

# ПЕТРОЛОГИЯ, часть 2. Магматизм

## Лекция 14. Метеориты

Пояс астероидов как источник метеоритов. Метеориты. История изучения. Классификация метеоритов. Состав, строение и петрографические особенности основных типов метеоритов.

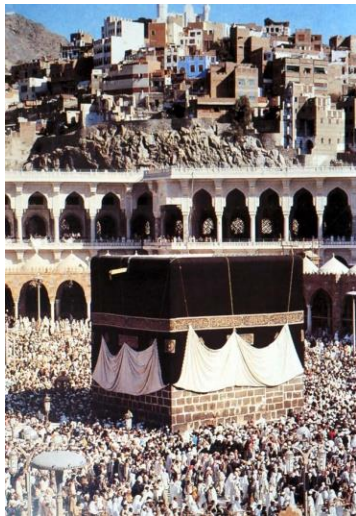
(на основе текста и рисунков С.Демидовой)

каф.петрологии

Геологический факультет МГУ

2013

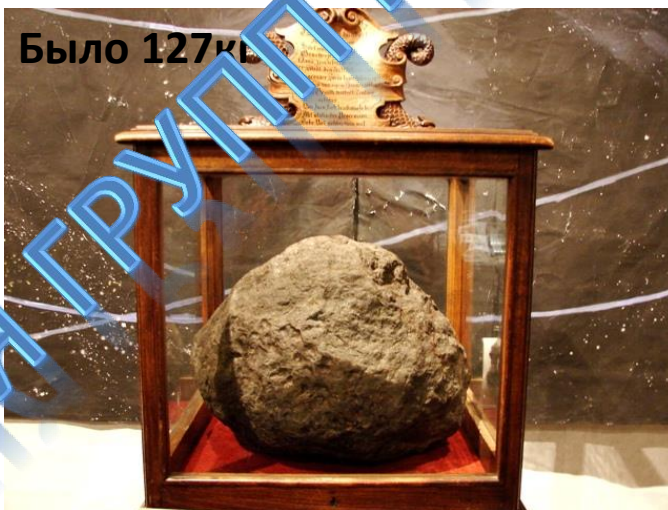
# История изучения метеоритов



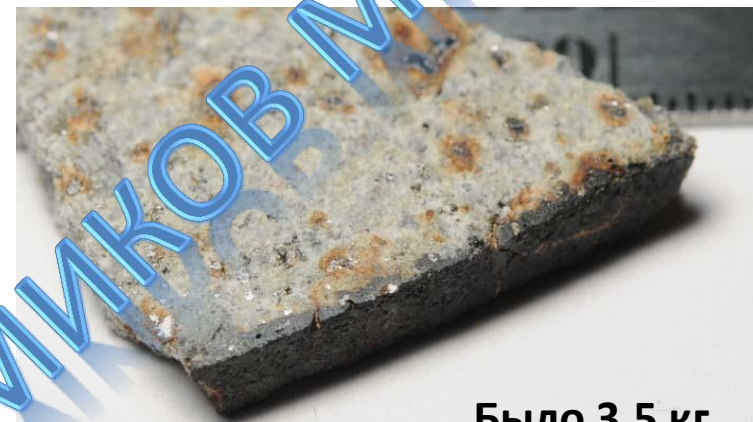
الحجر الأسود  
хаджар аль-асвад



Падение метеорит  
Энзихейм в 1492



Было 127 кг



Было 3.5 кг

Метеорит Луце упал с неба в грозу  
13 сентября 1768 г. в 16 ч. 30 м.

Попал в Парижскую академию наук  
Проанализирован Лавуазье в 1789 г.

**Вывод:**

**«Камни не падают с неба!»  
это песчаник с пиритом**

Вмонтирован в стену  
Каабы, Мекка

# Классификация метеоритов

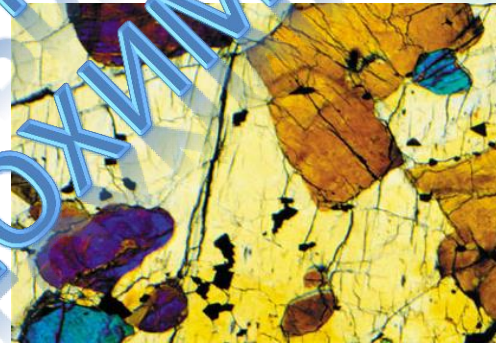
## Классы метеоритов

**Хондриты:** формируются как агрегаты примитивного вещества Солнечной системы, 86 % находок.

**Ахондриты:** магматические или метаморфические породы, отражающие кору или мантию небесных тел, 8% находок.

**Железные метеориты:** представляют собой фрагменты железо-никелевых ядер небесных тел, 7% находок.

**Железо-каменные метеориты:** промежуточная зона между мантией и ядром, 1% находок.



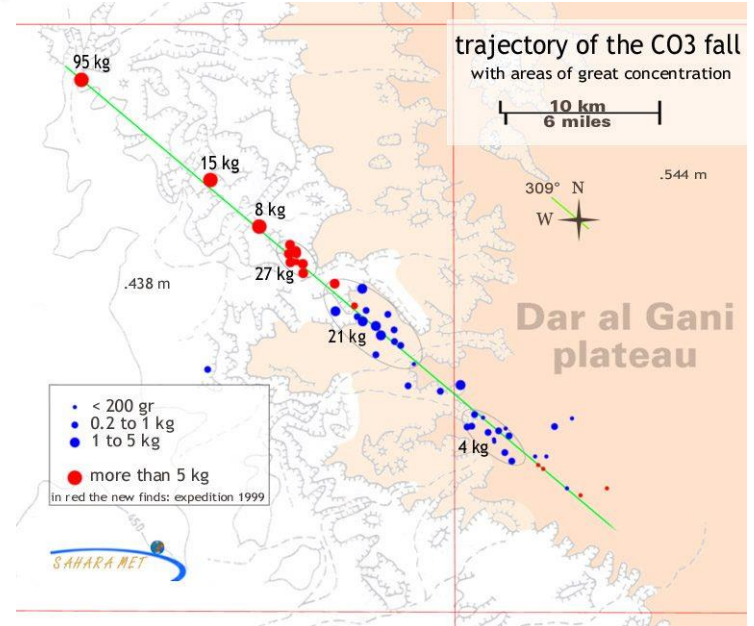
# Классификация метеоритов



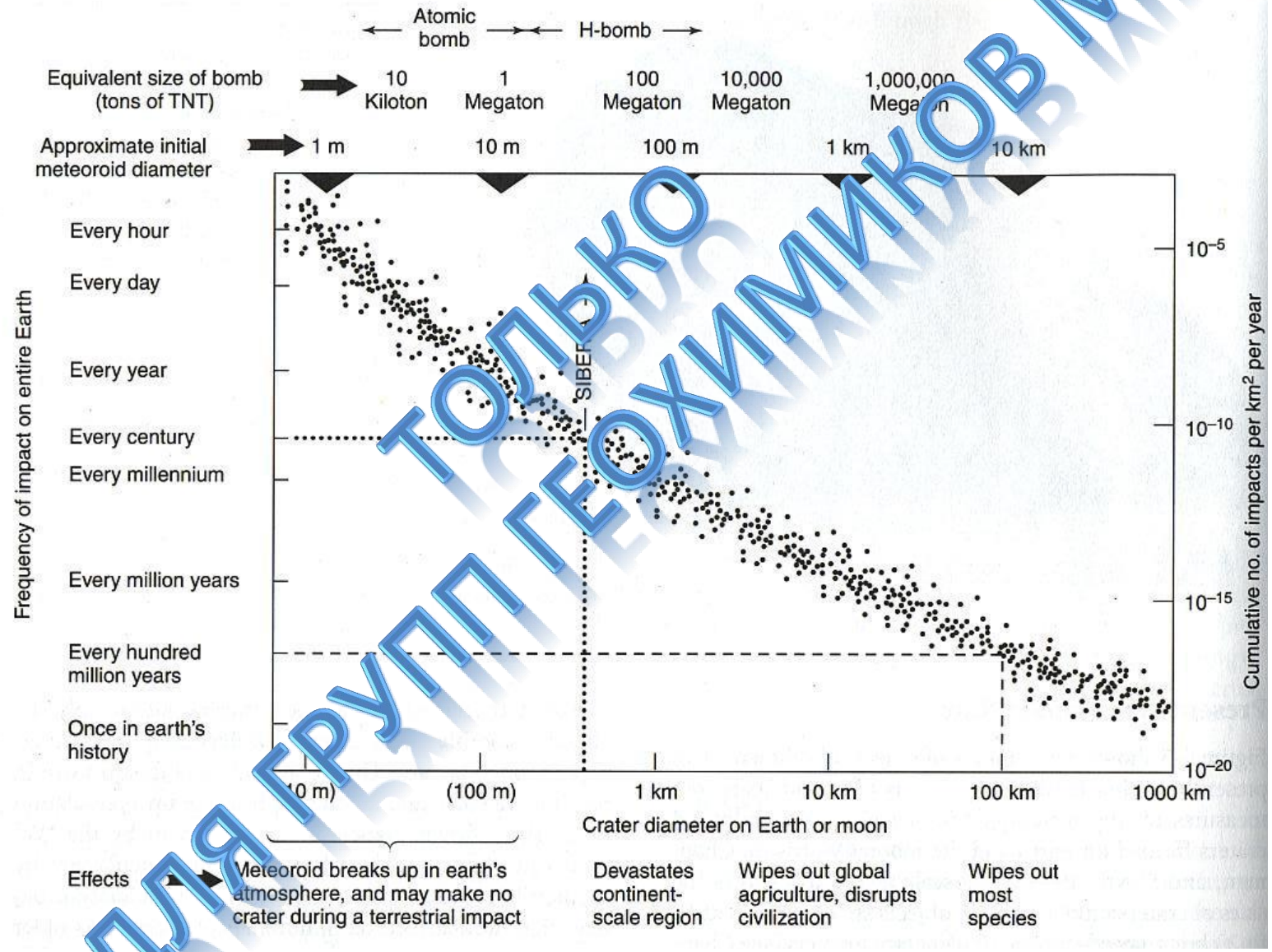
Антарктида: находка метеорита «Принцесса Елизавета», 18 кг



