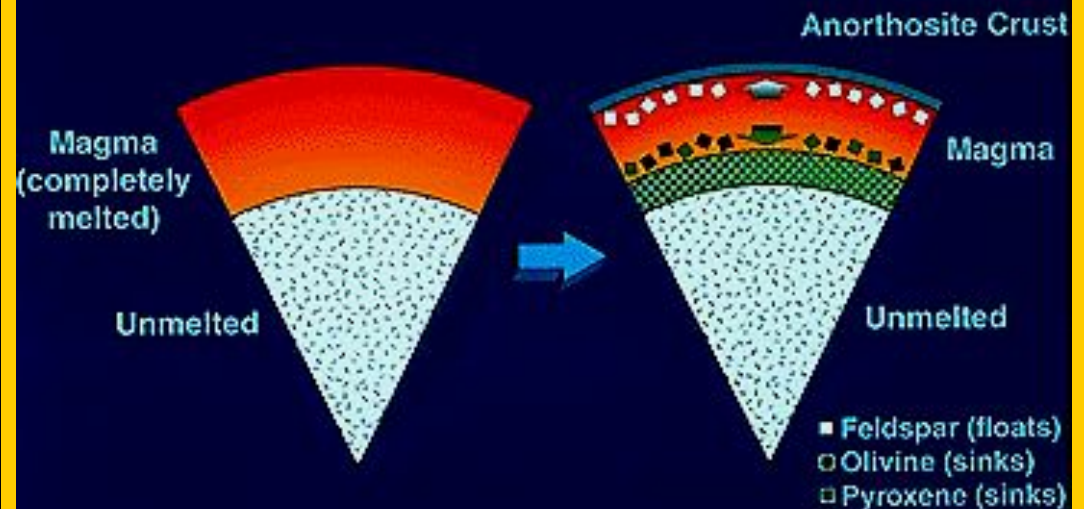
Samples remain in the glass and steel cabinets, bathed in an atmosphere of pure nitrogen, to keep the samples from altering by reaction with air.

NASA JOHNSON SPACE CENTER
HOUSTON, TEXAS

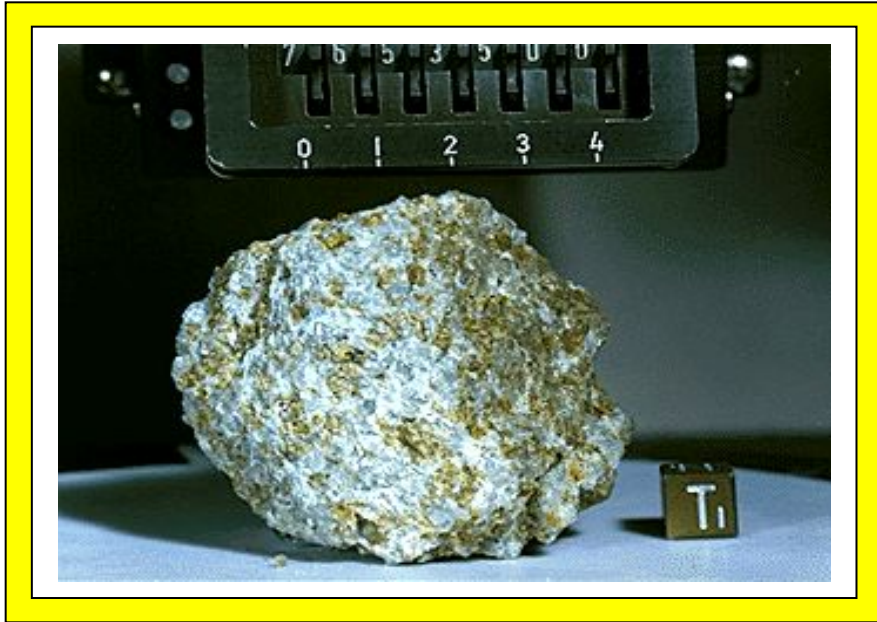
Anorthosites



The Lunar Magma Ocean



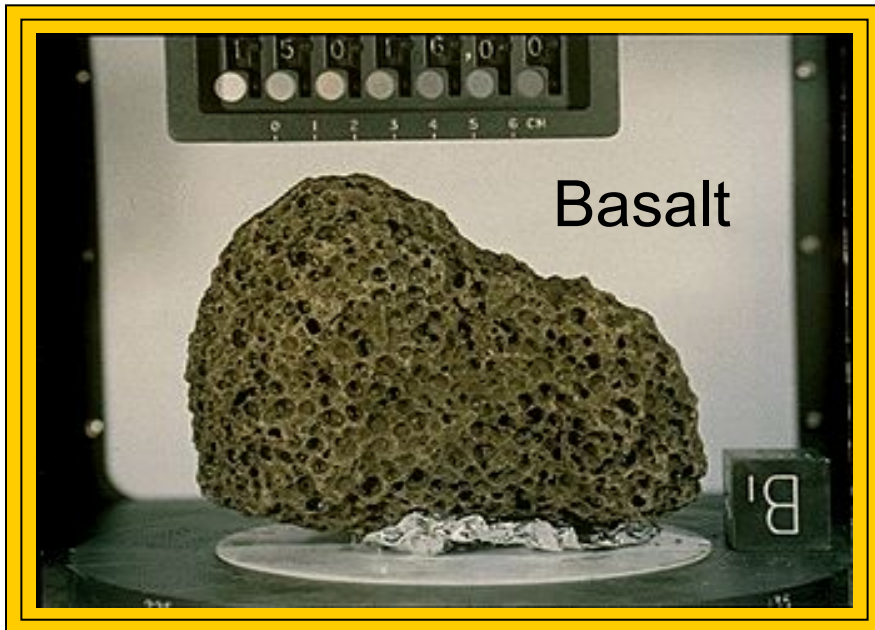
□ The Troctolite is composed of olivine and plagioclase feldspar



Breccias

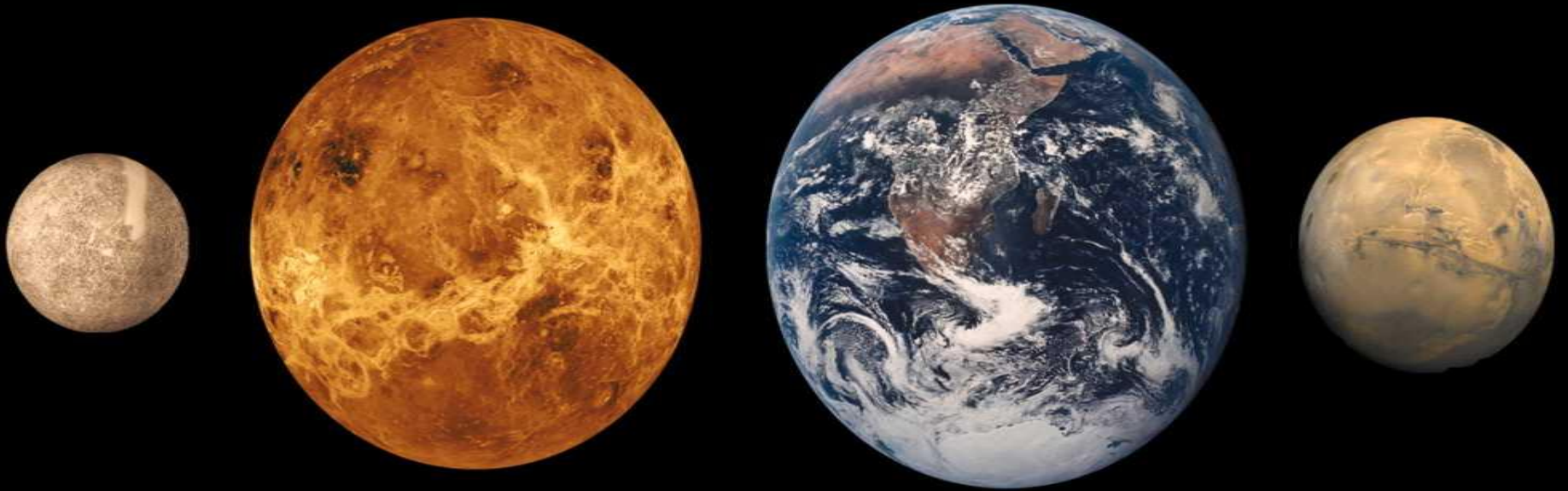


Basalt



Элементы	Доставлен «Луной-20» с материка	Доставлен «Луной-16» с лунного моря
Si	20.0	20.0
Ti	0.28	1.9
Al	12.5	8.7
Cr	0.11	0.20
Fe	5.1	13.7
Mg	5.7	5.3
Ca	10.3	9.2
Na	0.26	0.32
K	0.05	0.12

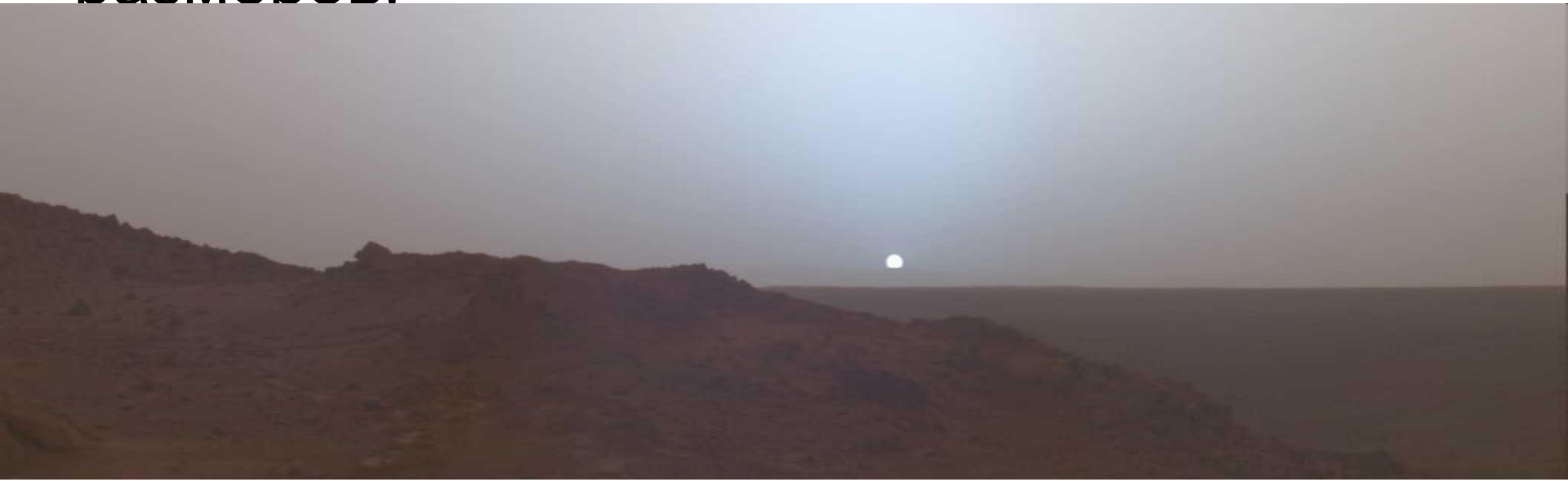
Mars



Mars is the fourth planet from the Sun and is commonly referred to as the Red Planet. The rocks and soil have a red or pink hue due to the iron oxide (rust) they contain.

Марс

- В отличие от Земли, на Марсе нет движения литосферных плит. В результате вулканы могут существовать гораздо более длительное время и достигать гигантских размеров.



GEOLOGIC UNITS

□ A polar layered deposits

□ H materials

□ N-EH volcanic materials

□ EA Vastitas Borealis unit

□ LN-EH knobby materials

□ N materials

□ LH-LA volcanic materials

□ LN-EH materials

□ EN massif material

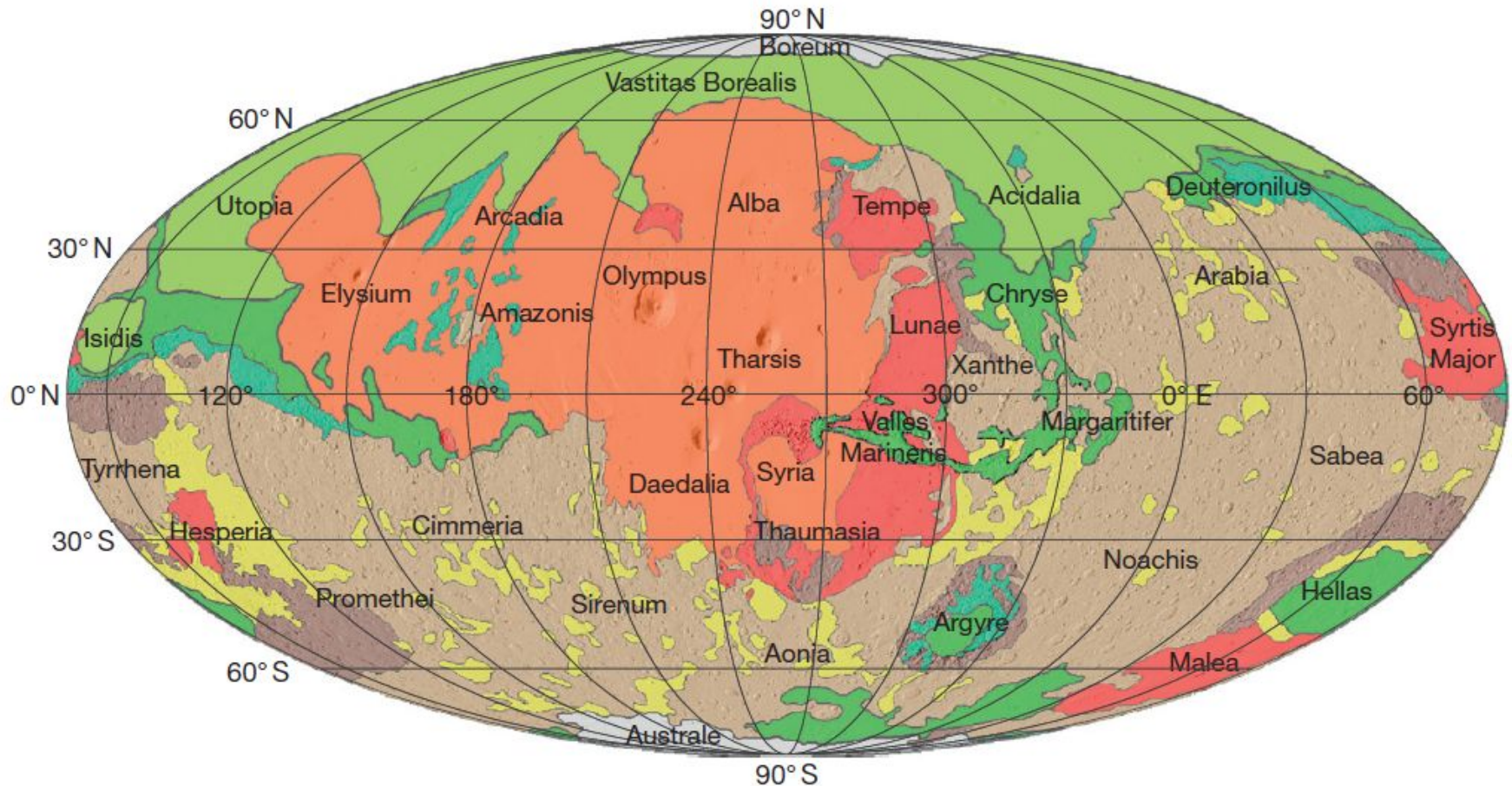


Figure 1 Generalized geologic map of Mars. The ages of units are abbreviated as early (E) and late (L) Noachian, Hesperian, and Amazonian (N, H, and A, respectively). Reproduced from Nimmo F and Tanaka KL (2005) Early crustal evolution of Mars. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* 33: 133–161. With permission from Annual Reviews.

Mars Exploration Rovers



The Mars Exploration Rovers, Spirit and Opportunity, are currently studying how past water activity on Mars has influenced the red planet's environment over time.