Ливия: Находка метеорита Дар аль Гани, 95 кг



# Зависимость частоты падения от размера



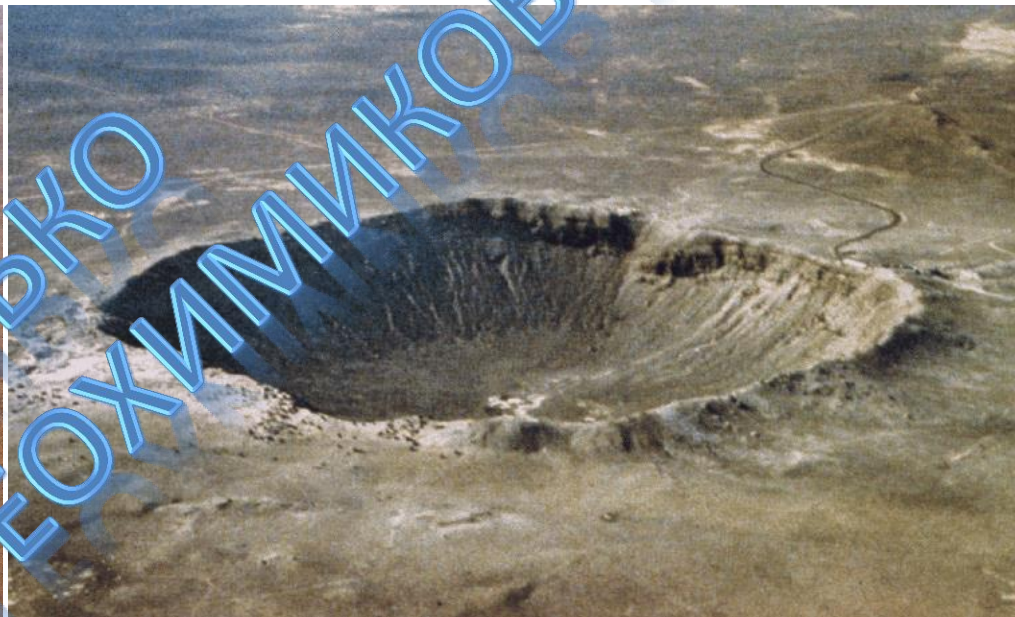
# Метеоритные кратеры и импактиты

Кратер Wolfe Creek, Австралия



0.875 километра  
300,000 лет назад

Аризонский кратер



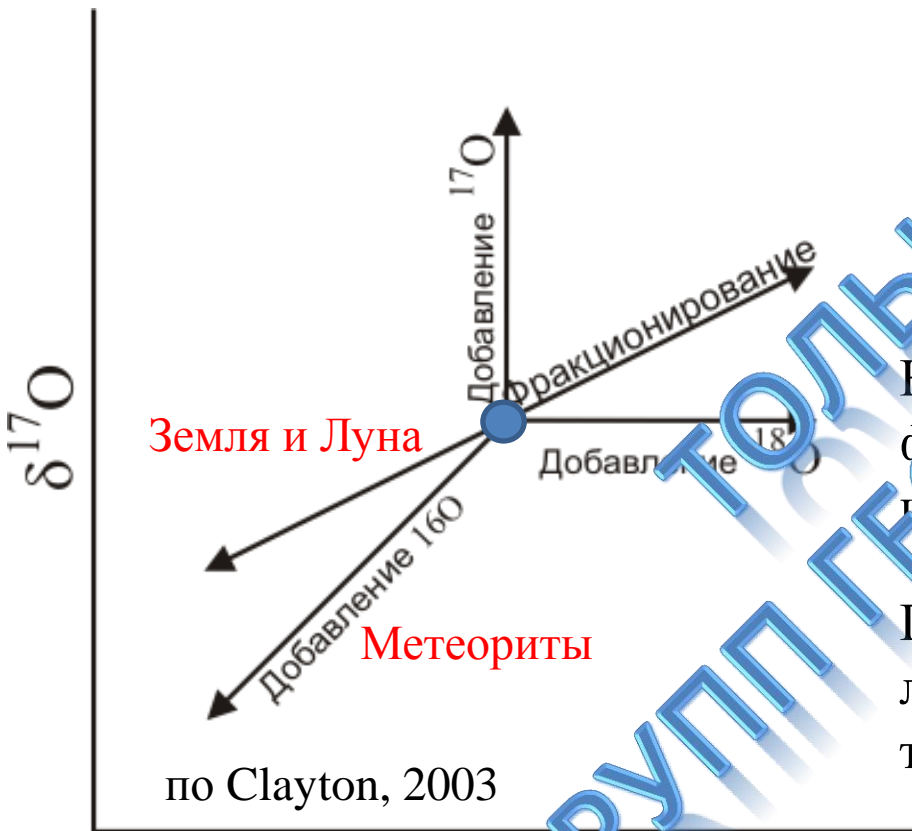
1.186 километра  
49,000 лет назад

На кафедре петрологии читается спецкурс, посвященный импактитам и метеоритам (Л.И.Глазовская, Н.Г.Зиновьева, Д.Д.Бадюков)

# Классификация небесных тел

Нуклеосинтез: три главных изотопа кислорода

$^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$



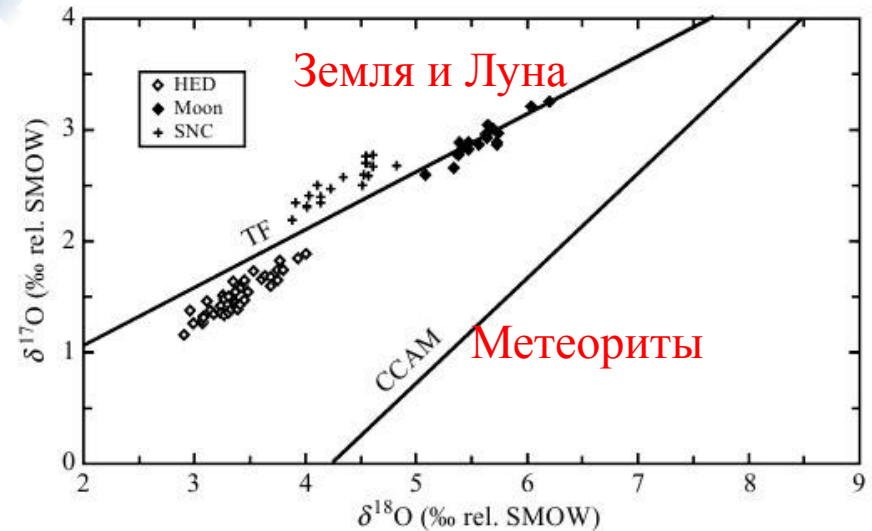
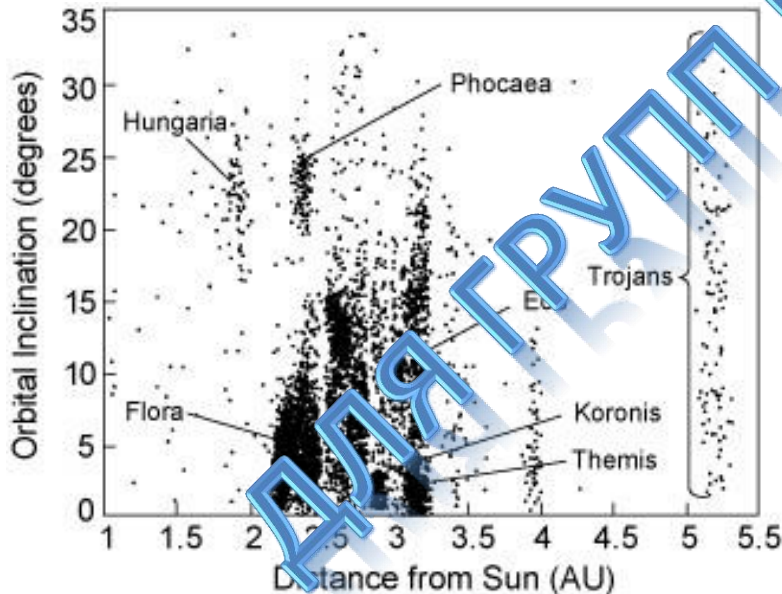
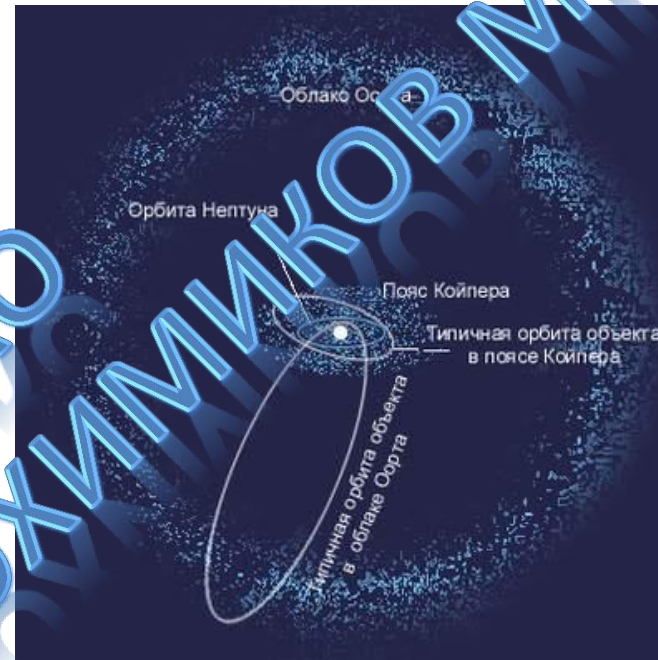
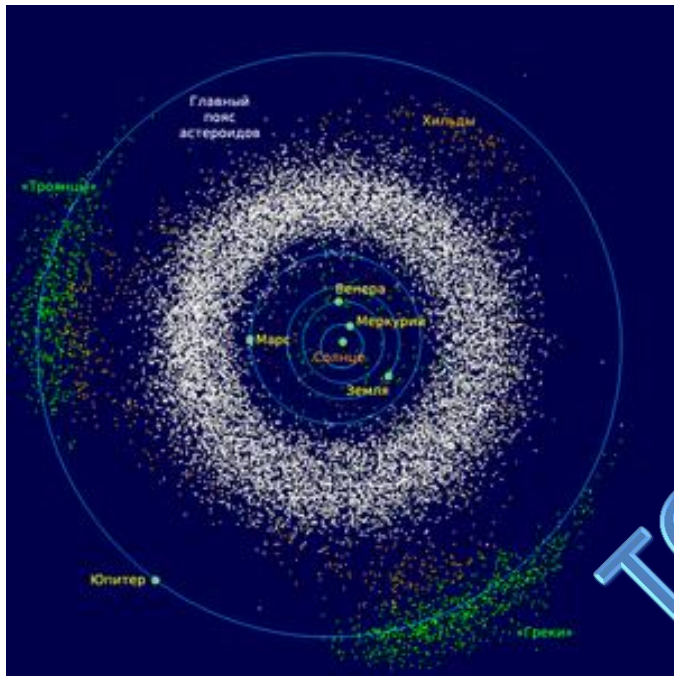
$$\delta^{17}\text{O} = \left( \frac{\left( \frac{^{17}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{sample}}}{\left( \frac{^{17}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) * 1000 \text{ ‰}$$

На Земле и Луне процессы фракционирования смещают отношения изотопов вдоль линии с наклоном 0.5

Почти все изотопные составы метеоритов ложатся вдоль линии с наклоном 1, что требует добавки  $^{16}\text{O}$  (взрывы сверхновых)

ТОЛЬКО ДЛЯ ГРУПП ГЕОХИМИКОВ ВМГУ

# Метеоритный пояс в Солнечной системе

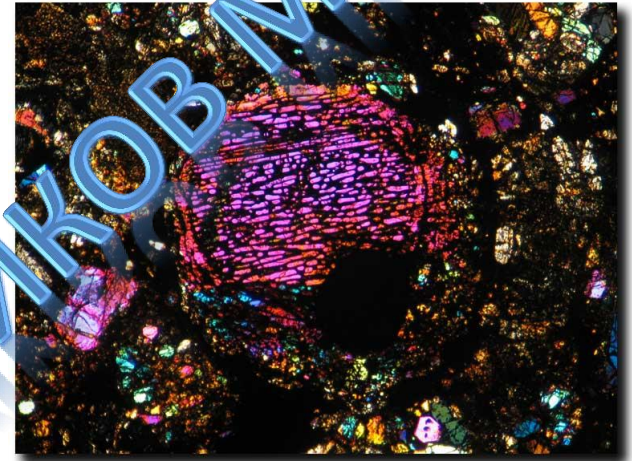
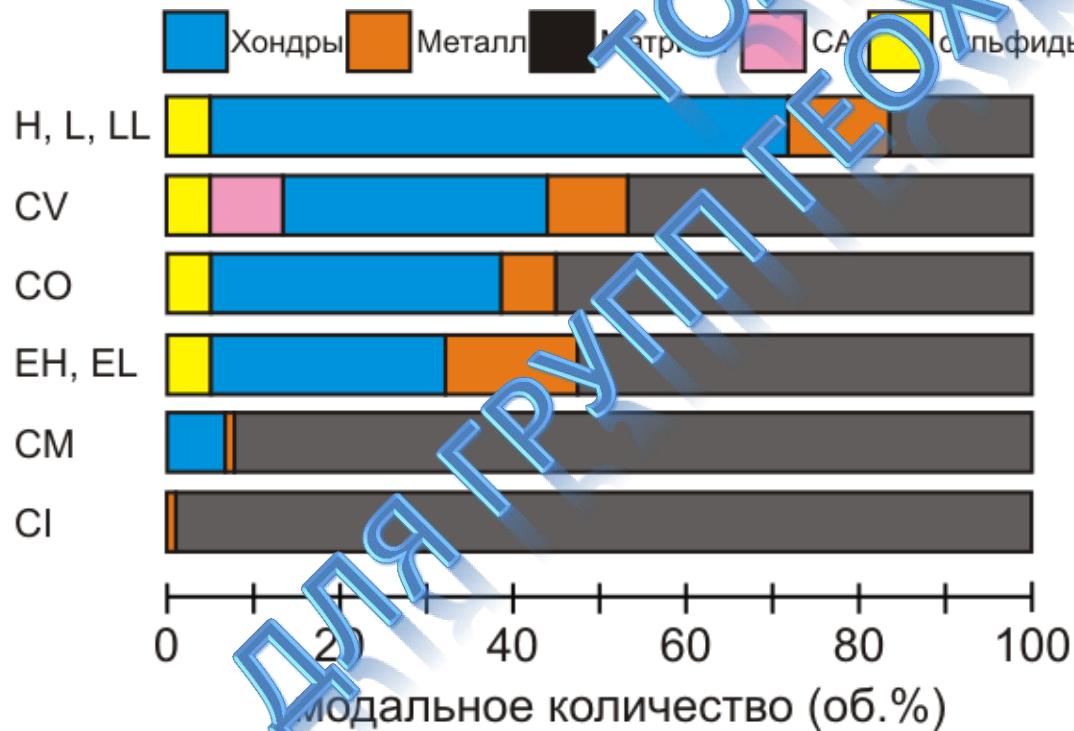




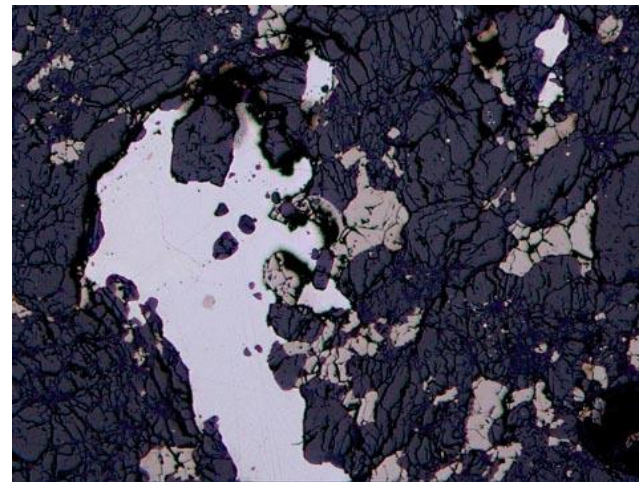
# Хондриты

## Составляющие хондритов:

- 1) Хондры
- 2) Fe-Ni металл
- 3) Тугоплавкие включения (CAIs) и аморфные оливиновые агрегаты (AOAs) > 4507 млн. лет
- 4) матрица



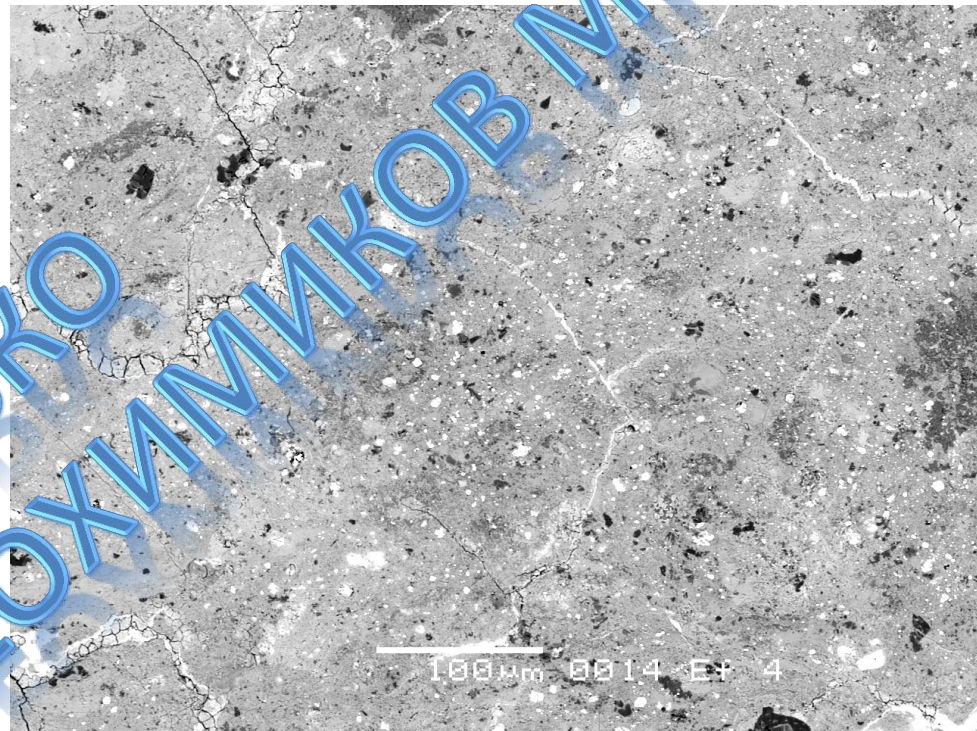
Колосниковая хондра  
(LL3 хондрит NWA 4560)



металл (белый) и сульфиды  
(светло-серый) (LL5 хондрит  
Челябинск)

# Хондриты

Матрица хондритов обогащена летучими и представляет собой неравновесную смесь водных и безводных силикатов, оксидов, Fe-Ni металла, сульфидов и органического вещества.



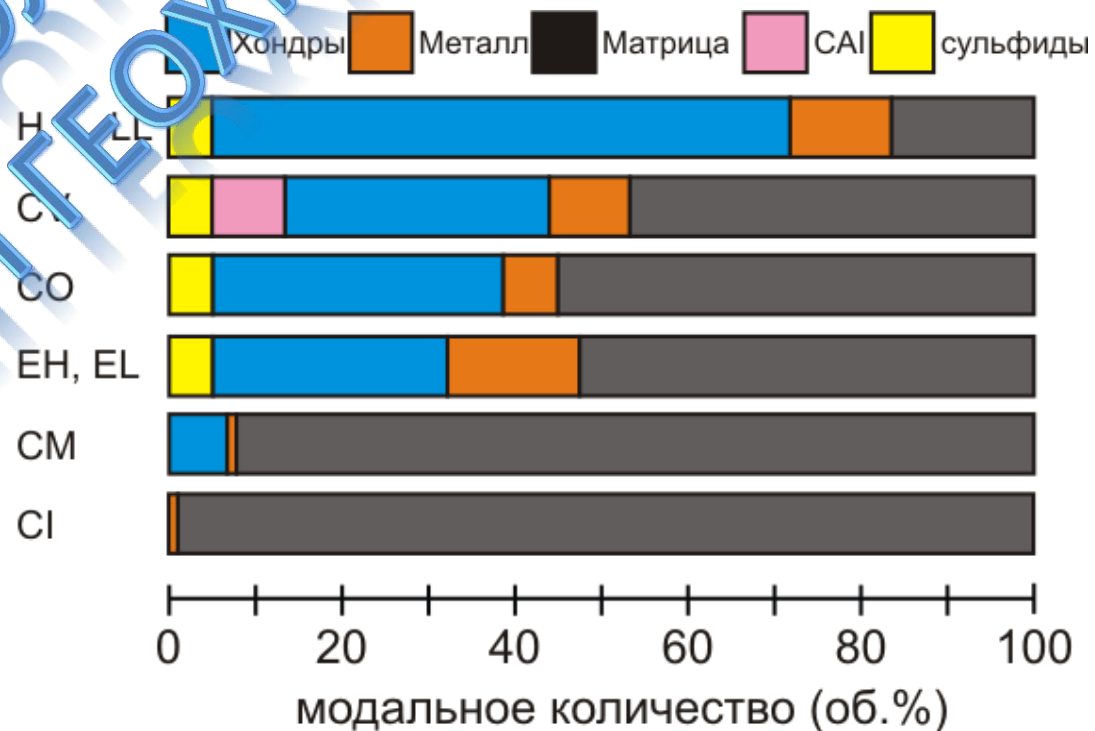
Большинство хондритов испытали термальное воздействие на родительских телах, а именно: водное изменение, термальный и ударный метаморфизм, тем не менее они не испытали магматической дифференциации. Таким образом, хондриты несут в себе информацию о процессах эволюции вещества солнечного протопланетного облака.

# Основные типы хондритов

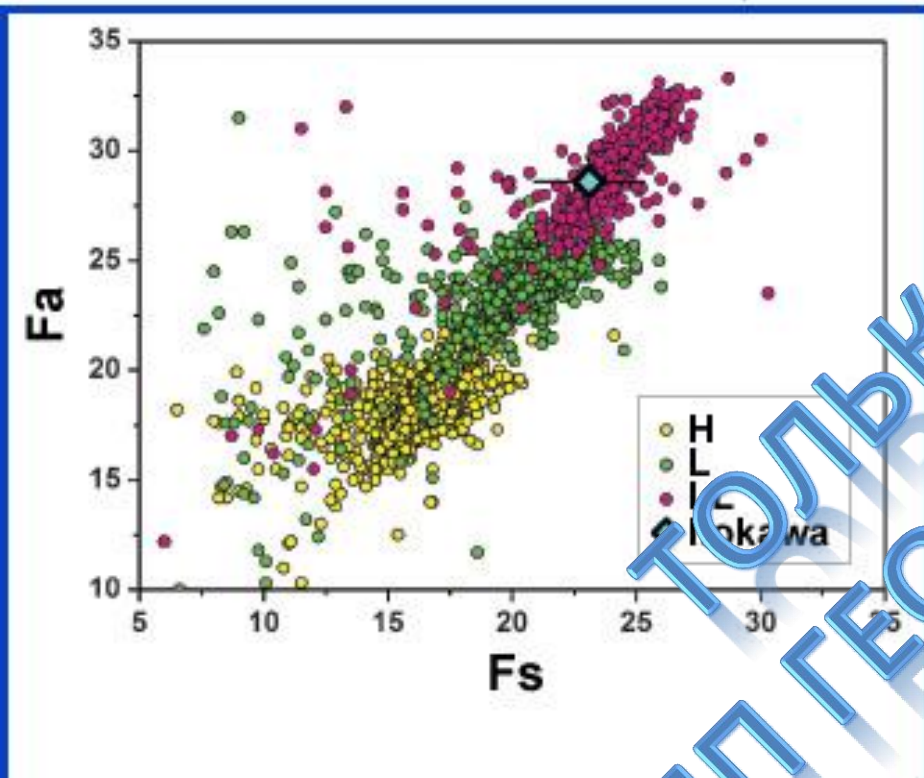
**Углистые хондриты (C)**, отличаются преобладанием матрицы над хондрами, а также повышенным содержанием летучих элементов, в т. ч. углерода.

В **обыкновенных хондритах (O)** преобладают хондры. Эта, наиболее распространённая группа хондритов, по содержанию общего количества железа и железистости силикатов разделяется на 3 подгруппы (H, L и LL).

**Энстатитовые хондриты (E)**, отличающиеся резким преобладанием энстатита в минеральном составе, по содержанию железа разделяют на 2 подгруппы (EH и EL).