MARS ROVER EVOLUTION



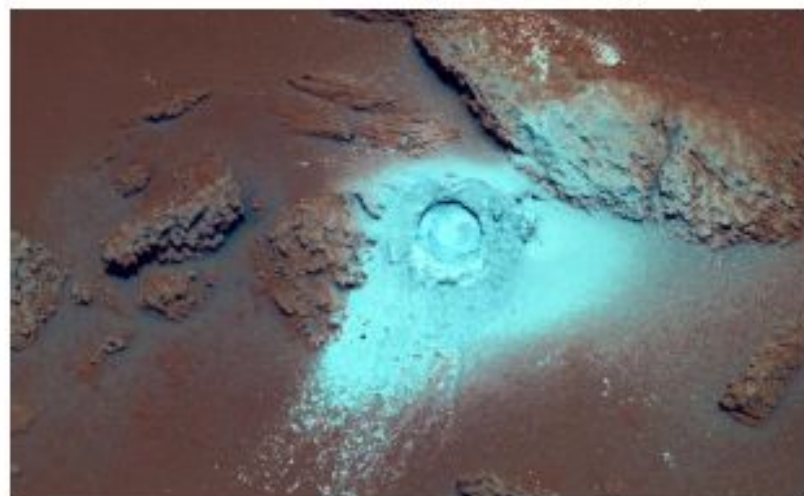
Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

Mars 2020 Project

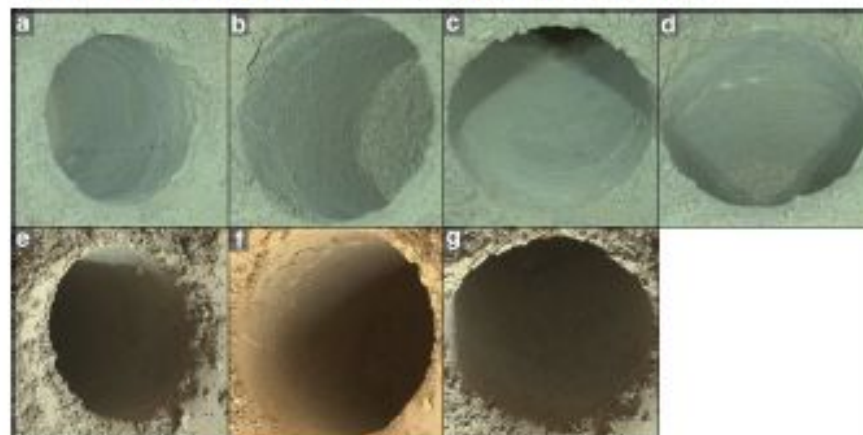
Sojourner: *bulk geochemistry, no sampling*



MER: *abrasion + bulk geochemistry*



MSL: *powder drilling + bulk geochemistry*



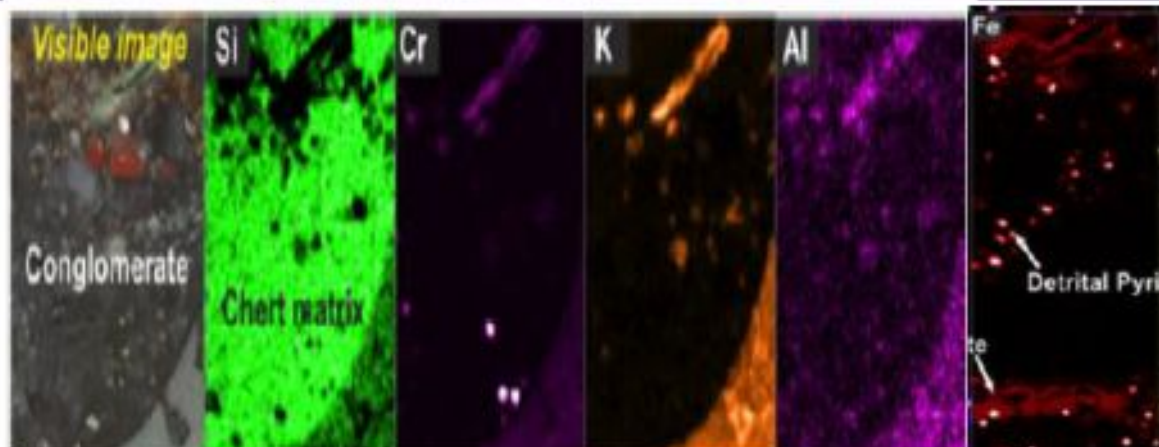
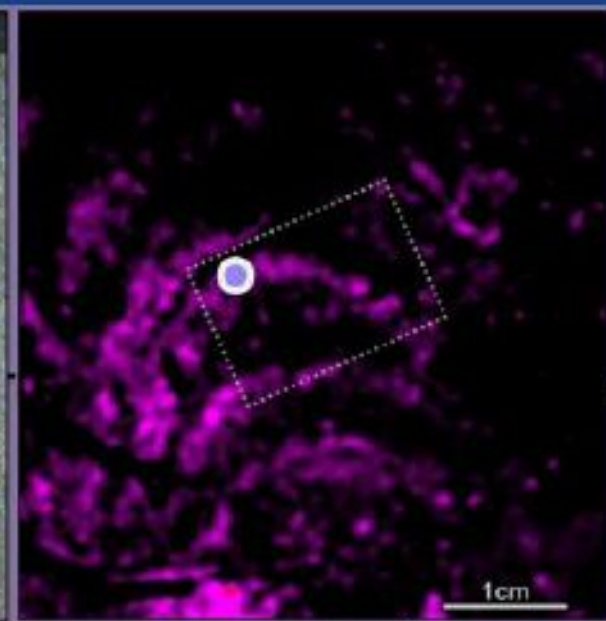
Sampling supporting
exploration...

MARS 2020: *coring/caching* + spatially resolved geochemistry



Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

Mars 2020 Project



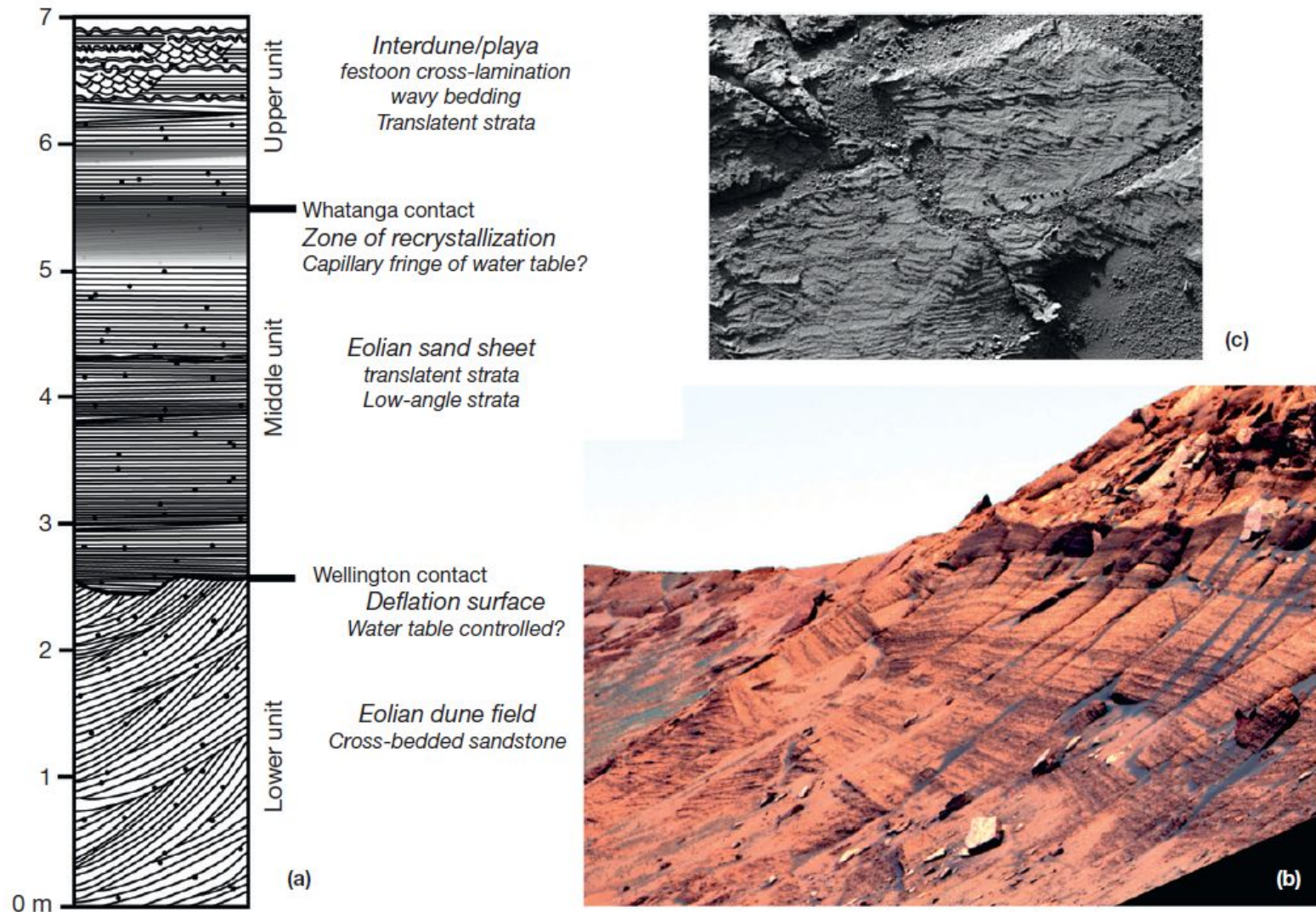


Figure 29 (a) Stratigraphic column of the Burns formation in the vicinity of the landing site showing the three major sedimentary facies. (b) False color image of Burns Cliff in Endurance crater showing the sharp contact between the lower cross-bedded dune facies (lower left) and middle parallel bedded eolian sand sheet facies (upper right). The contact represents a deflation surface caused by moisture from a near-surface groundwater table. Burns Cliff is ~7 m high. Pancam mosaic acquired on Sol 278 using 753, 535, and 432 nm filters. (c) Pancam image of rock Overgaard at Erebus crater, south of the landing site, showing well-developed centimeter-scale festoon ripple cross laminations characteristic of the upper subaqueous interdune facies of the Burns formation. Image is approximately 35 cm across and was acquired on Sol 690 using the 430 nm filter.

- Современные модели внутреннего строения Марса предполагают, что Марс состоит из коры со средней толщиной 50 км (и максимальной до 130 км), силикатной мантии толщиной 1800 км и ядра радиусом 1480 км.
- Ядро частично жидкое и состоит в основном из Fe с примесью 14-17 масс. % S, причём содержание лёгких элементов вдвое выше, чем в ядре Земли. Для некоторых районов Марса составлена подробная геологическая карта.
- Атмосфера Марса, состоящая в основном из углекислого газа, очень разрежена. Давление у поверхности Марса в 160 раз меньше земного. Из-за большого перепада высот на Марсе, давление у поверхности сильно изменяется.

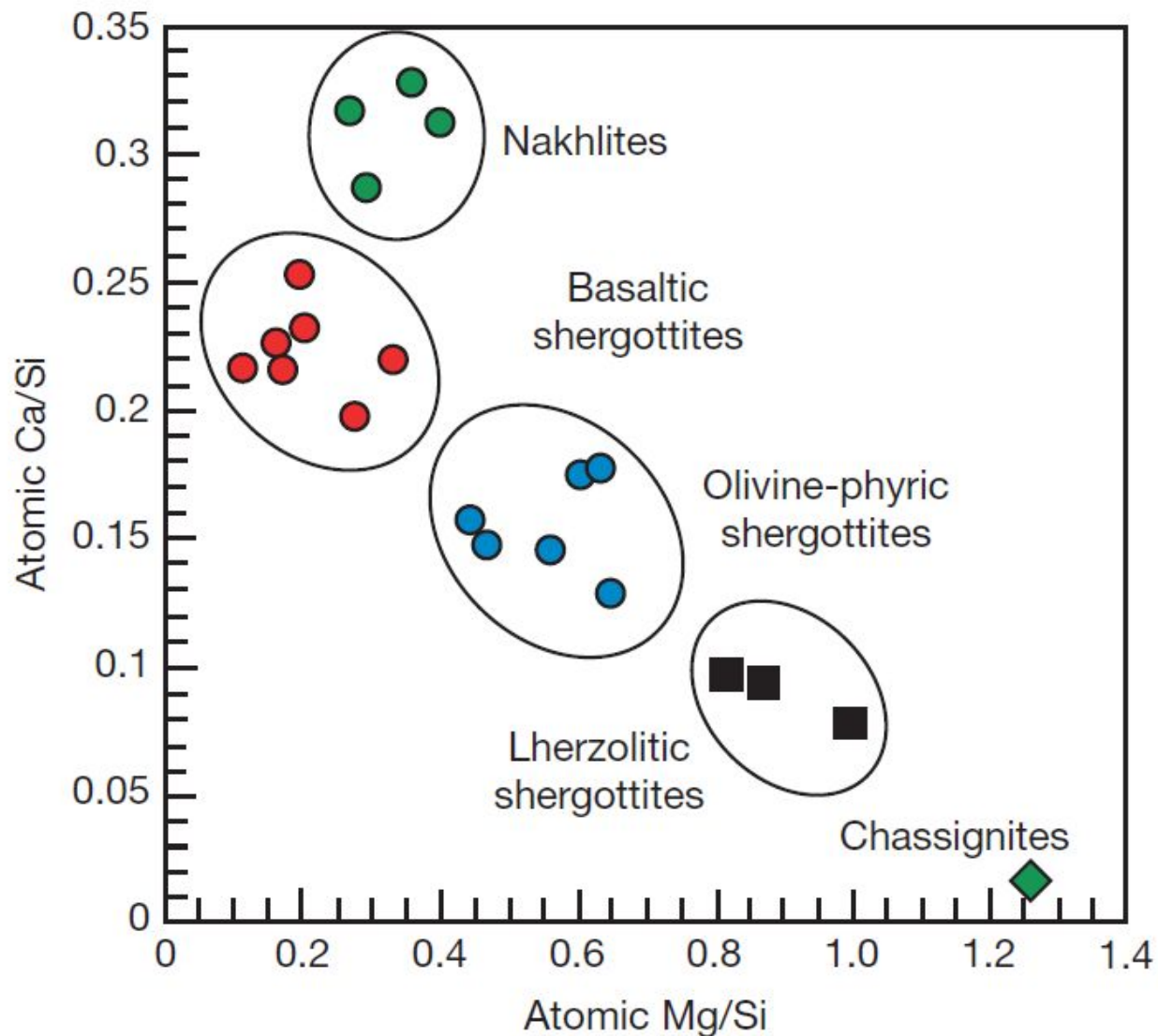
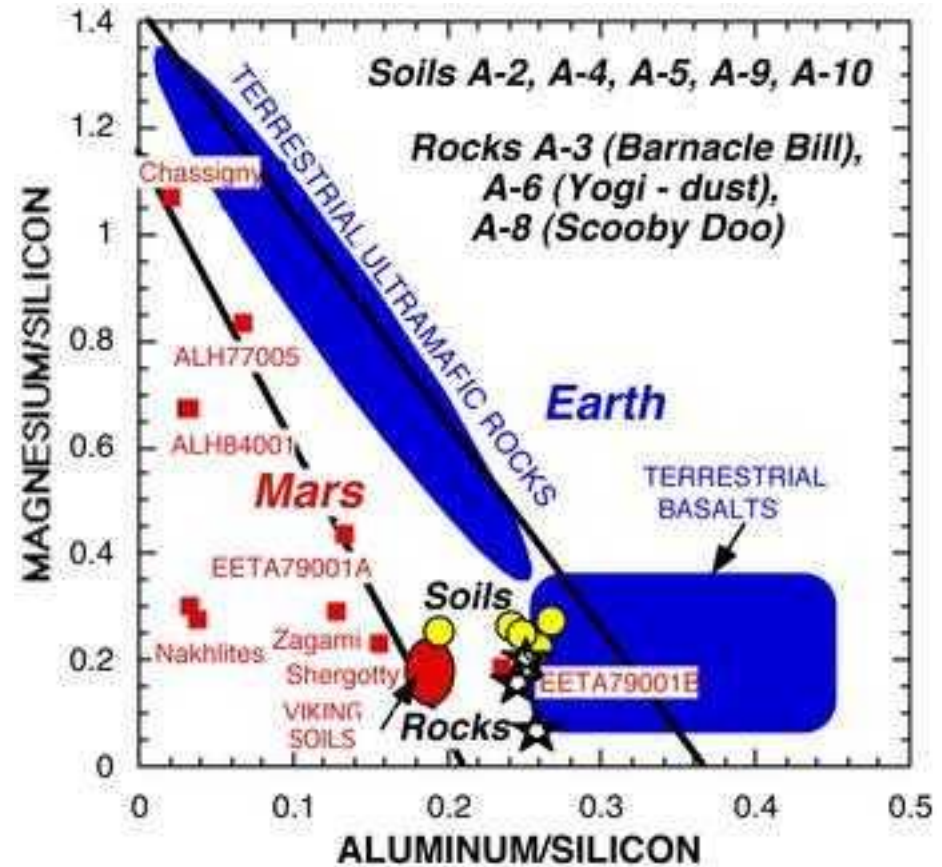
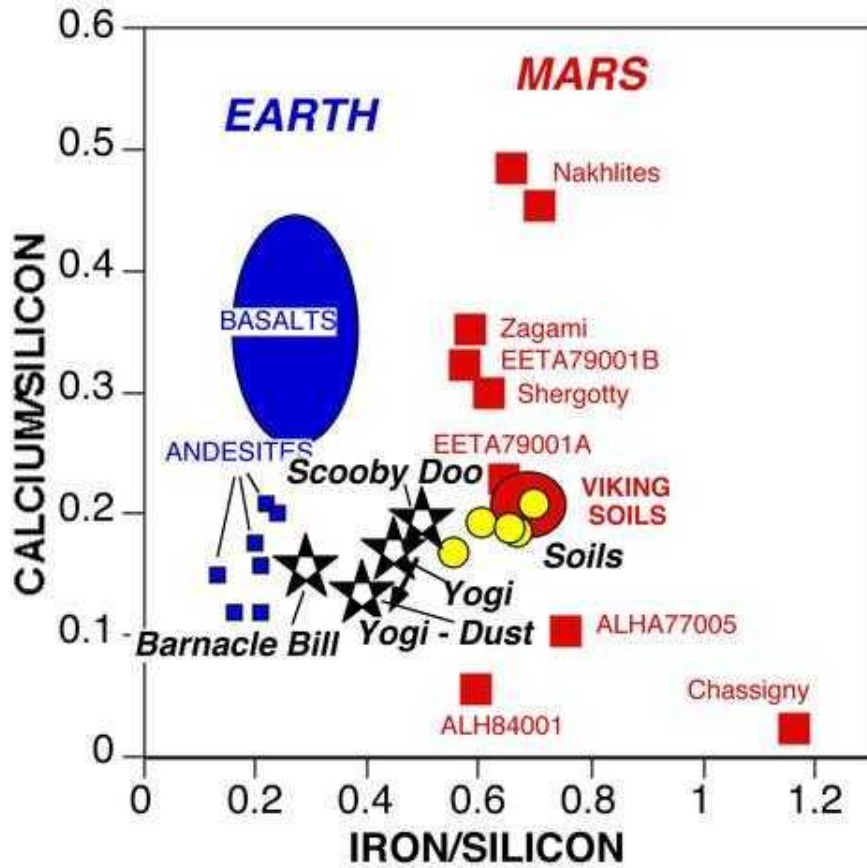