# Группы обыкновенных хондритов



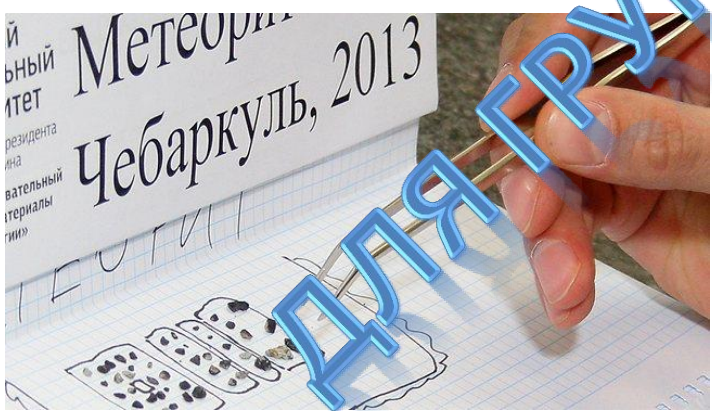
(From Nakamura et al., 2011, Science, v. 333(6046), p. 1)

По содержанию металлической фазы

H-Хондриты - 22-25%

L-Хондриты - 5-15%

LL-Хондриты - около 2%



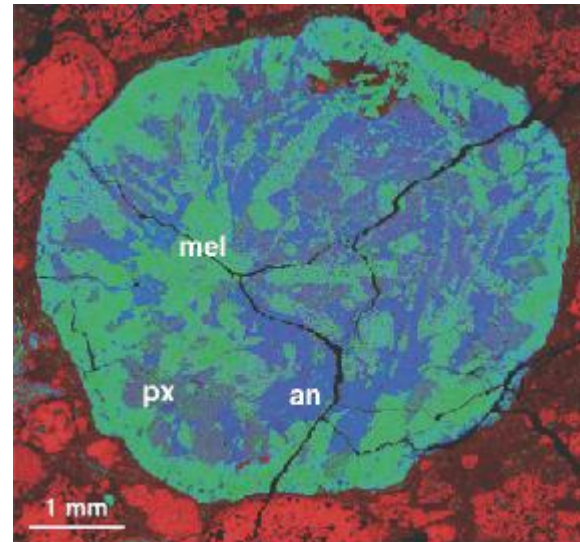
Челябинский метеорит 2013 г. относится к LL-хондритам

# Ca-Al включения (CAI)

Древнейший компонент – CAIs – сформировался в солнечной небуле по меньшей мере 4567 млн. лет назад и несет информацию о ранних высокотемпературных процессах, происходивших в самых внутренних участках протопланетного облака, где твердое вещество испарялось, перемешивалось и затем снова конденсировалось. Эти компоненты обеднены летучими и состоят из таких минералов как шпинель, мелилит, габролит, Al-Ti пироксен, плагиоклаз, которые отсутствуют в других компонентах хондритов.



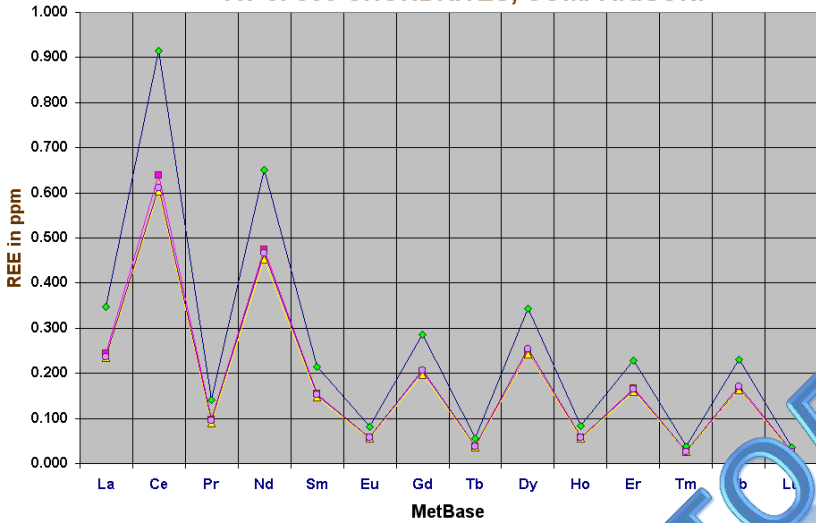
CAI (CV3 хондрит Ефремовка)



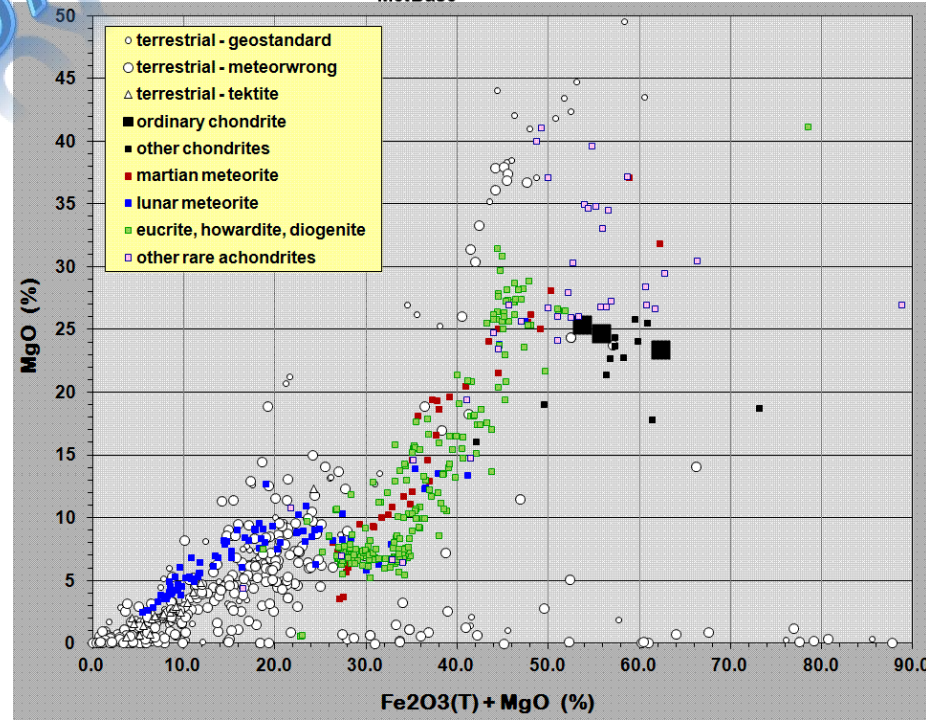
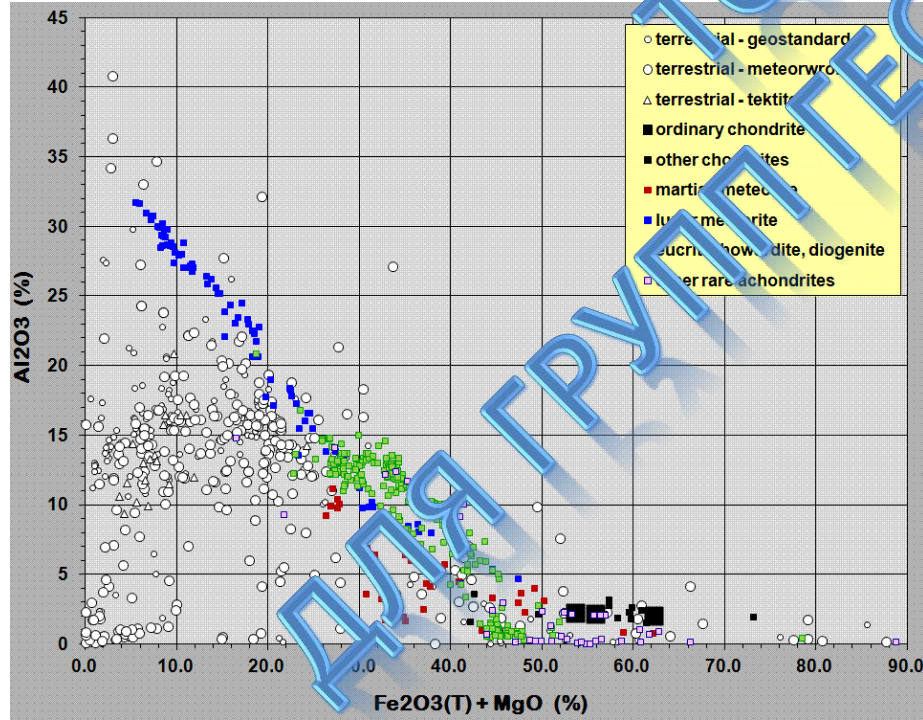
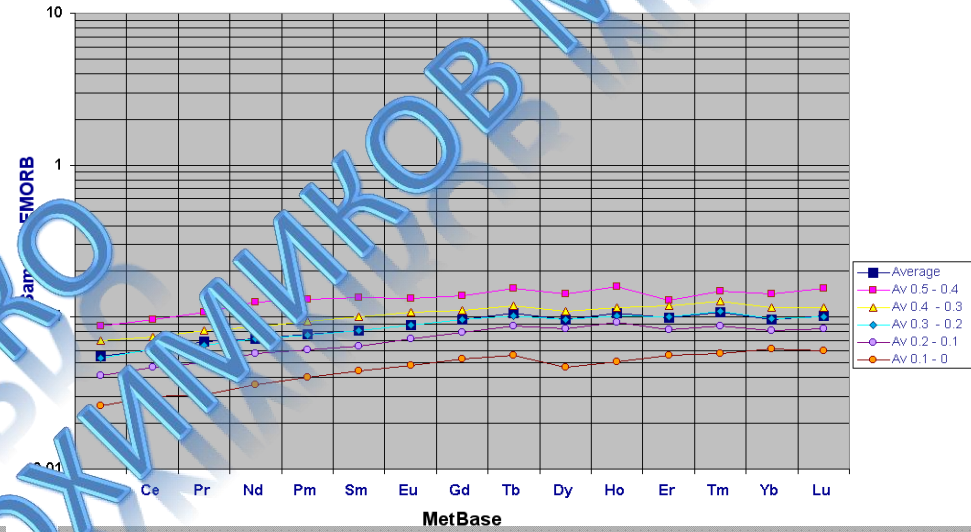
(Courtesy of A. Krot, University of Hawaii.)

# Примитивное вещество Солнечной системы

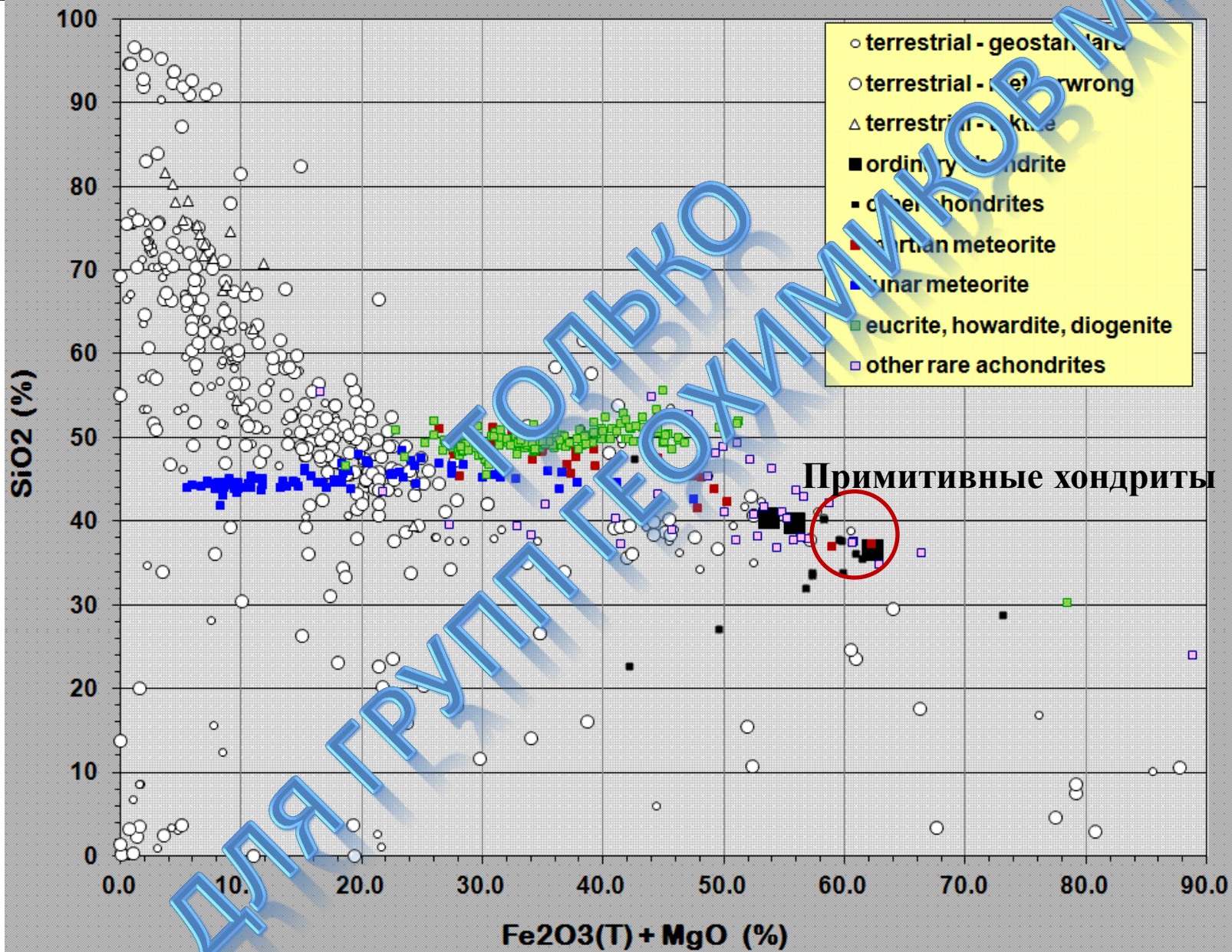
Av of 500 CHONDRITES, COMPARISON.



500 CHONDRITES AVERAGE ON La



# Примитивное вещество Солнечной системы



# Примитивные ахондриты

характеризуются приблизительно хондритовым минеральным и химическим составом, но имеют структуры перекристаллизации

Иногда содержат реликтовые хондры

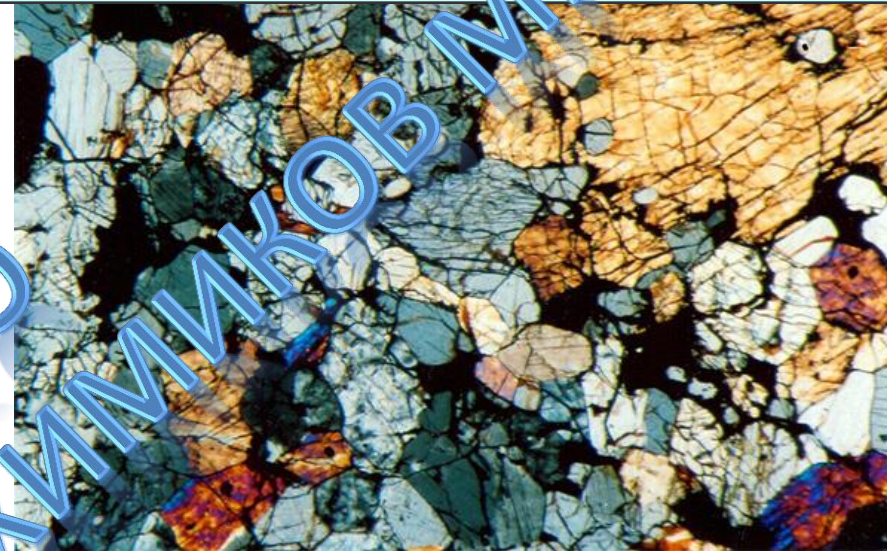
**акапулькоиты**

высокотемпературный метаморфизм и анатектическое плавление примитивного восстановленного хондритового материала