Figure 6 Geochemical classification of SNC meteorites. Reproduced from [Ouri Y, Shirari N, and Ebihara M \(2003\)](#) Chemical composition of Yamato (Y)980459 and Y000749: Neutron-induced prompt gamma-ray analysis study. *Antarctic Meteorite Research* 16: 80–93.

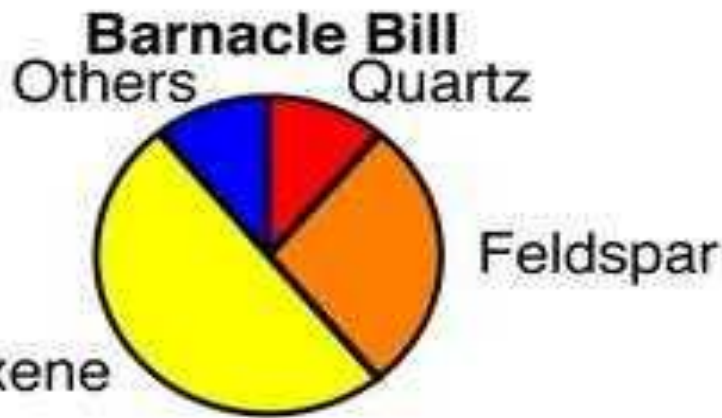
Марс – меньше Al, Mg; больше Fe



МАРС				ЗЕМЛЯ		
	A-3, Rock "Barnacle Bill"	A-5, Soil	SNCs (Mars Meteorites)	Continental Crust		Oceanic Crust
%				Average	Sediments	
MgO	3.1	8.6	9.3 - 31.6	3.1	3.1	7.7
Al2O3	12.4	10.1	0.7 - 12.0	15.2	13.0	15.6
SiO2	55.0	43.8	38.2 - 52.7	60.2	50.0	50.7
K2O*	1.4	0.7	0.022 - 0.2	2.9	2.0	0.17
CaO	4.6	5.3	0.6 - 15.8	5.5	8.4	11.4
TiO2	0.7	0.7	0.1 - 1.8	0.7	0.7	1.5
MnO*	0.9	0.6	0.44 - 0.55	0.1	0.1	0.16
FeO	12.7	17.5	17.6 - 27.1	6.05	5.5	9.9
FeO/MnO	14.1	29.2	37.0 - 51.5	-	-	-

Минералогический состав горных пород Марса

Normative Minerals



Orthopyroxene



Others

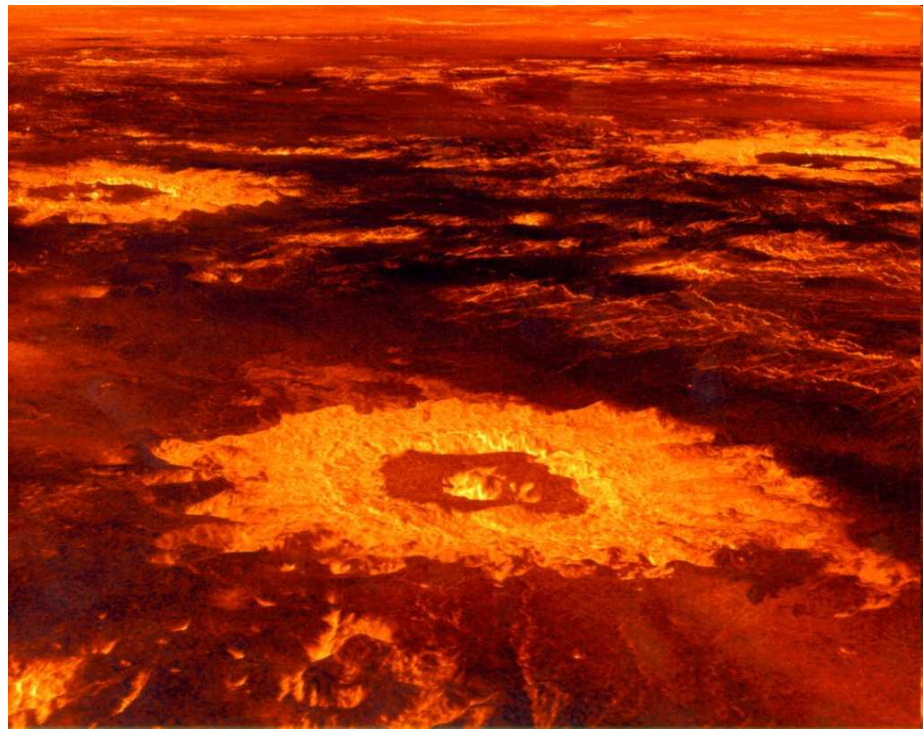
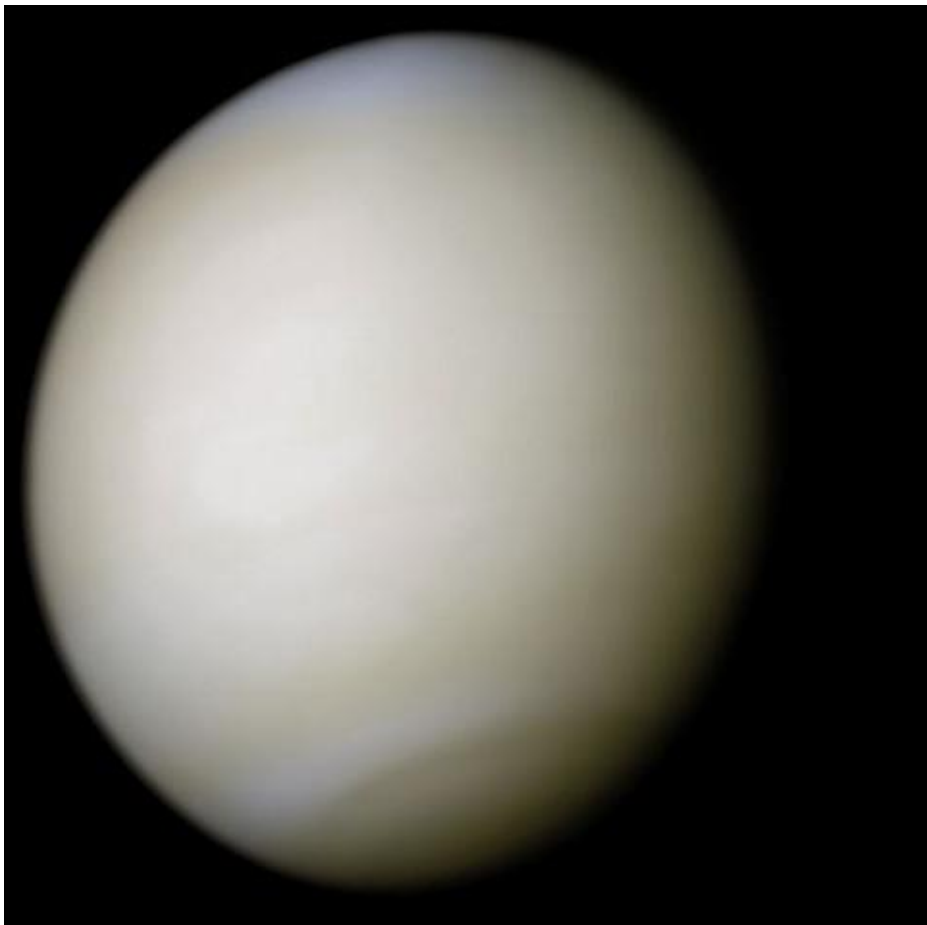
Quartz

Orthopyroxene

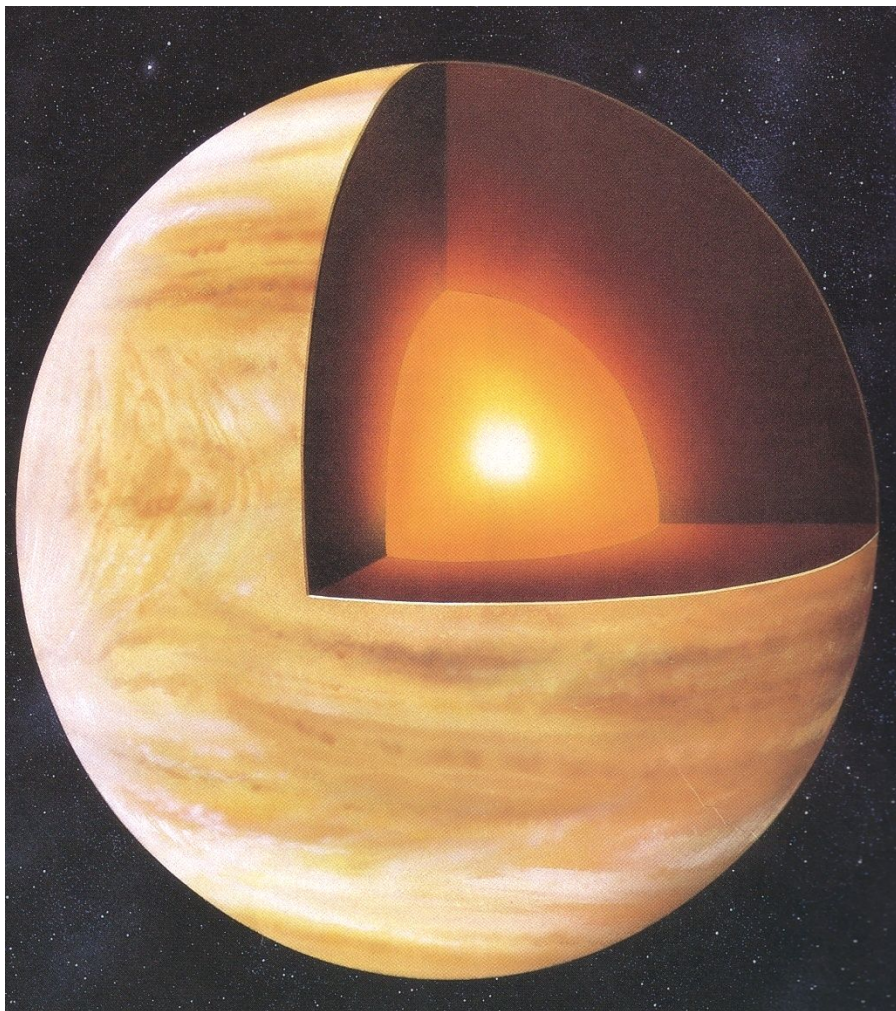
Feldspar

Others = oxides & sulfides.

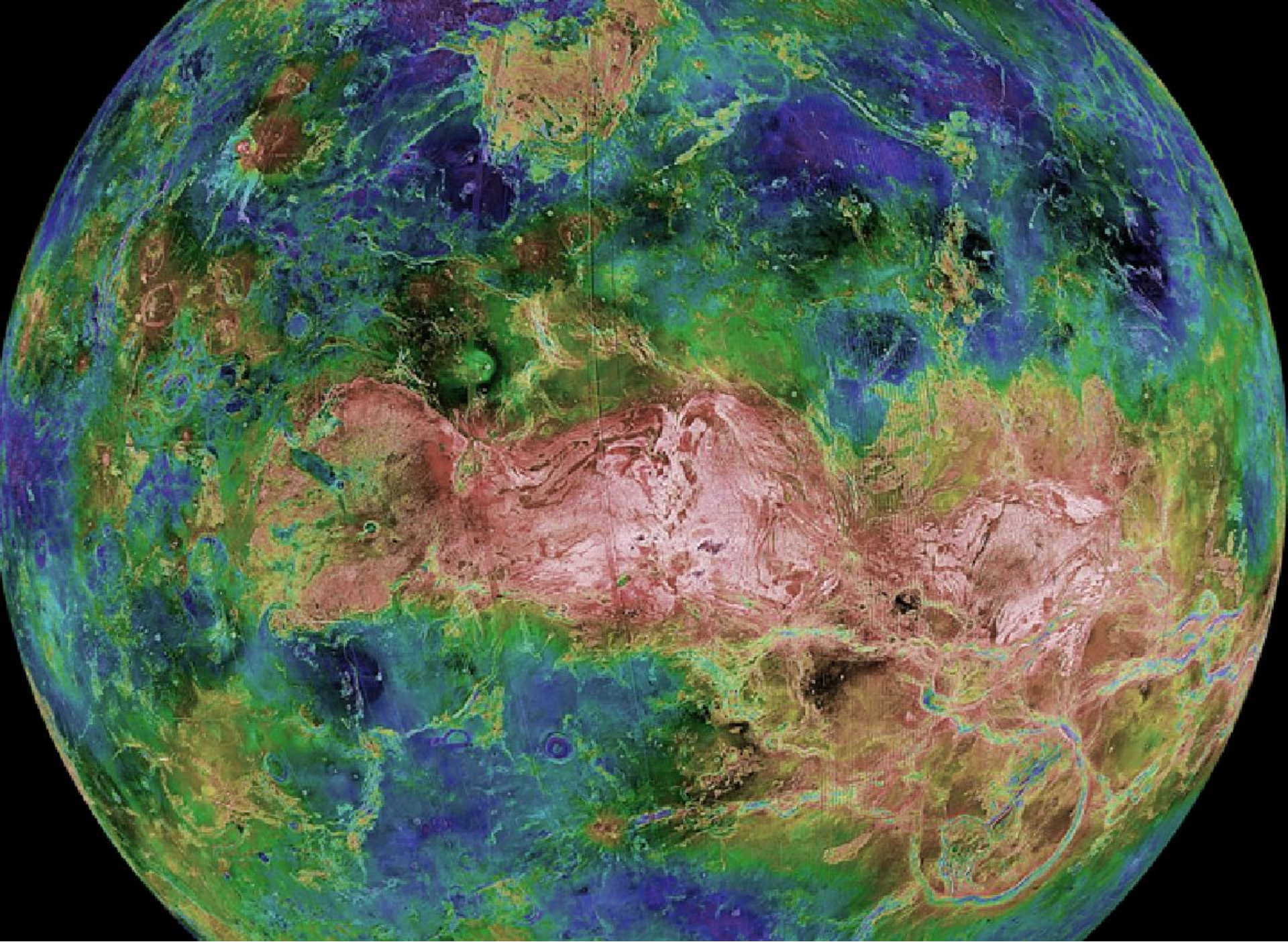
Венера



Кратеры на поверхности
Венеры



Venus is often called the sister planet to Earth because it is most like earth in many different ways.



- Исследование поверхности Венеры стало возможным с развитием радиолокационных методов. Наиболее подробную карту составил американский аппарат «Магеллан» - 98 % поверхности. Картографирование выявило на Венере обширные возвышенности, сравнимые по размерам с земными материками.
- На поверхности планеты также выявлены многочисленные кратеры. Вероятно, они образовались, когда атмосфера Венеры была менее плотной. Значительная часть поверхности планеты геологически молода (порядка 500 млн лет). 90 % поверхности планеты покрыто застывшей базальтовой лавой.

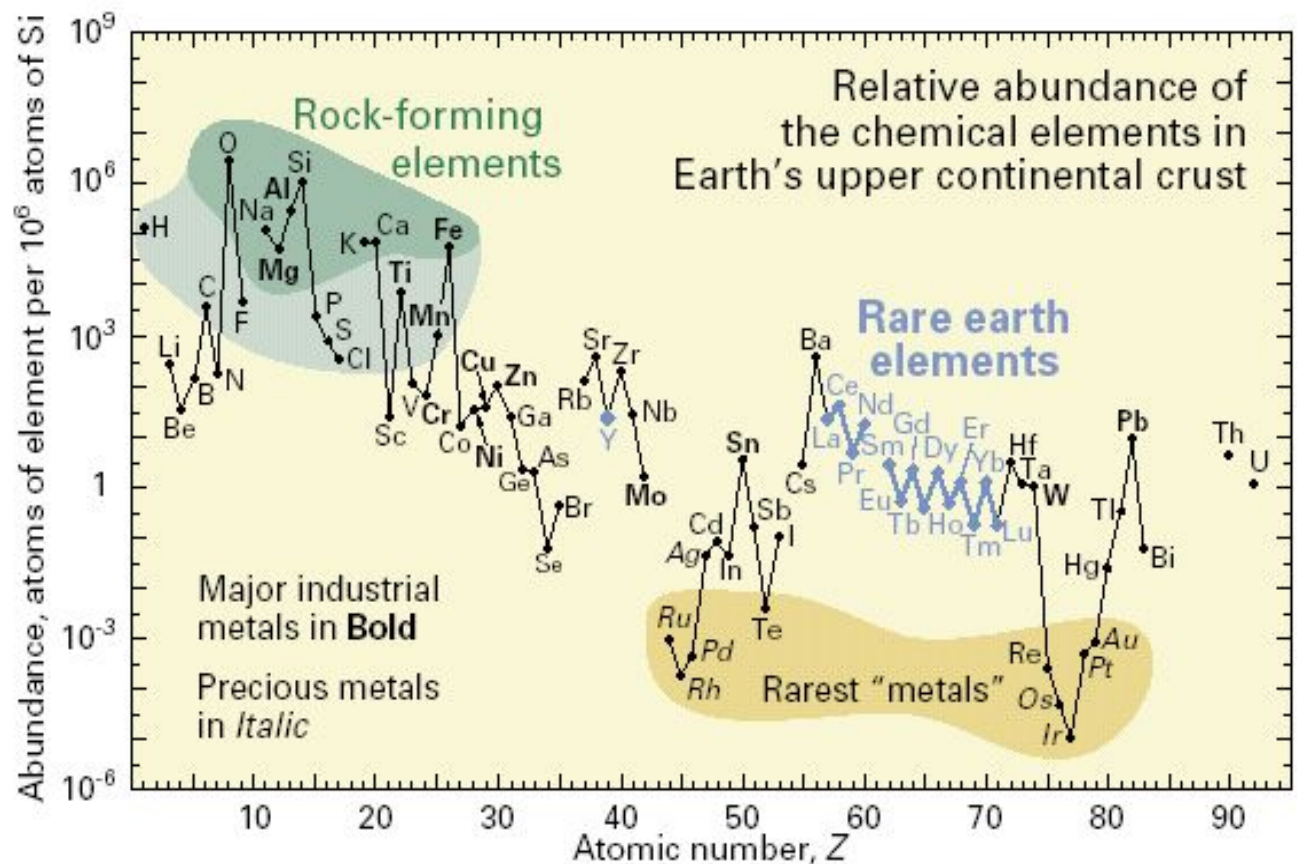
- Предложено несколько моделей внутреннего строения Венеры. Согласно главной из них, на Венере имеется три оболочки.
- Первая- **кора** - толщиной примерно 16 км.
- Далее - **мантия**, силикатная оболочка, простирающаяся на глубину порядка 3300 км до границы с железным **ядром**, масса которого составляет около четверти всей массы планеты.
- Поскольку собственное магнитное поле планеты отсутствует, то следует считать, что в железном ядре нет перемещения заряженных частиц - электрического тока, вызывающего магнитное поле, следовательно, движения вещества в ядре не происходит, то есть оно находится в твёрдом состоянии.

СТРОЕНИЕ И СОСТАВ ЗЕМЛИ

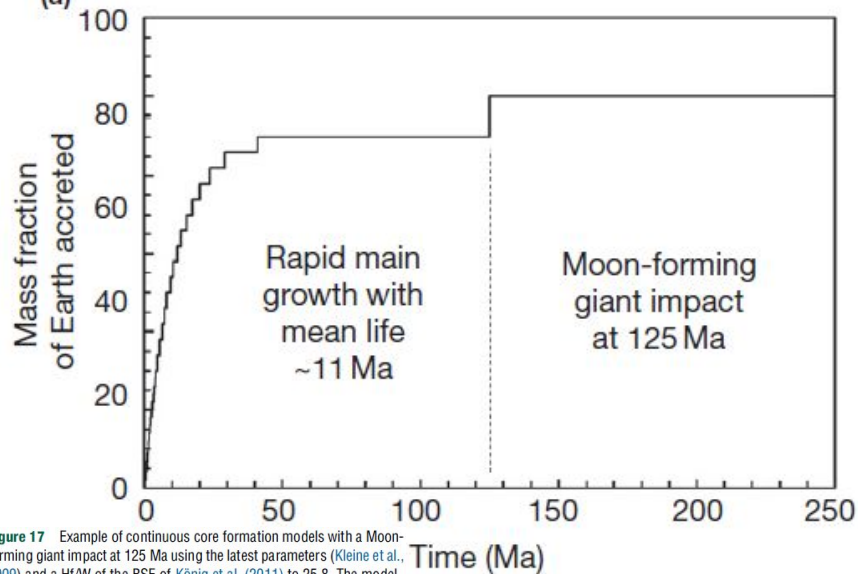
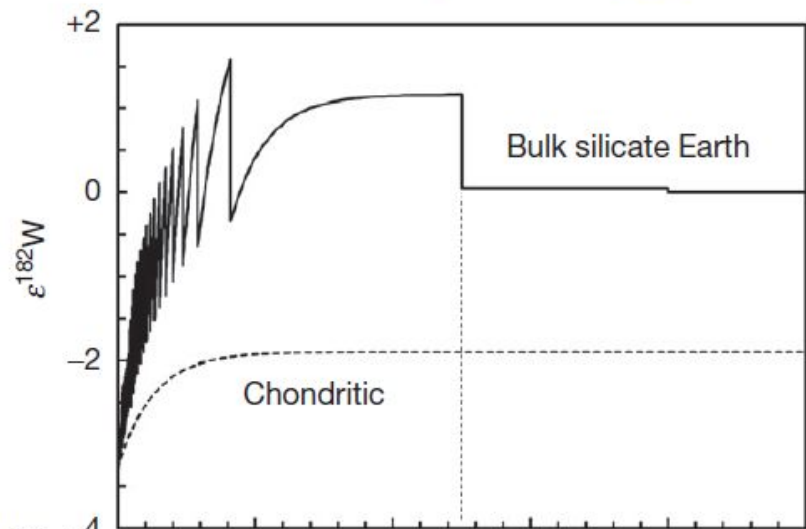
Источники данных для определения состава глубинных оболочек Земли

- Глубинная геофизика (в основном – сейсмология)
- Петрология (ксенолиты глубинных пород)
- Метеориты
- Термодинамическое моделирование

- Распространенность химических элементов на Земле связана с их происхождением во Вселенной.
- Распространенность химических элементов на Земле напрямую связана с устойчивостью их ядер



Full equilibration of accreted metal with bulk silicate Earth



Partial (50%) equilibration of accreted metal with bulk silicate Earth

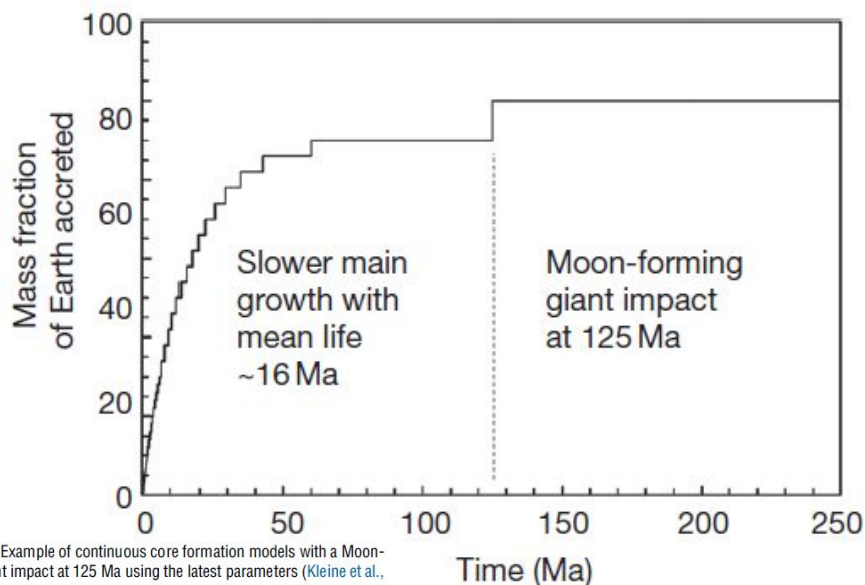
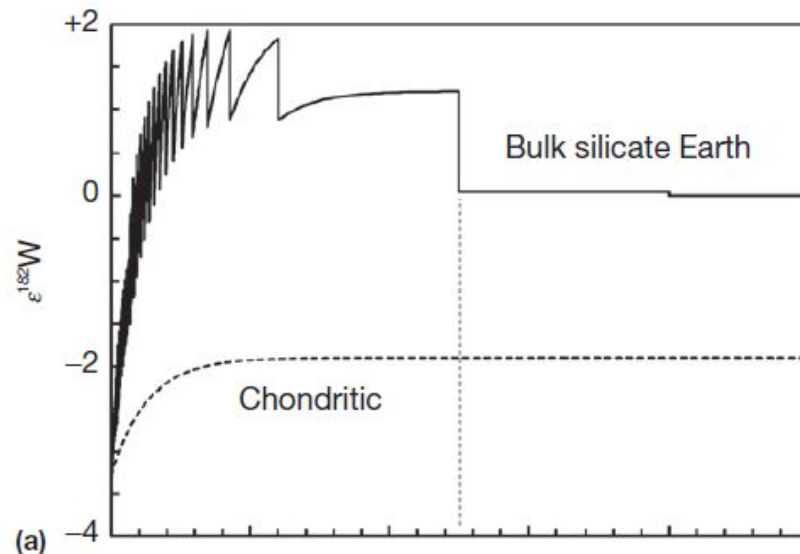
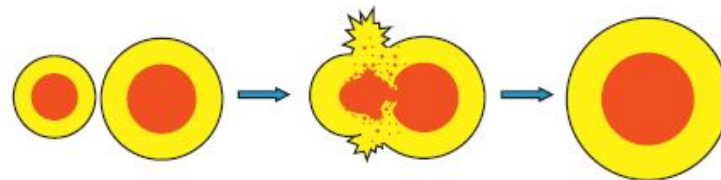
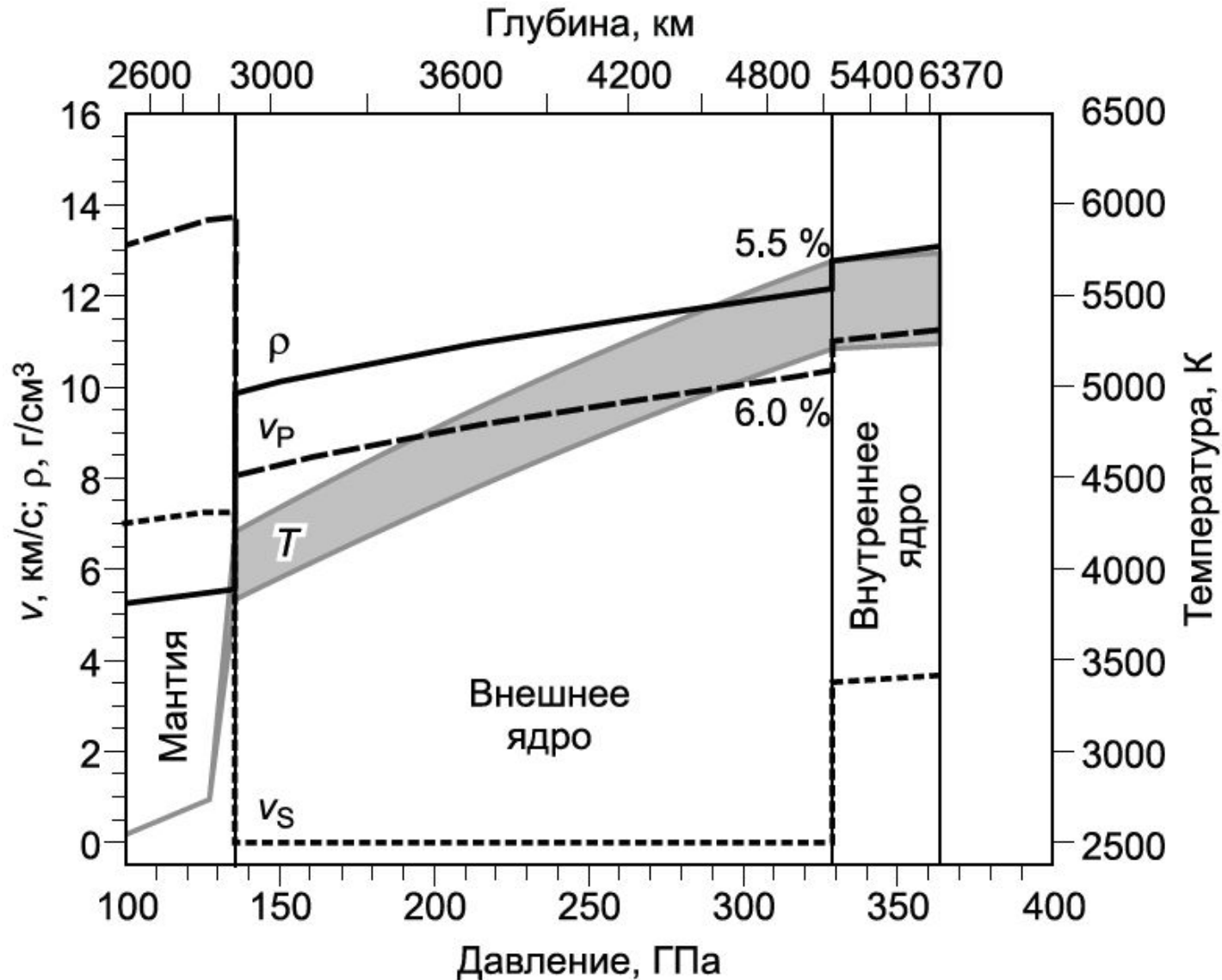


Figure 17 Example of continuous core formation models with a Moon-forming giant impact at 125 Ma using the latest parameters (Kleine et al., 2009) and a Hf/W of the BSE of König et al. (2011) to 25.8. The model

Figure 18 Example of continuous core formation models with a Moon-forming giant impact at 125 Ma using the latest parameters (Kleine et al., 2009) and the Hf/W of the BSE of König et al. (2011) of 25.8. The model

На сегодняшний день ядро составляет примерно 32 % массы и 16 % объема Земли и соответствует *PT*-параметрам от 136 ГПа и ≈ 4000 К до 364 ГПа и 5000-6000 К.