**лодраниты**

анатектическое плавление примитивного восстановленного хондритового материала

**виноваиты**



Лодранит NWA 4448 (ширина поля зрения 7 мм) Фото Т.Е. Bunch, 2008



Акапулькоит

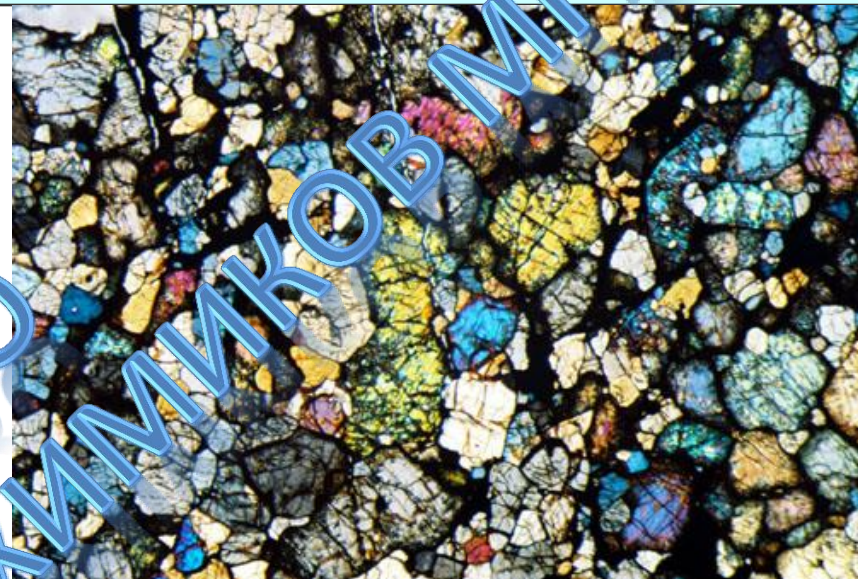
ДЛЯ ГРУПП ГЕОХИМИКОВ МГУ ТОЛЬКО



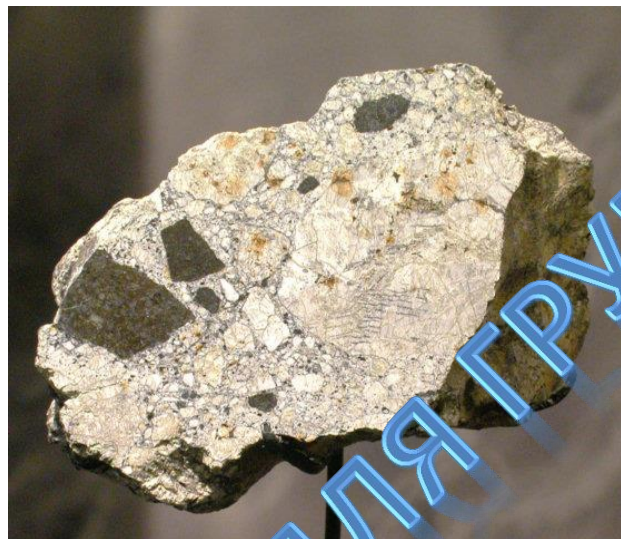
# Дифференцированные ахондриты



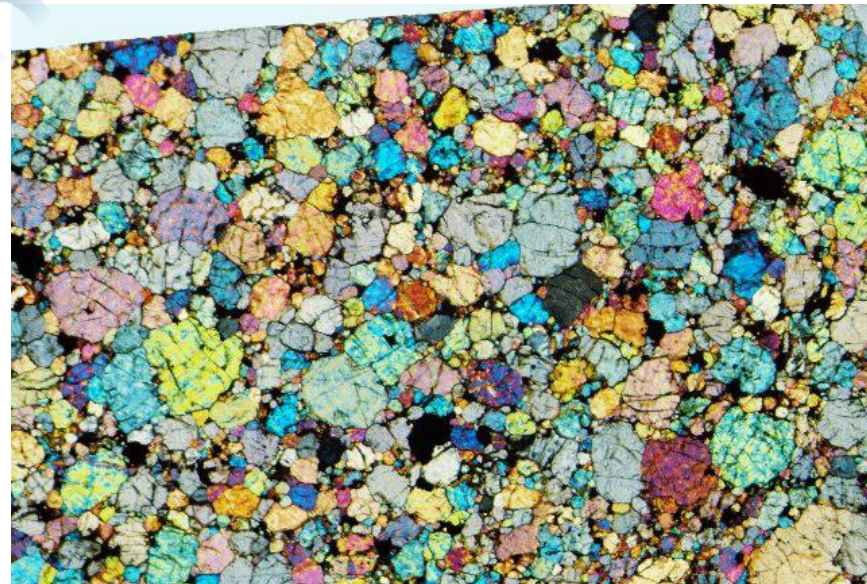
Ангрит = очень низкощелочной базальт



Уреилит = графитовый перидотит

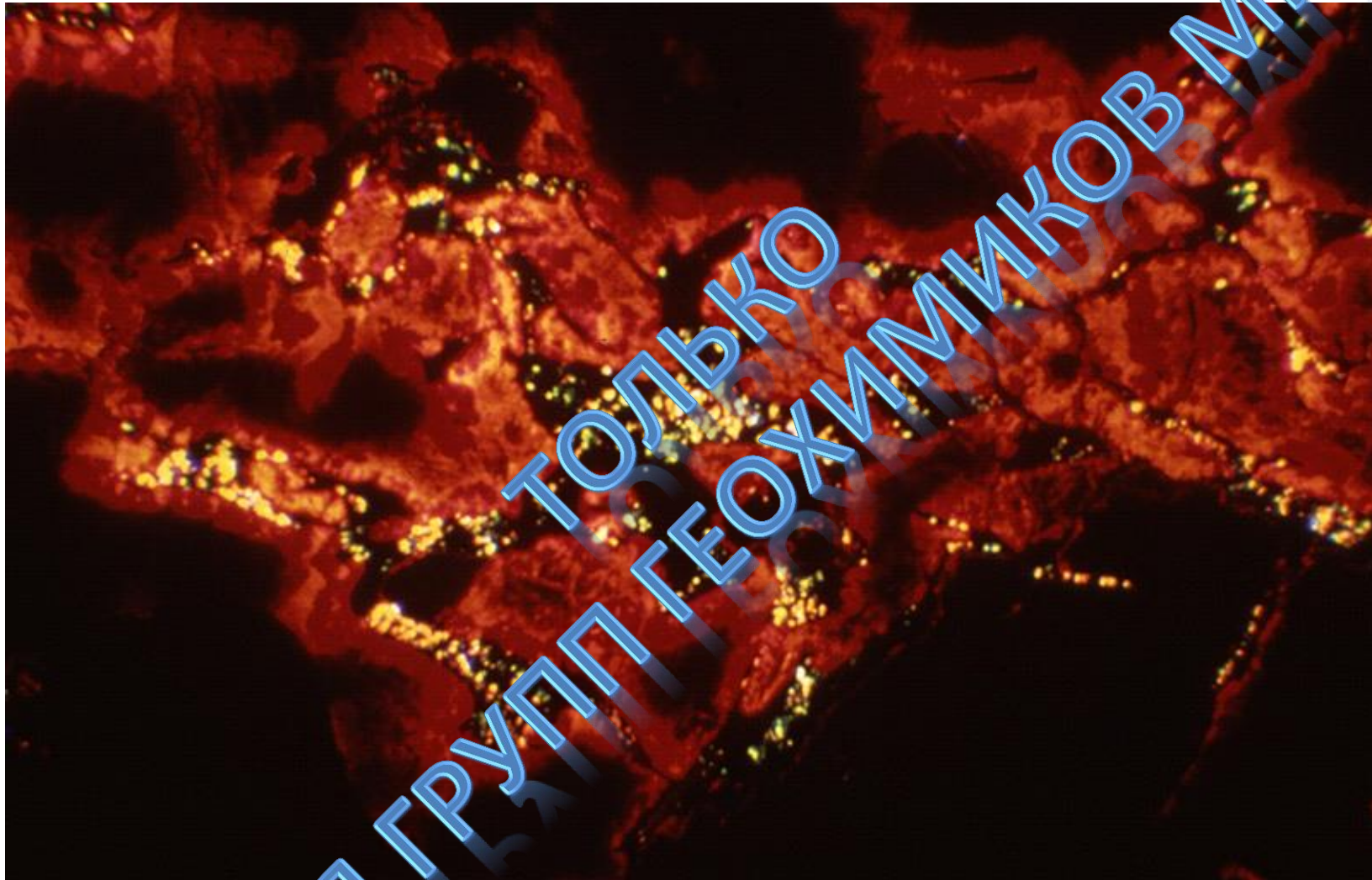


Обрит Cumberland с брекчированной структурой. Фото M. Horejsi



Брачинит = дунит-верлитовые кумулаты

# Высокобарные фазы в метеоритах



Алмаз, мейджорит, рингвудит

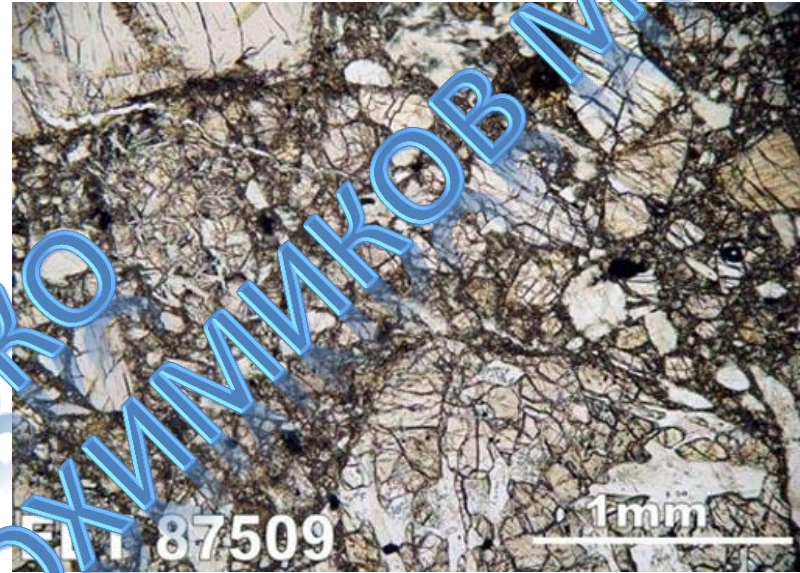
# Метеориты группы HED

Говардиты  
Эвкриты  
Диагенииты

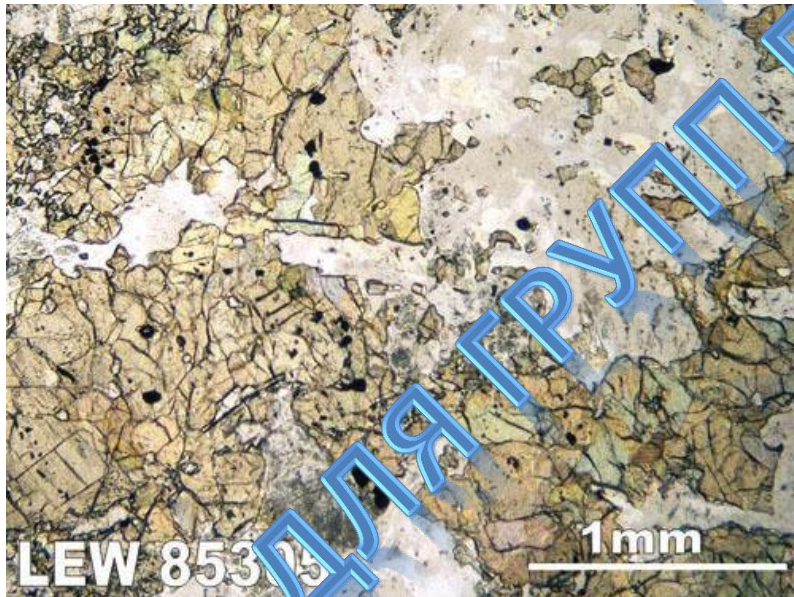


Веста

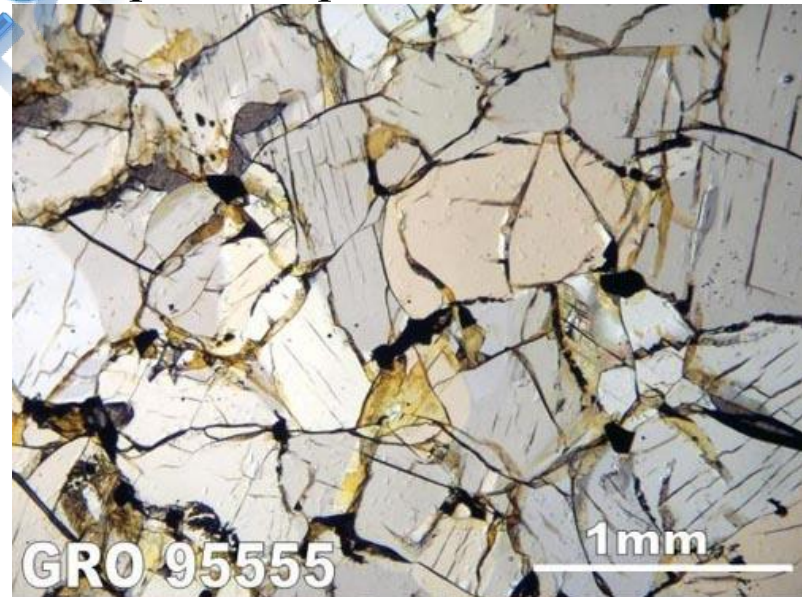
Ø - 500 км  
4.52-4.56  
млрд. лет



Говардит = брекчии HED



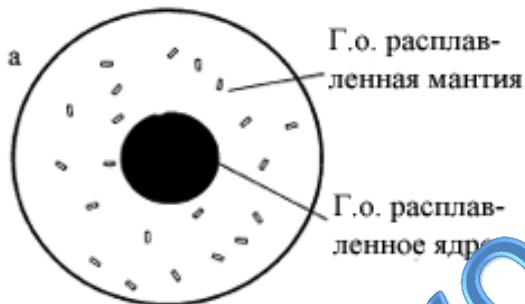
Эвкрит = базальтоиды



Диагениит = ортопироксенит или гарцбургит

# Родительское тело метеоритов группы HED

Образование ядра  
и океана магмы  
~ 1500 - 1530 °C



кумулятивные эвкриты являются образцами нижней коры (глубина 8-10 км)

базальтовые (или некумулятивные) эвкриты - продукты поверхностных лаавовых потоков

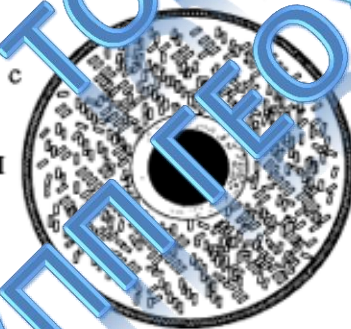
Диогениты - представители верхней мантии

Конвекция  
и равновесная кристаллизация

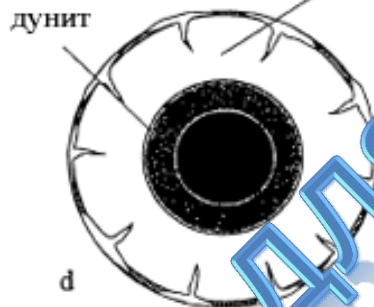
1530 °C - 1220 °C



Прекращение конвекции  
и осаждение кристаллов



кристаллизация остаточных расплавов в коре



по Righter, Drake, 1997

# Палласситы – железо-каменные метеориты

Палласситы - это железо-каменные метеориты, состоящие из примерно равного количества силикатов (в основном оливина), Fe-Ni металла и троилита

Оливин –  $Fe_{88}$ ,  
очень богат фосфором (до 3-5 масс. %)

Возможно, граница ядро-мантия



Петер Симон Паллас  
1741—1811



Минералогический музей им. А.Е.Ферсмана



Андрей Палласовский метеорит

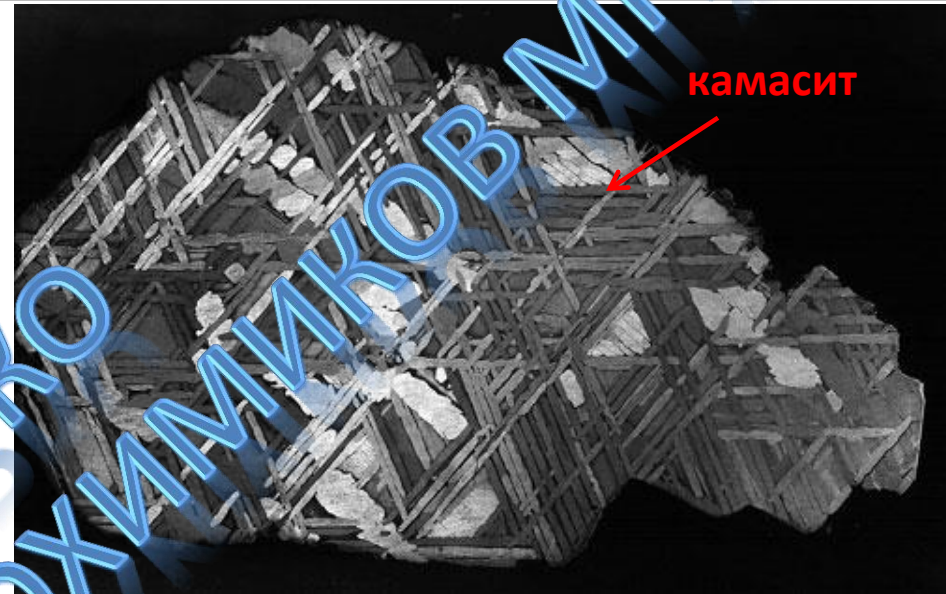
# Железные метеориты

Железные метеориты состоят почти целиком из Fe-Ni металла с акцессорными хромитом, фосфидами и сульфидами

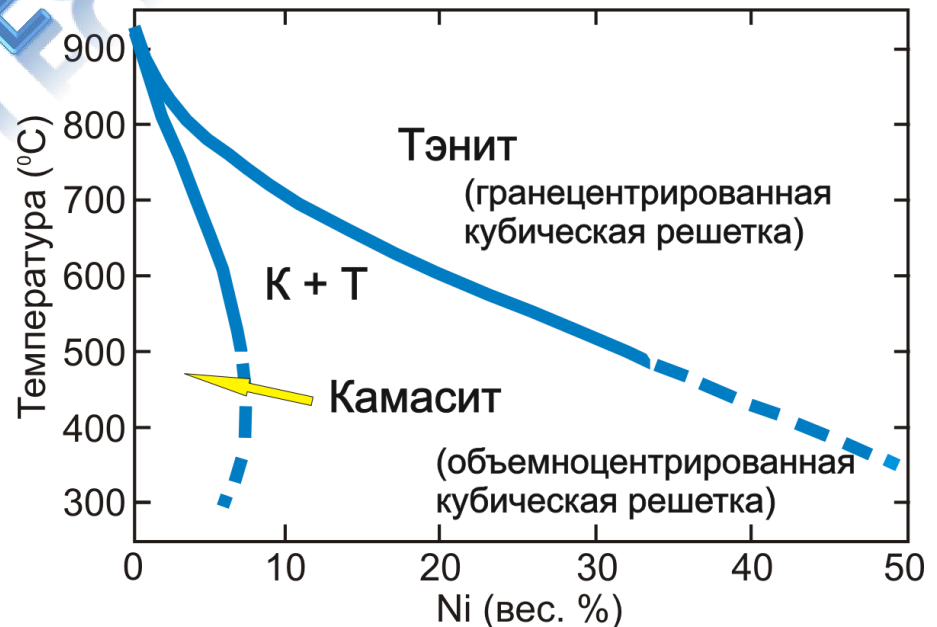
Гексаэдриты (4-6% Ni)

Октаэдриты (6-12% Ni)

Атакситы (12+% Ni)