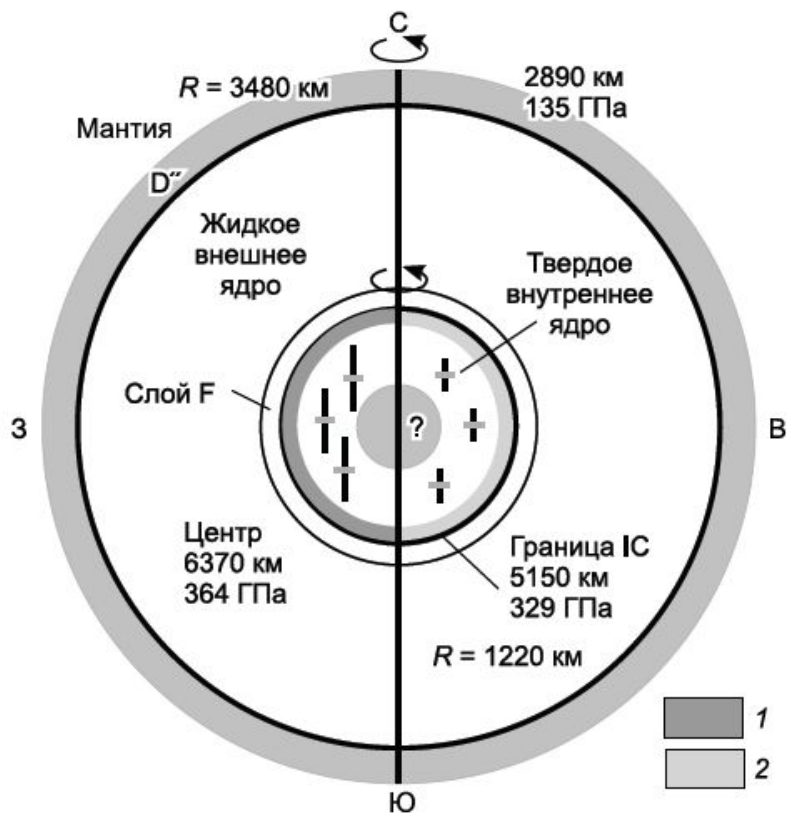


Рис. 2. Схема строения ядра Земли, отражающая основные результаты сейсмологических исследований.

Показаны слой F с пониженными скоростями v_p , изотропная структура верхнего слоя внутреннего ядра с различиями в полушариях, наличие дополнительного внутреннего ядра (под вопросом). Значками отмечена амплитуда анизотропии сейсмических волн в полярном и экваториальном направлениях, по данным работ [Deuss, 2014; Souriau, Calvet, 2015] с изменениями. 1 — низкая скорость, слабое затухание; 2 — высокая скорость, сильное затухание.

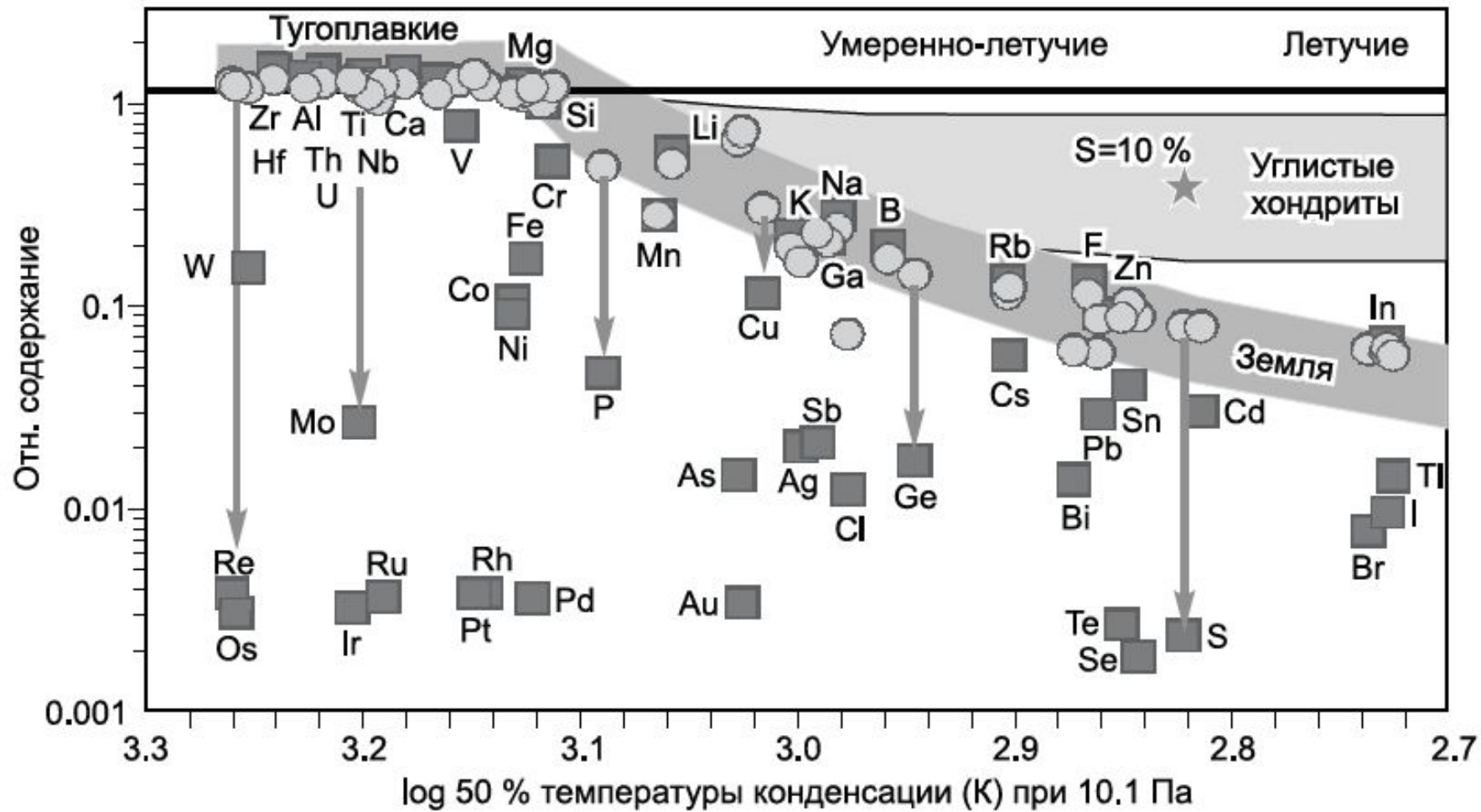


Рис. 4. Относительное содержание элементов в Земле (кружки) и примитивной мантии (квадраты) в зависимости от 50 % температуры конденсации при 10.1 Па.

Данные нормированы по углистому хондриту CI и содержанию Si. Стрелками выборочно показан дефицит элементов в мантии Земли. Звезда показывает примерное положение точки для S, если принять ее единственным легким элементом в ядре Земли. Диаграмма показывает, что большинство сидерофильных и халькофильных элементов сосредоточены в ядре Земли. Использованы данные работ [Lodders, 2003; McDonough, 2014; Palme, O'Neill, 2014].

По геофизическим и экспериментальным данным, внешнее жидкое ядро имеет однородную структуру и дефицит плотности относительно Fe около 10 %, а внутреннее твердое ядро имеет сильно неоднородную структуру с повышенной анизотропией сейсмических волн и дефицит плотности около 5 %.

Наиболее подходящими кандидатами на роль легкого элемента в жидком ядре являются **Si** и **O** – до **5-7 мас.%**. Космохимические оценки показывают, что ядро должно содержать **около 2 мас.% S**, а экспериментальные данные свидетельствуют, что структура внутреннего ядра более всего согласуется со свойствами карбидов Fe.

Наиболее аргументированной на сегодняшний день является модель ядра Земли с содержаниями (мас. %): **Si = 5-6, O = 0.5-1.0, S = 1.8-1.9, C = 2.0,**

при этом во внутреннем ядре может преобладать карбид Fe₇C₃.

Содержания других важных легких элементов (H, N, P) пока не обоснованы необходимым количеством данных.

Но даже космохимическая оценка для **H = 0.06 мас.%** свидетельствует о его количестве в ядре в 10 000 раз больше, чем в гидросфере Земли.

Средний состав Земли

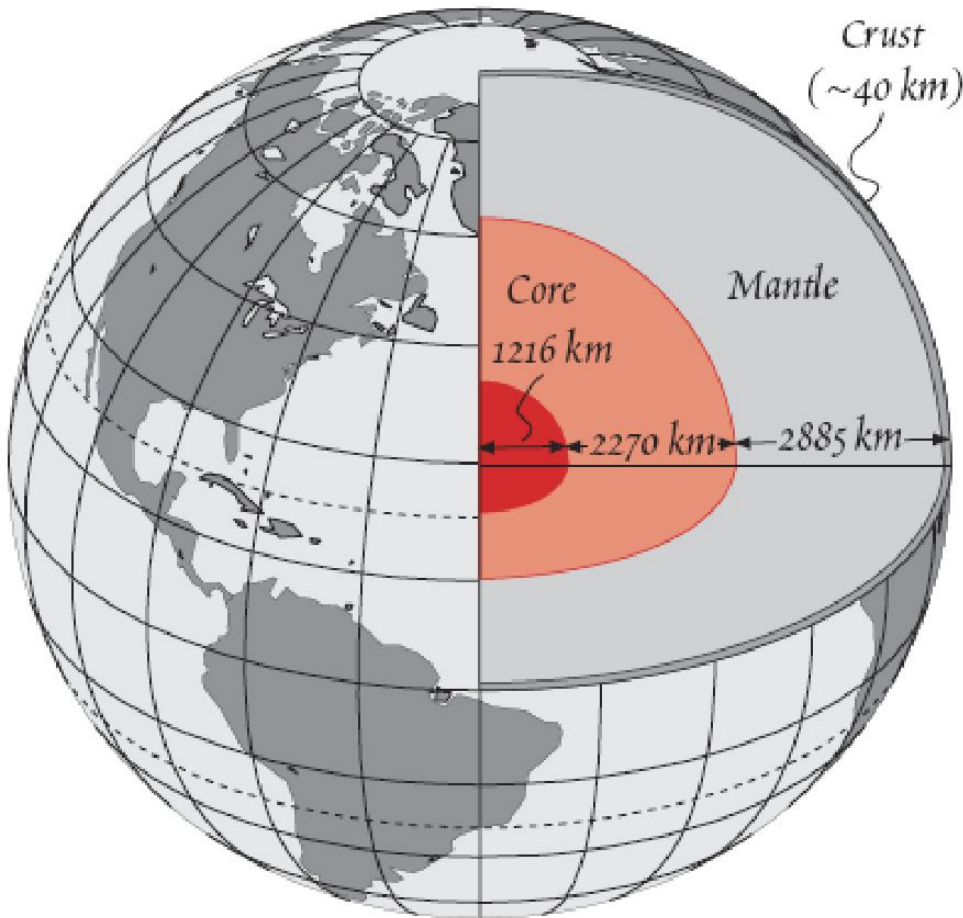


Figure 1.9. The Earth in cross-section. The outer rocky part of the planet, the mantle and crust, consists principally of silicates and is 2885 km thick. The core, divided into a liquid outer core and a solid inner core, consists of iron-nickel alloy and is 3486 km thick.

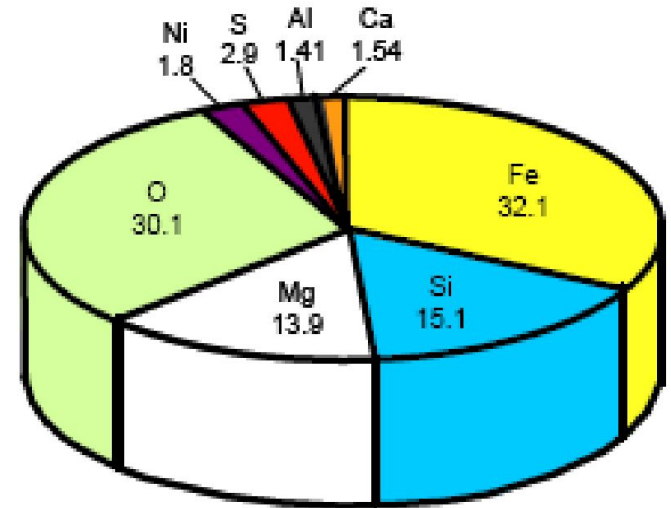
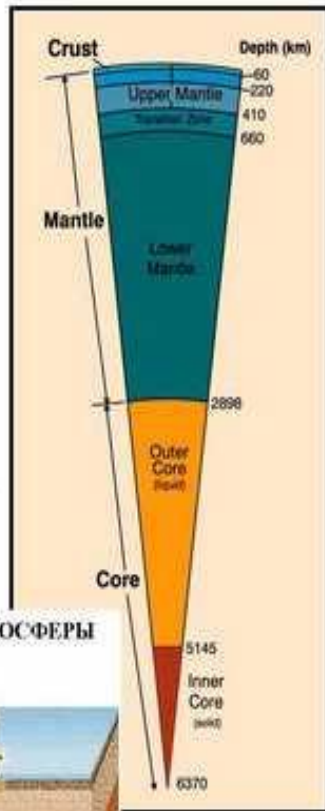
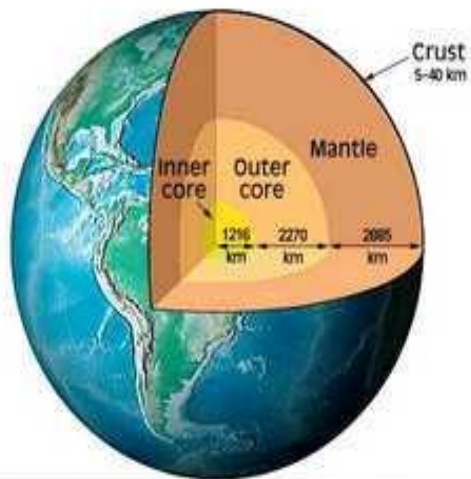


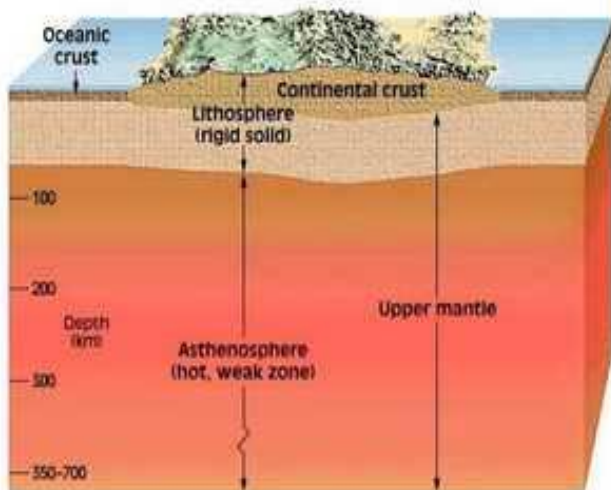
Figure 1.2. Relative atomic abundances of the eight most common elements that comprise 99% of the mass of the solid Earth.

**Fe, O, Si, Mg –
в сумме 91%:
S, Ni, Ca, Al**

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ



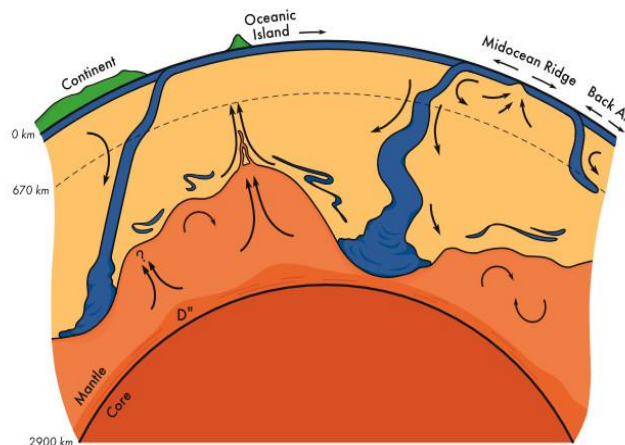
ГЛАВНЫЕ ТИПЫ КОРЫ, ПОЛОЖЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ И АСТЕНОСФЕРЫ



Кора – 30 км
– 1% от объема Земли

Мантия – 2890 км
– 84% от объема Земли

Ядро – 3470 км
– 15% от объема Земли



Оболочки:

A – кора

- Раздел Мохоровичича

B – подкоровая мантия

A+B=литосфера

C – астеносфера

B+C=верхняя мантия

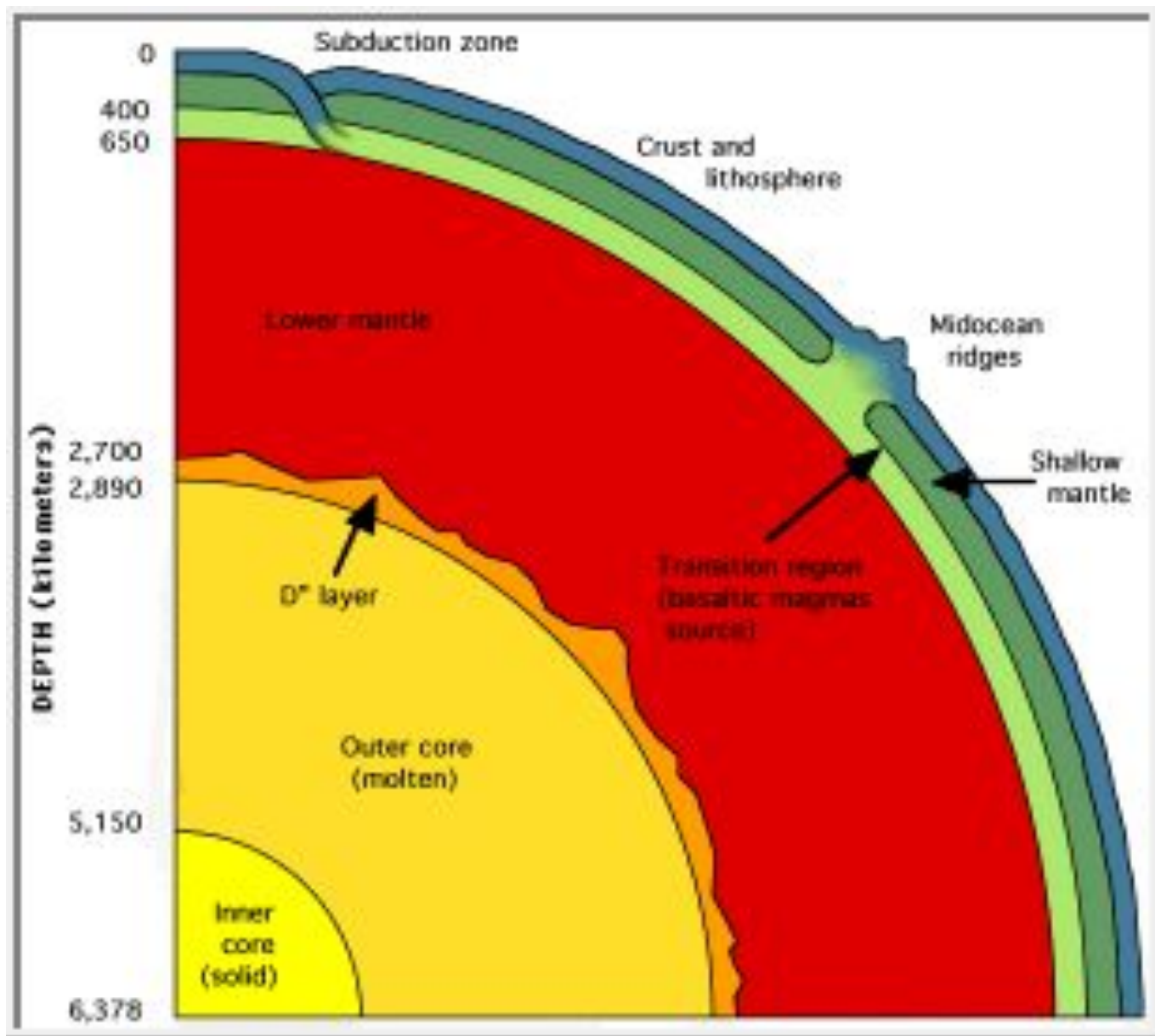
D' – нижняя мантия

D'' – переходная зона

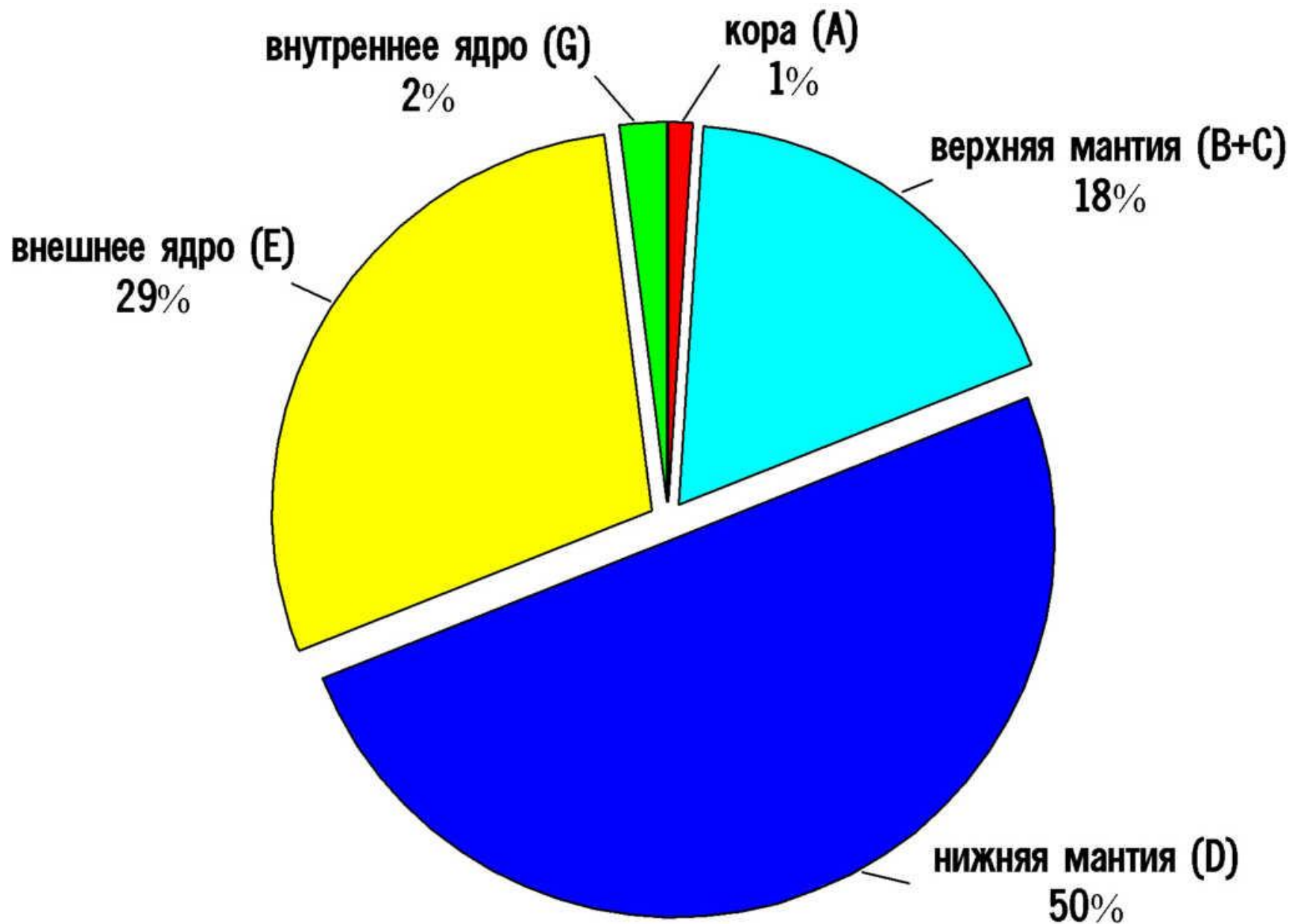
- Раздел Гутенберга

E – внешнее ядро

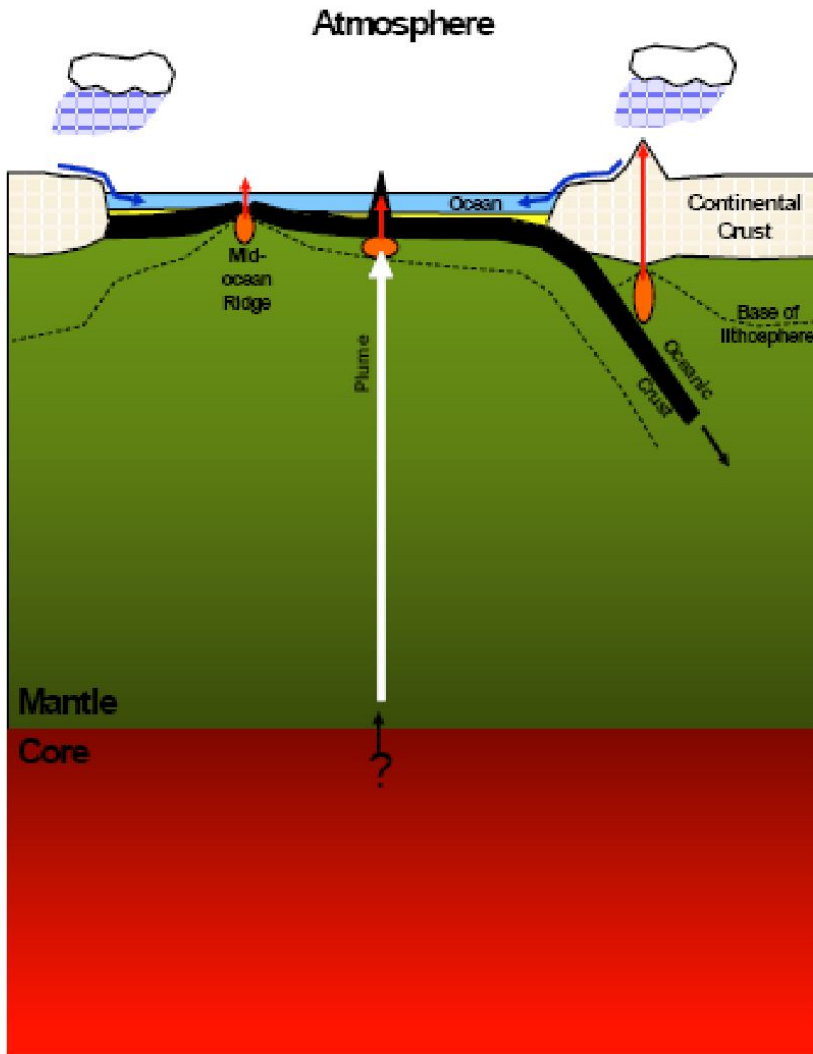
G – внутреннее ядро



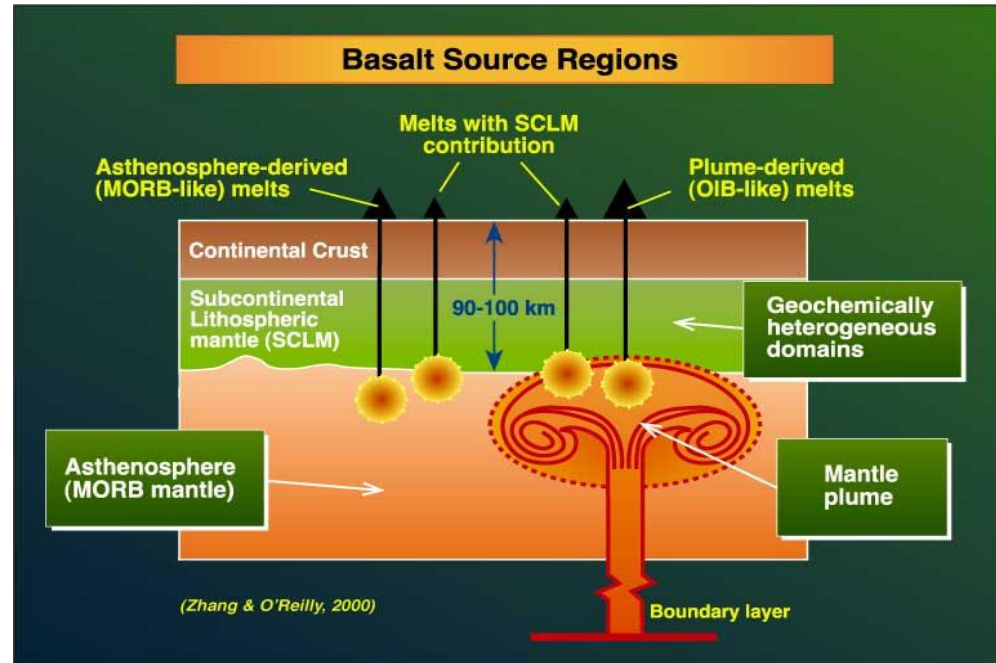
Массы основных оболочек твердой Земли



Взаимодействие оболочек Земли



Not to scale



(Zhang & O'Reilly, 2000)

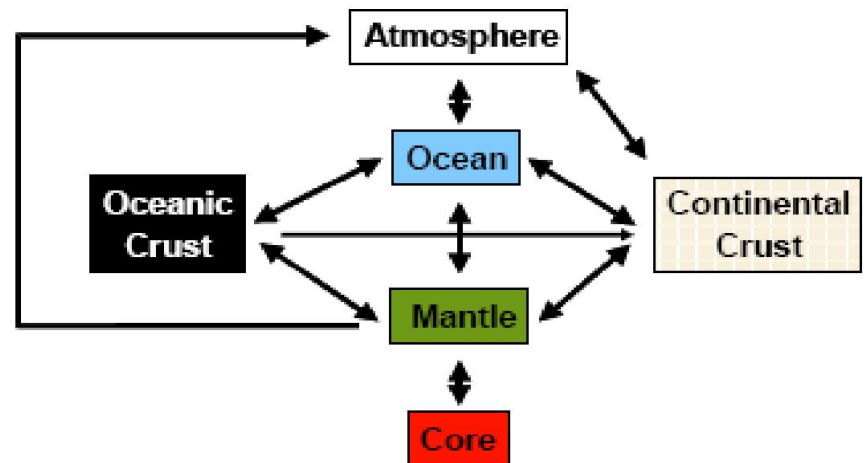
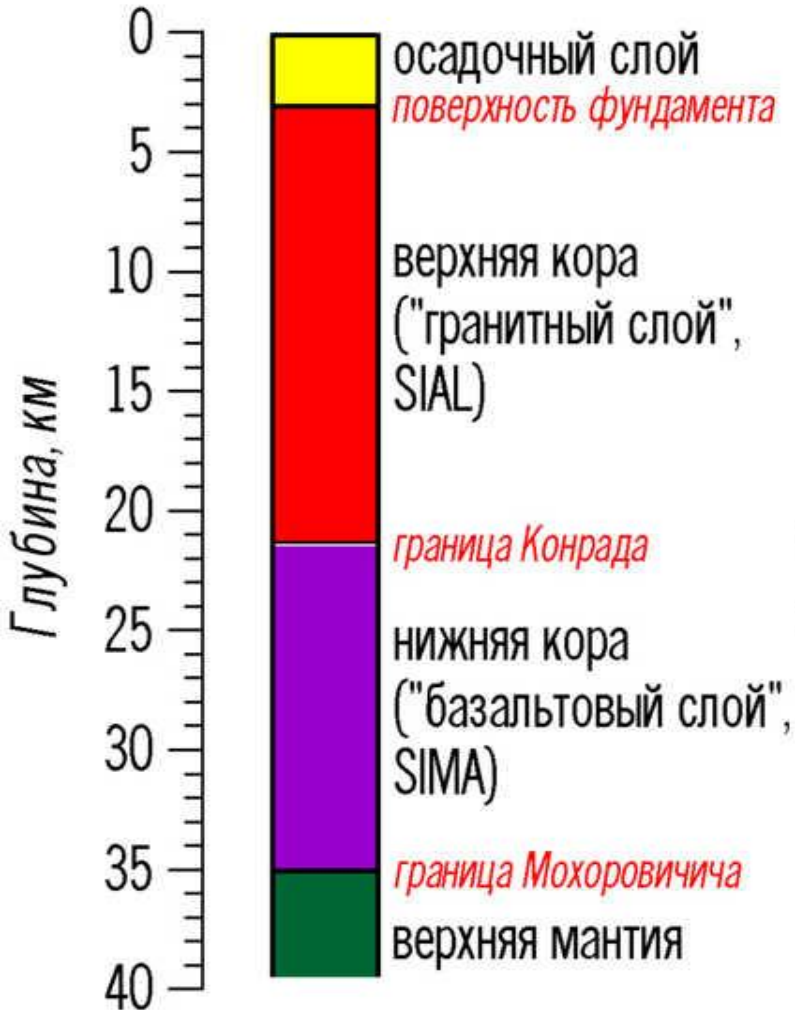