Видманштеттенная структура в октаэдритах

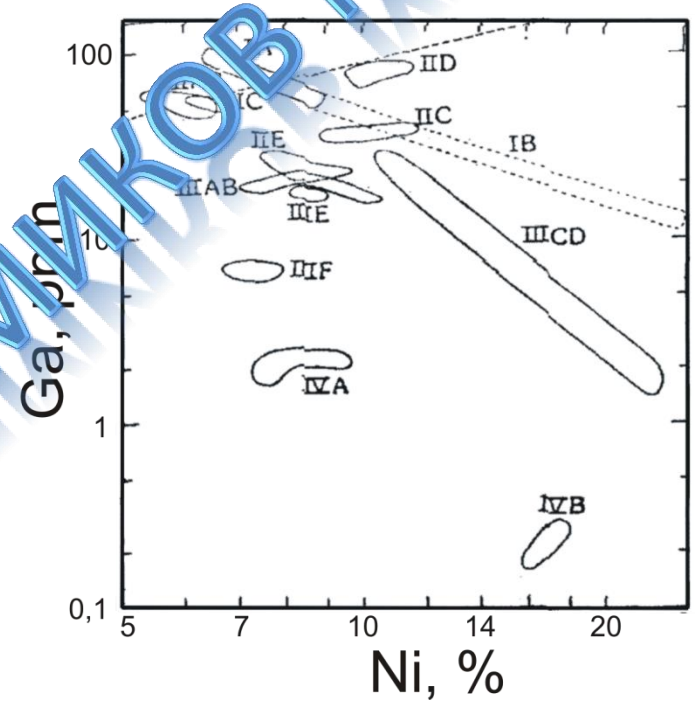
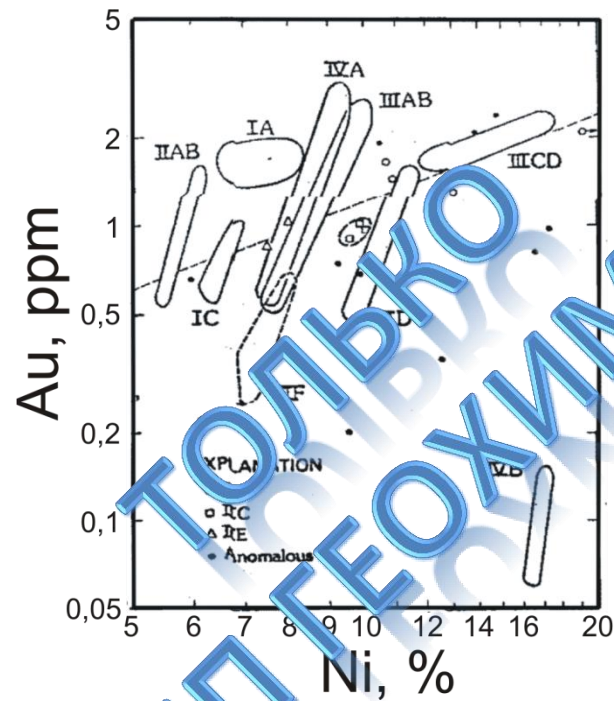
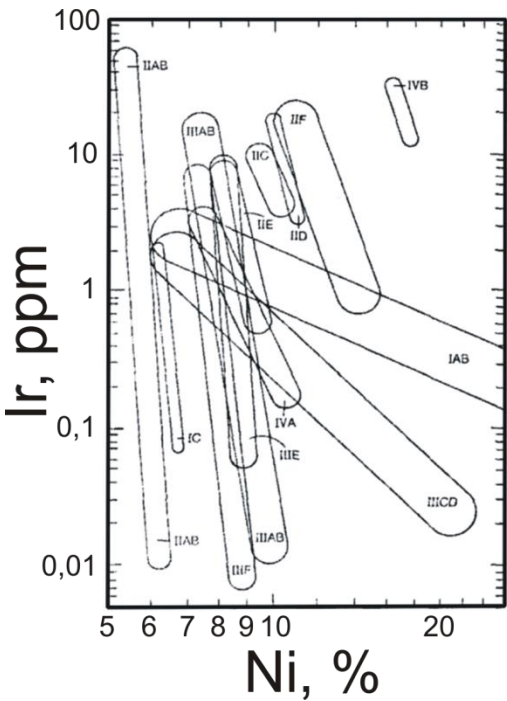


# Морфология поверхности железных метеоритов



Сихоте-Алиньский метеорит, музей им. Ферсмана

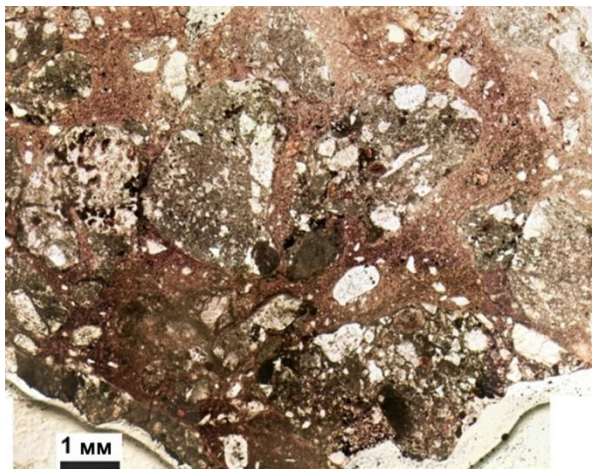
# Железные метеориты, геохимические группы



Из 13 групп наиболее распространены группы IAB, IIAB и IIIAB



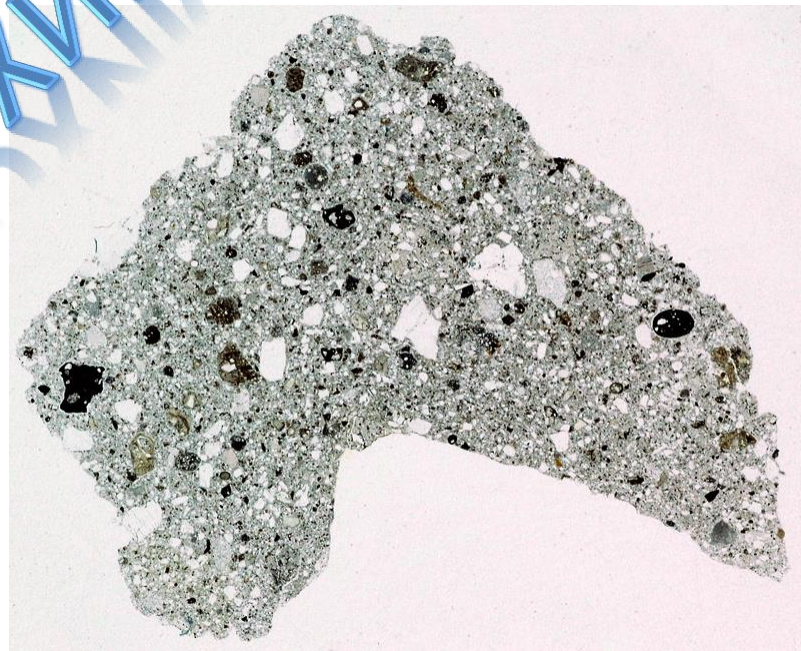
# Лунные метеориты



Шлиф лунного метеорита Dhofar 311, проходящий свет. Брекчия с ударно-расплавной матрицей. Имеет структуру «брекчия в брекчии». Такие породы – ударные расплавы, нагруженные обломками, очень типичны в материковых областях Луны. Фото С.И. Демидова



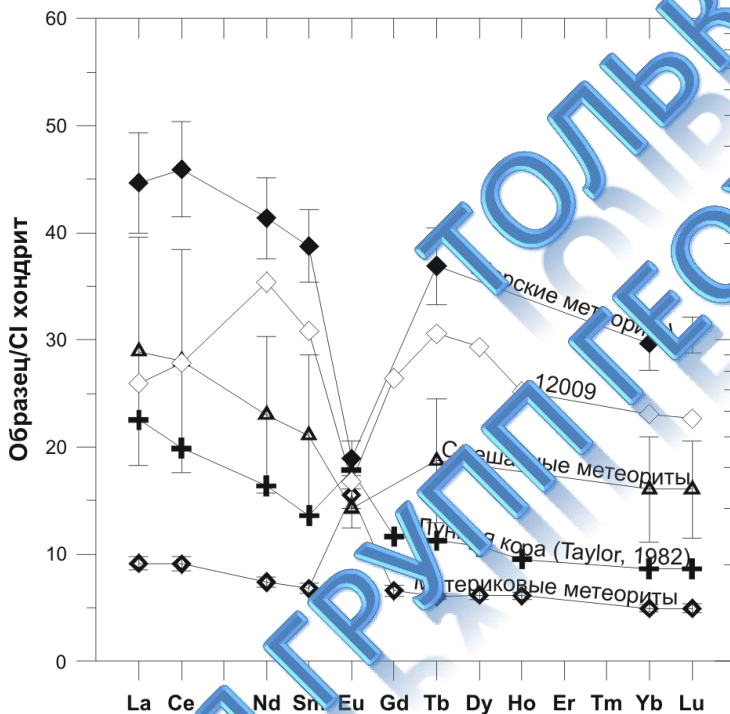
Лунный метеорит Luna A 2995



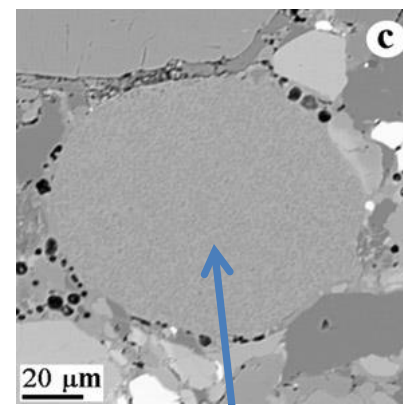
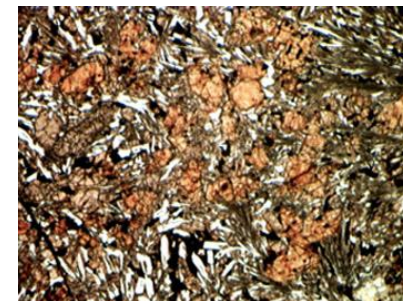
Брекчия реголита Apollo 16 (60016)

# Лунные метеориты

Лунные базальты – отрицательная Eu-аномалия



Метеорит Dhofar



Лунные анортозиты – положительная Eu-аномалия

Пирокластический материал

ДЛЯ ГРУПП ТОЛЬКО ХИМИКОВ МГУ

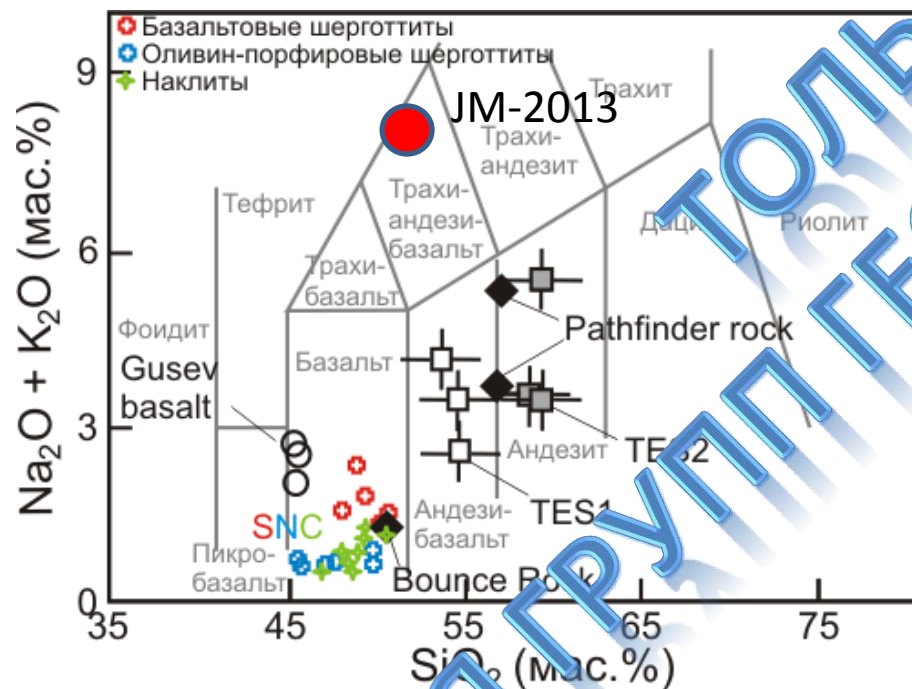
# Марсианские метеориты (SNC)

Всего 67 метеоритов

**Шерготтиты**

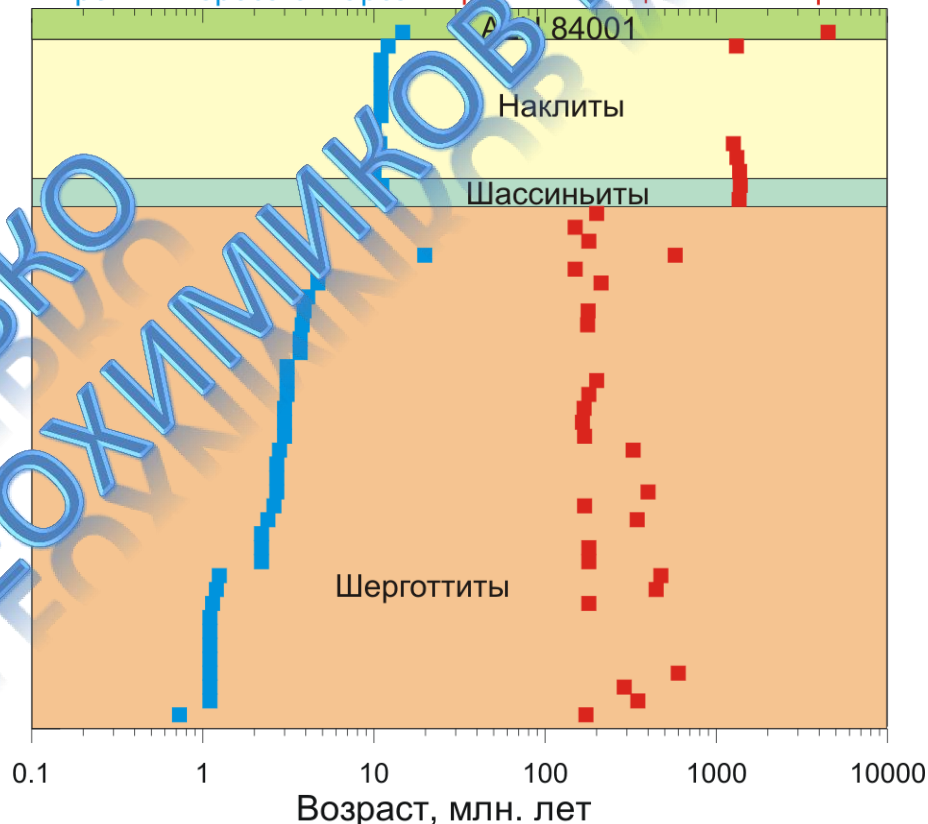
**Наклиты**

**Шассиньиты**



Гораздо моложе, чем другие метеориты

Время выброса с Марса      Кристаллизационный возраст

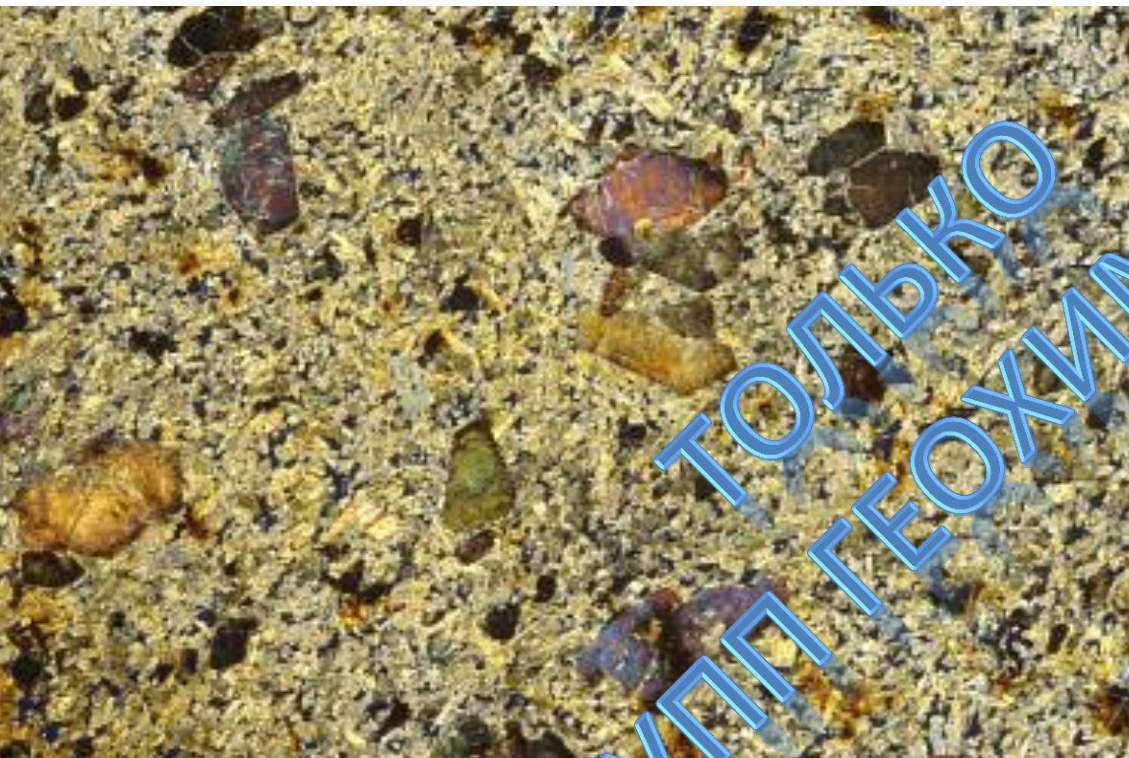


**Требуется крупная планета, которая могла сохранять вулканическую активность**

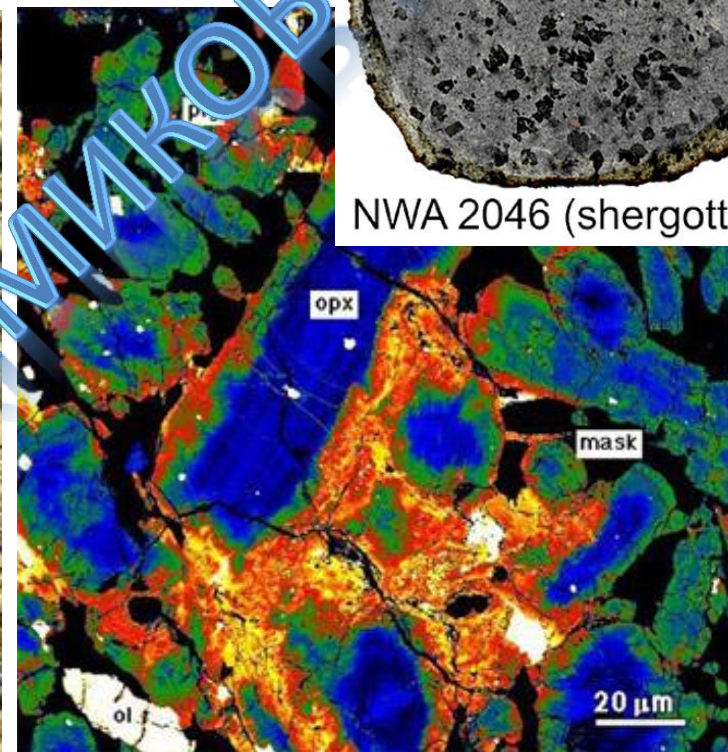
Может быть, часть этих метеоритов с Венеры или с Меркурия?

# Марсианские метеориты (SNC)

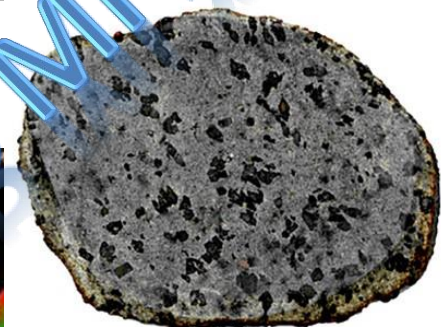
## Шерготтиты – пижонитовые базальты



Оливин-порфировый шерготтит  
NWA 1195 (фото A. Irving).



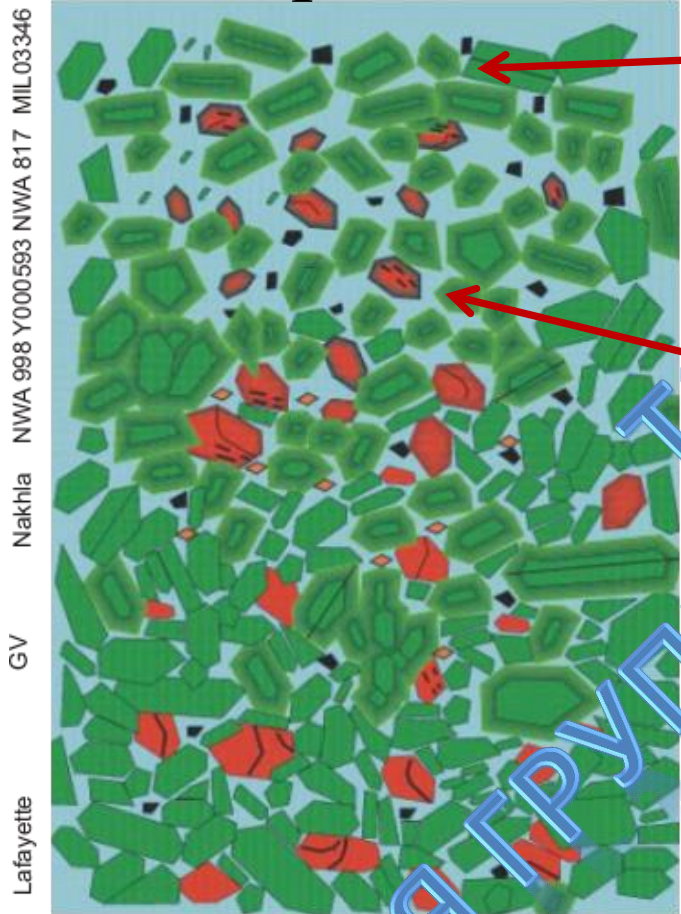
Базальтовый шерготтит – NWA 2046  
(карта распределения элементов ,  
A. Irving, S. Kuehner, 2004)



NWA 2046 (shergottite)

# Марсианские метеориты (SNC)

Наклиты – богатые  
клинопироксеном ахондриты



Lafayette  
GV  
Nakhla  
NWA 998 Y000593 NWA 817 MIL03346

нет оливина

больше мезостазиса,  
зональный оливин,  
низкое Ca/Mg в сидерите  
оливин со структурами распада

сидерит и сульфат  
в интерстициях

меньше мезостазиса,  
незональный оливин,  
высокое Ca/Mg в сидерите,  
больше глины и сидерита  
меньше структур распада



зональный оливин со структурами распада  
оливин с прожками глины-сидерита  
зональный пироксен  
пироксен

сидерит  
Ti-магнетит

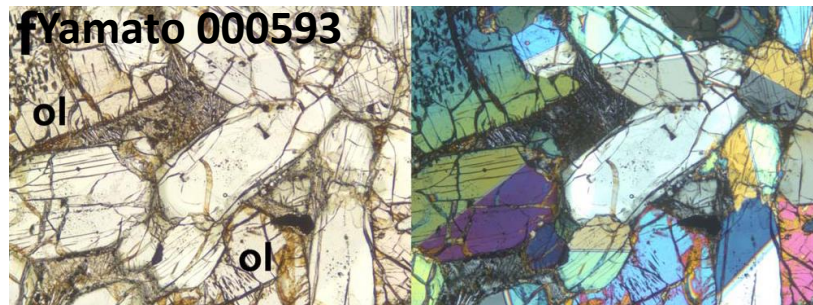


MIL 03346

Yamato 000593



Yamato 000593



# Сравнение составов минералов в ахондритах