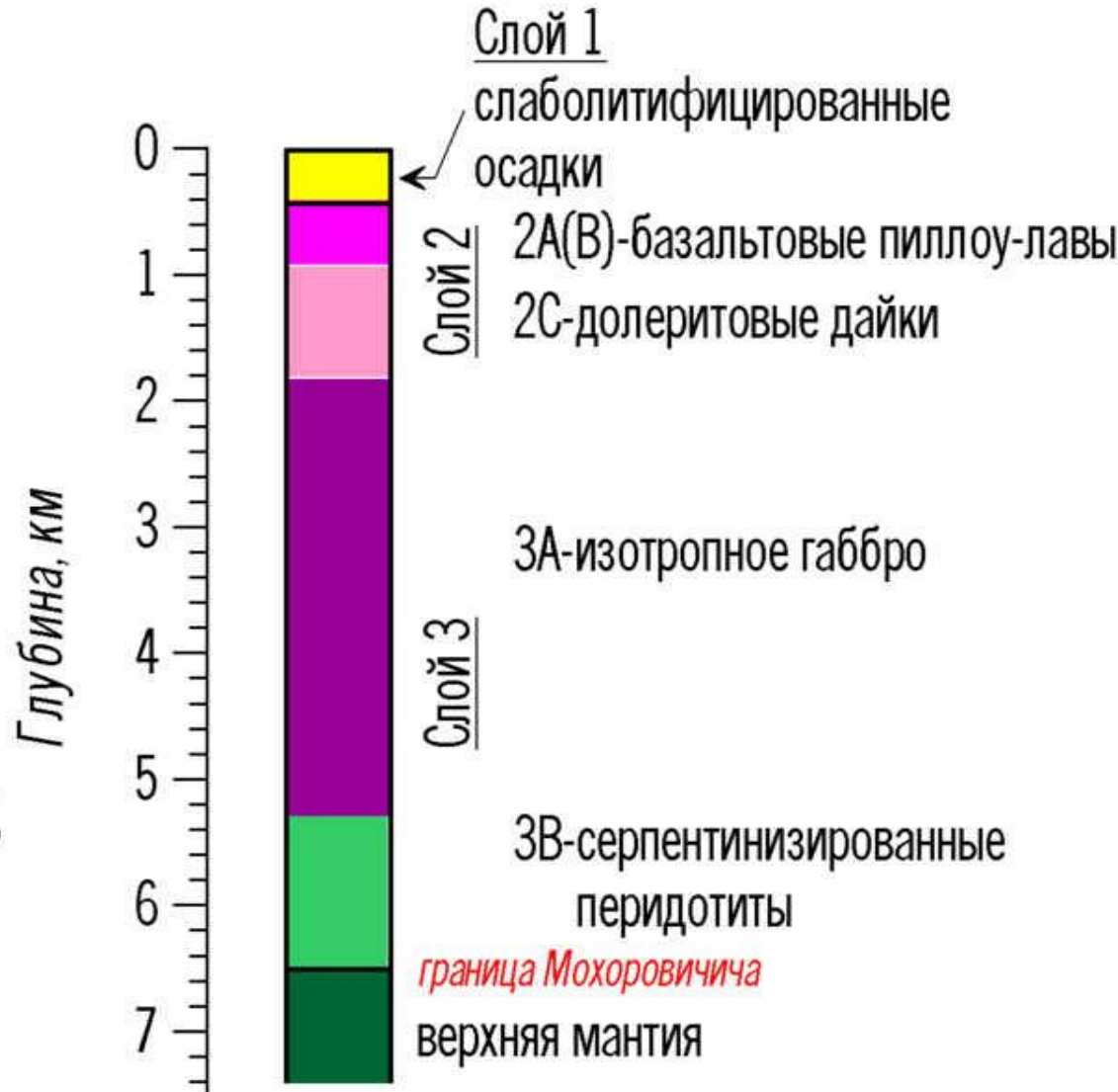
Figure 1.2. Earth systems cycles. A simplified subdivision of the Earth into its major reservoirs and how they interact with each other. Arrows reflect direction of mass transport.

Типы земной коры

Континентальная

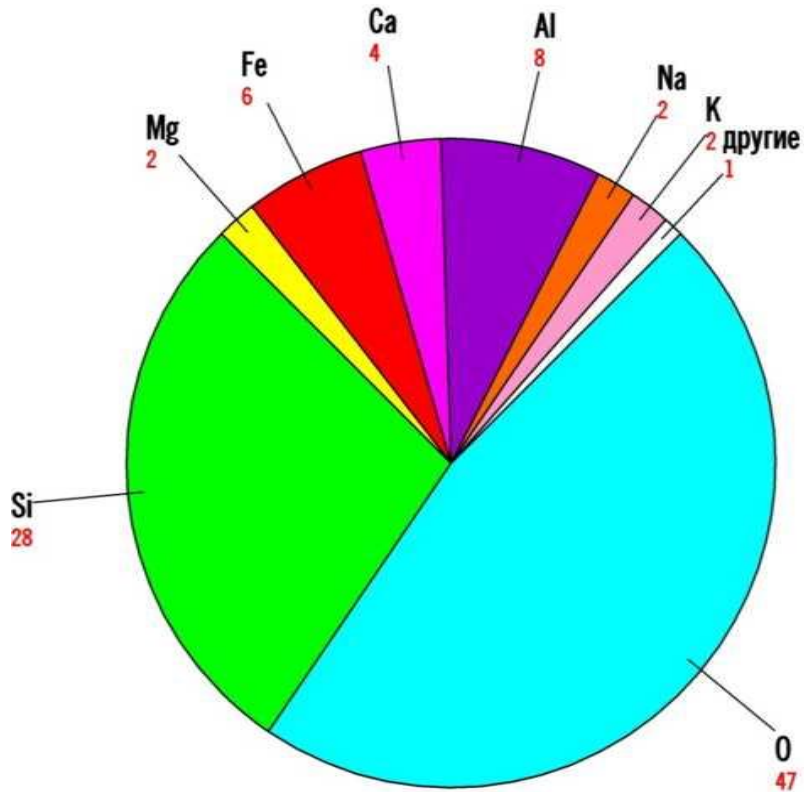


Океаническая

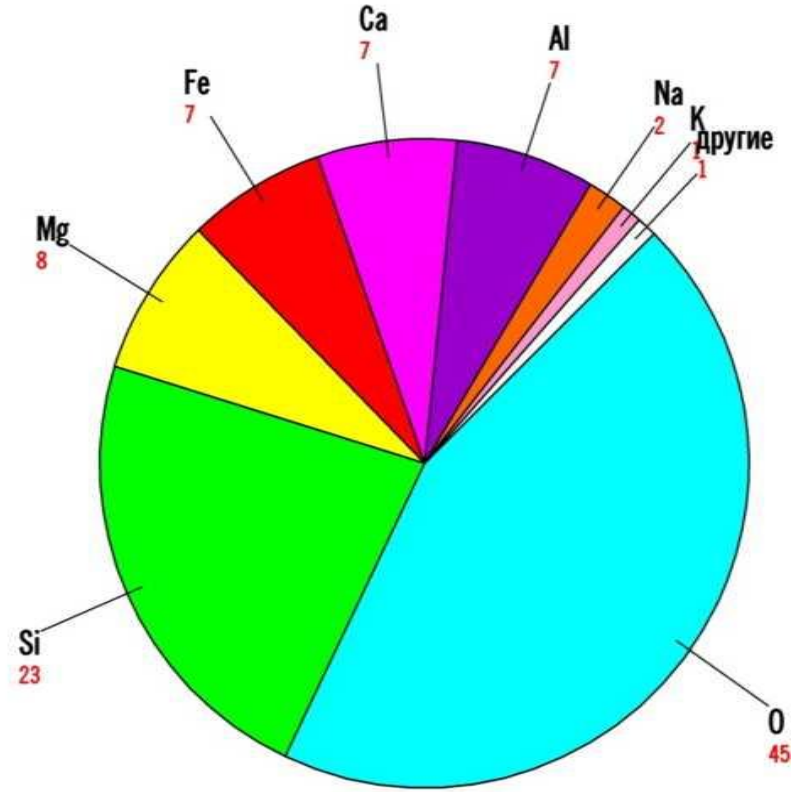


Состав земной коры

Континентальная

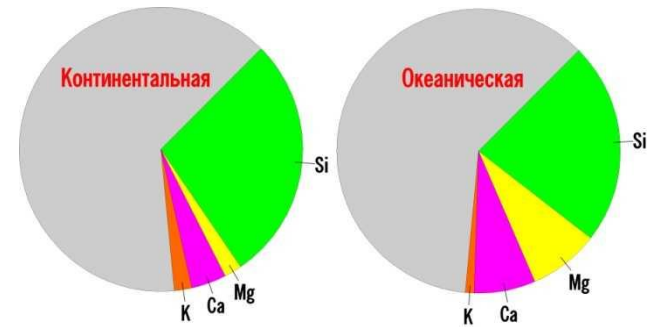


Океаническая

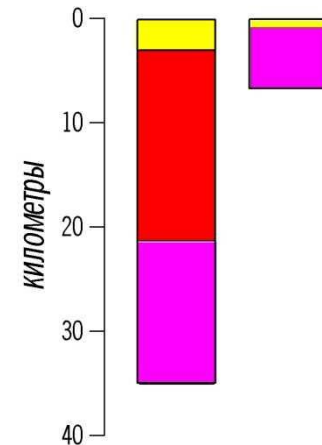


Отличия континентальной и океанической коры

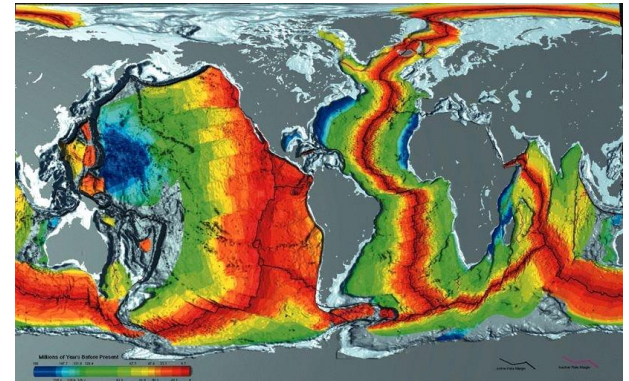
- **Химический состав**



- **Мощность**

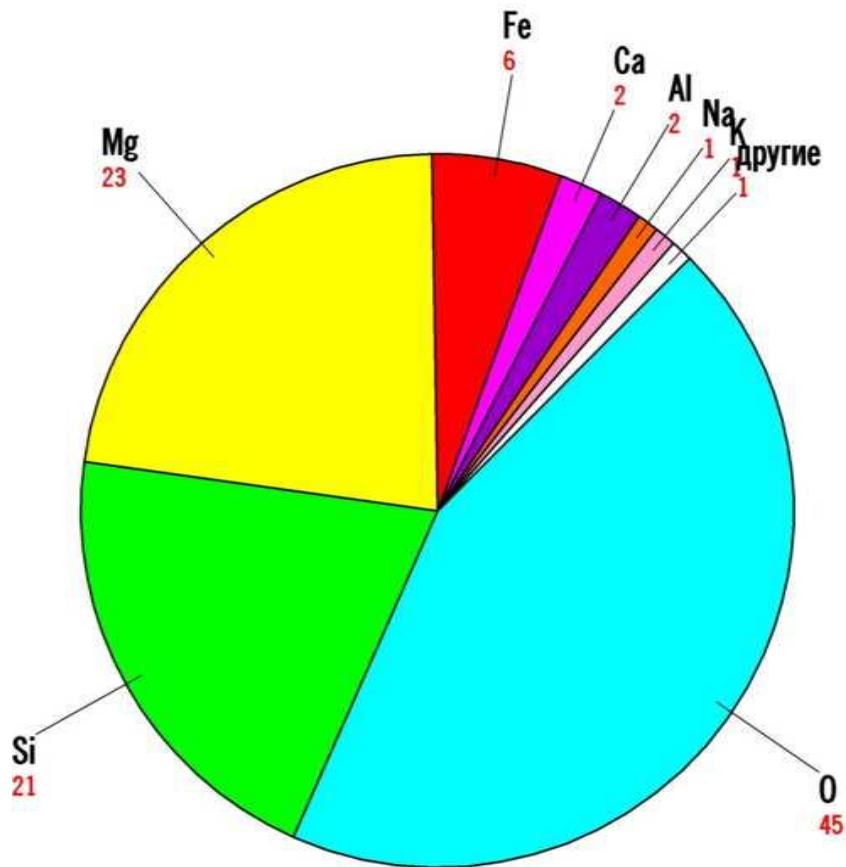


- **Возраст**

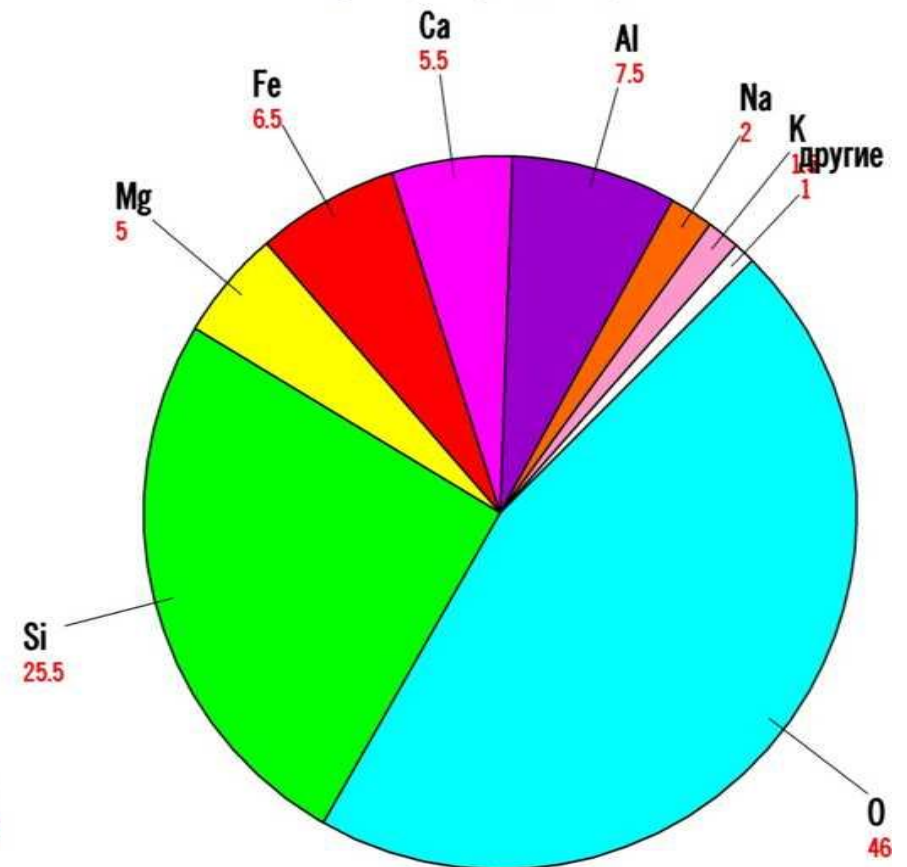


Состав мантии Земли

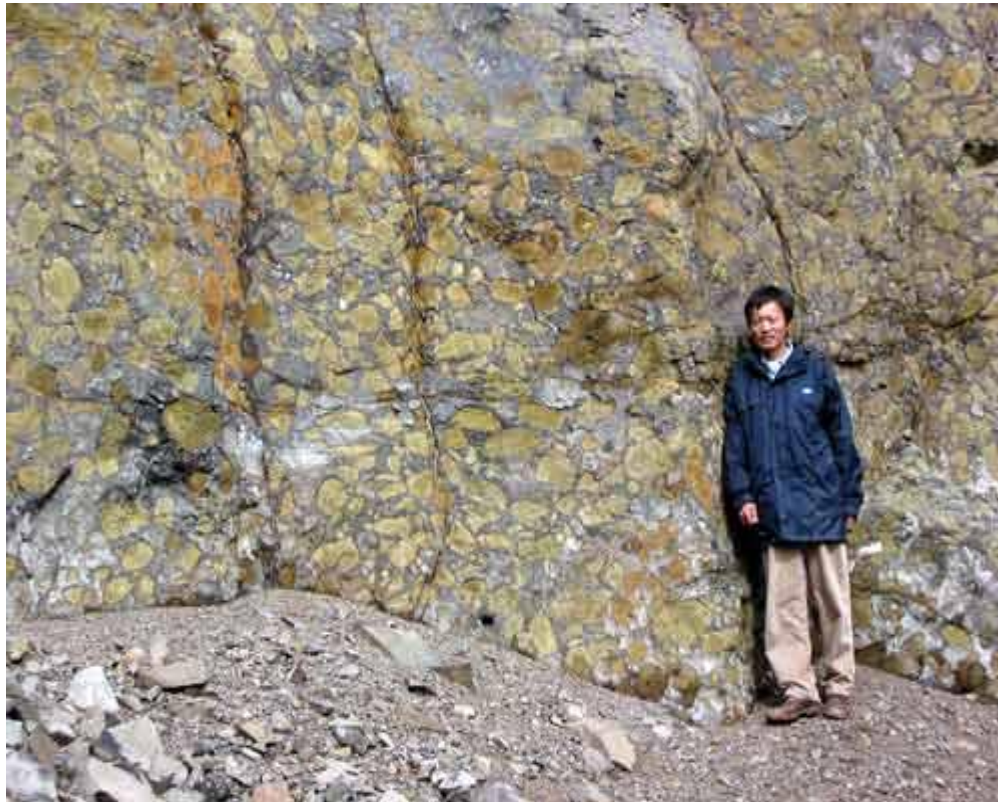
Мантия



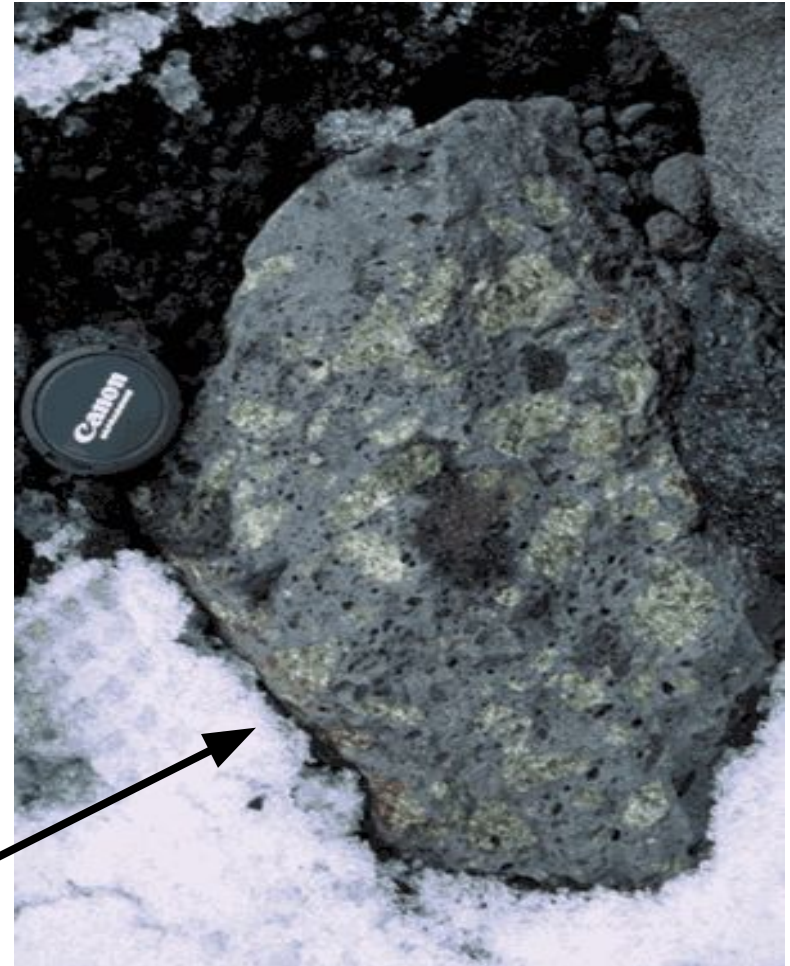
Кора (в среднем)



Получение информации о составе и структуре мантии по ксенолитам в щелочных базальтах, кимберлитах и др.



Китай



Австралия

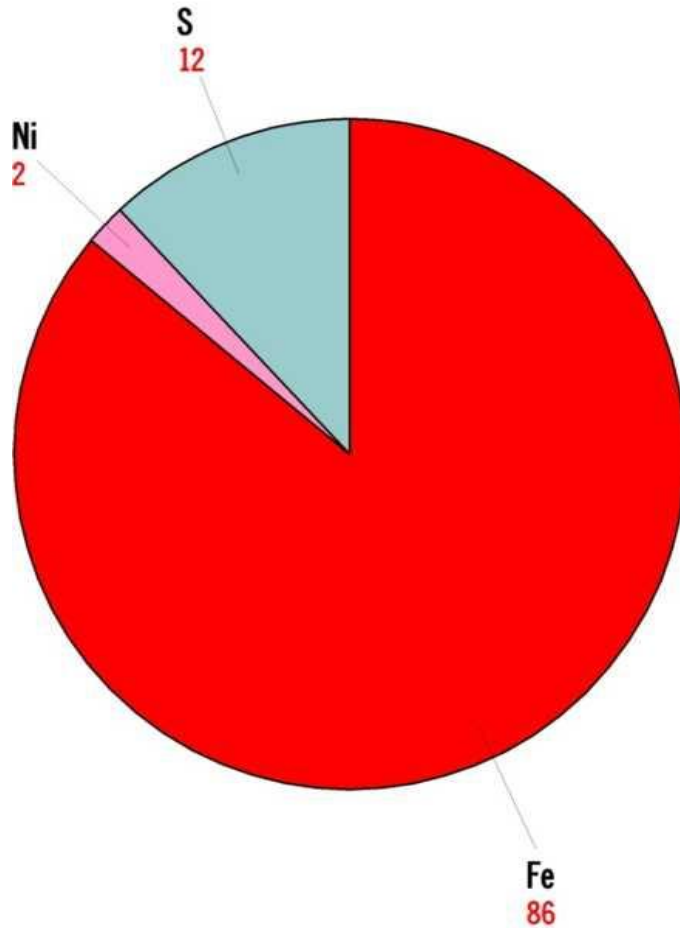
Содержание основных элементов в мантии

O, Si, Mg,
Fe, Al, Ca

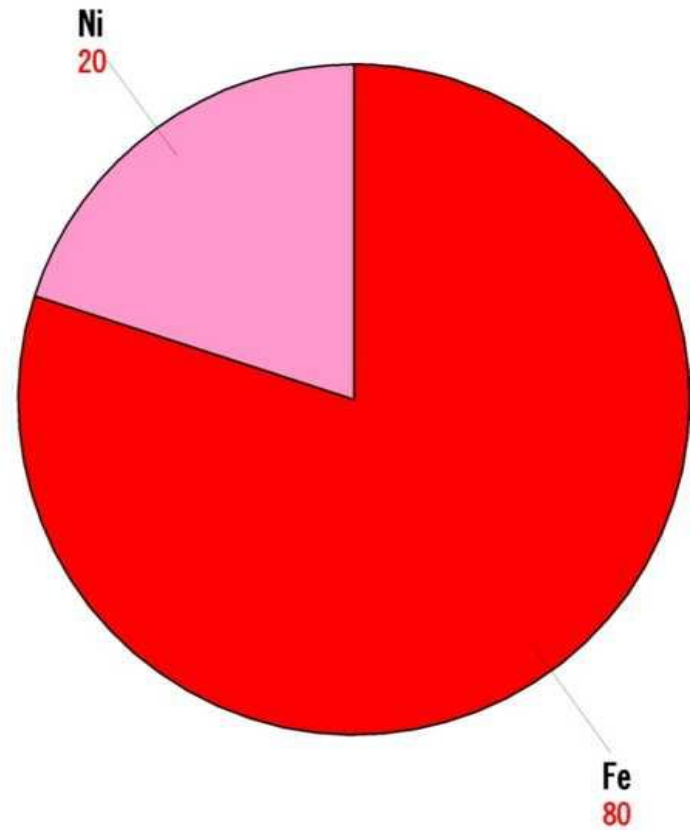
Элемент	Концентрация	Оксид	Концентрация
<u>O</u>	44.8		
<u>Si</u>	21.5	<u>SiO₂</u>	46
<u>Mg</u>	22.8	<u>MgO</u>	37.8
<u>Fe</u>	5.8	<u>FeO</u>	7.5
<u>Al</u>	2.2	<u>Al₂O₃</u>	4.2
<u>Ca</u>	2.3	<u>CaO</u>	3.2
<u>Na</u>	0.3	<u>Na₂O</u>	0.4
<u>K</u>	0.03	<u>K₂O</u>	0.04
Сумма	99.7	Сумма	99.1

Состав ядра Земли

Внешнее



Внутреннее



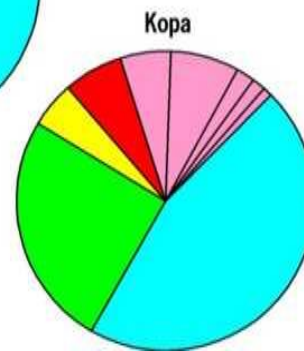
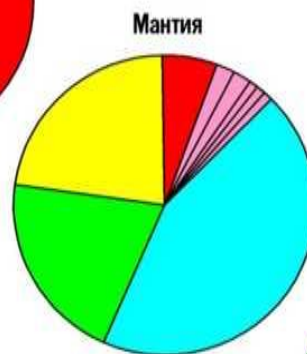
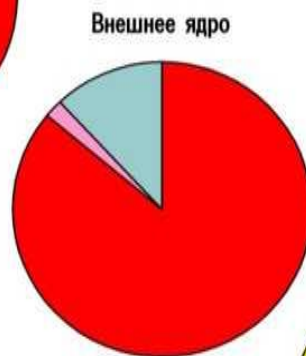
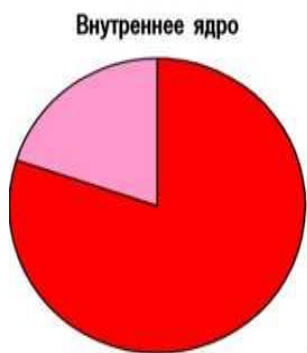
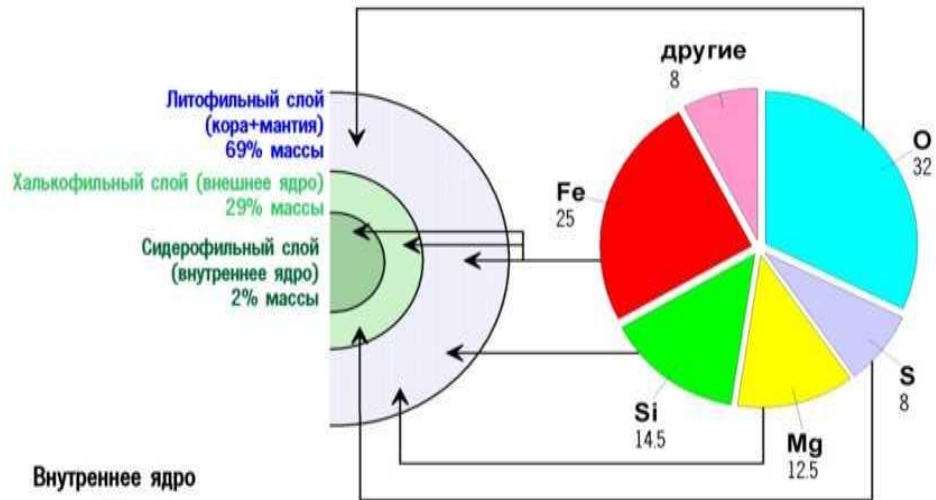
Химический состав ядра

ИСТОЧНИК	Si, wt.%	Fe, wt.%	Ni, wt.%	S, wt. %	O, wt%	Mn, ppm	Cr, ppm	Co, ppm	P, ppm
Allegre et al., 1995	7.4	79.4	4.87	2.3	4.1	5820	7790	2530	3690
Mc Donough, 2003	6.0	85.5	5.20	1.9	0	300	9000	2500	2000

Fe, Si, Ni, O, S

Достоверная информация о ядре Земли

1. Основным элементом в ядре Земли – Fe (плотность, распространенность, проводимость).
2. Во внешнем ядре Земли необходимо допустить интенсивную конвекцию (вариации магнитного поля Земли).
3. Внутреннее ядро – сплав Fe и Ni, внешнее – смесь Fe и S (плотность, температура плавления при высоких давлениях).



Кларковое число (или кларки элементов, ещё чаще говорят просто **кларк элемента**) — числа, выражающие среднее содержание химических элементов в земной коре, гидросфере, Земле в целом, космических телах и др. геохимических или космохимических системах.

Термин предложил А.Е. Ферсман в 1923г.

Кларки элементов для земной коры

Элемент	Кларк, масс. %
O	49,5
Si	25,8
Al	7,57
Fe	4,7
Ca	3,38
Na	2,63
K	2,41
Mg	1,95
H	0,88

Таблица 1.5

Кларки главных типов изверженных горных пород (% мас.)

Элементы	Ультра-базиты	Базиты	Андезиты, диориты	Грано-диориты	Граниты	Сиениты	Степень дифференциации K_{max}/K_{min}
H	—	0,12	0,11	$9 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	—	2
Li	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	49
Be	$2 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	18
B	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$	4
C	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	—	$3 \cdot 10^{-2}$	—	3
N	$7 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	4
O	43,1	44,0	46,5	48,0	48,7	—	—
F	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	0,12	12
Na	0,32	1,86	2,78	2,82	2,61	4,04	13
Mg	21,8	4,55	2,15	0,99	0,22	0,58	99
Al	1,71	8,22	8,95	8,33	7,27	8,8	5
Si	20,0	23,25	27,1	31,1	34,23	29,1	1,7
P	$2,8 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,135	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	5
S	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	1,7
Cl	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	6
K	$2,2 \cdot 10^{-2}$	0,80	1,71	2,52	3,97	4,8	218
Ca	2,28	7,30	4,76	2,49	0,71	1,8	7
Sc	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	10
Ti	0,16	1,07	0,61	0,46	0,16	0,35	7
V	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	8
Cr	0,20	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	1000
Mn	0,13	0,17	0,12	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	4
Fe	9,35	8,56	5,36	3,07	1,56	3,67	6
Co	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	150
Ni	0,2	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	500
Cu	$1 \cdot 10^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	18
Zn	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	3
Ga	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$	60
Ge	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	4
As	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	11
Se	$5 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	2
Br	$9 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	5
Rb	$7 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	257
Sr	$7 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	66
Y	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	25
Zr	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	12
Nb	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	3
Mo	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	5
Pd	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-7}$	—	—
Ag	$6 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-6}$	3
Cd	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	4
In	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	—	2
Sn	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	—	8
Sb	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	11
Te	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	—	1
I	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	1,5
Cs	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	50

Элементы	Ультра-базиты	Базиты	Андезиты, диориты	Грано-диориты	Граниты	Сиениты	Степень дифференциации K_{max}/K_{min}
Ba	$8 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	0,16	2000
La	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	13
Ce	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	211
Pr	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	7
Nd	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	9
Sm	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	13
Eu	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	8
Gd	$9,3 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	11
Tb	$2 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	8
Dy	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	25
Ho	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	12
Er	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	13
Tm	$6 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	7
Yb	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	9
Lu	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	17
Hf	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	24
Ta	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	9
W	$3 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	52
Re	—	$6 \cdot 10^{-8}$	—	$n \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	2
Os	—	$5 \cdot 10^{-8}$	—	$n \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$n \cdot 10^{-9}$	1
Ir	—	$2,6 \cdot 10^{-8}$	—	$n \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-9}$	$n \cdot 10^{-9}$	3
Pt	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$	—	—	$8 \cdot 10^{-7}$	—	18
Au	$6 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	3
Hg	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-6}$	333
Tl	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	187
Pb	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	48
Bi	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	—	2
Th	$4 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	4450
U	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	2771