

Истории из физики магмы

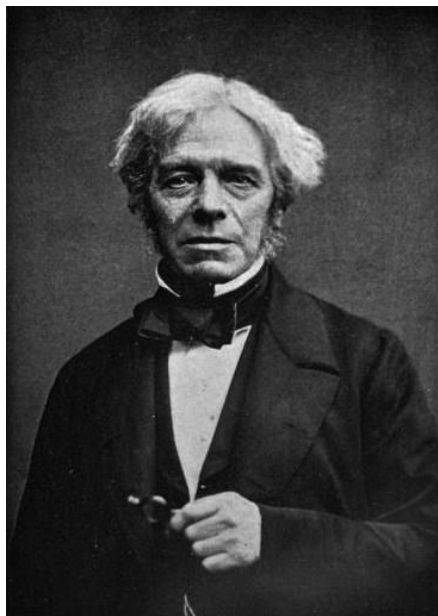


Павел Плечов

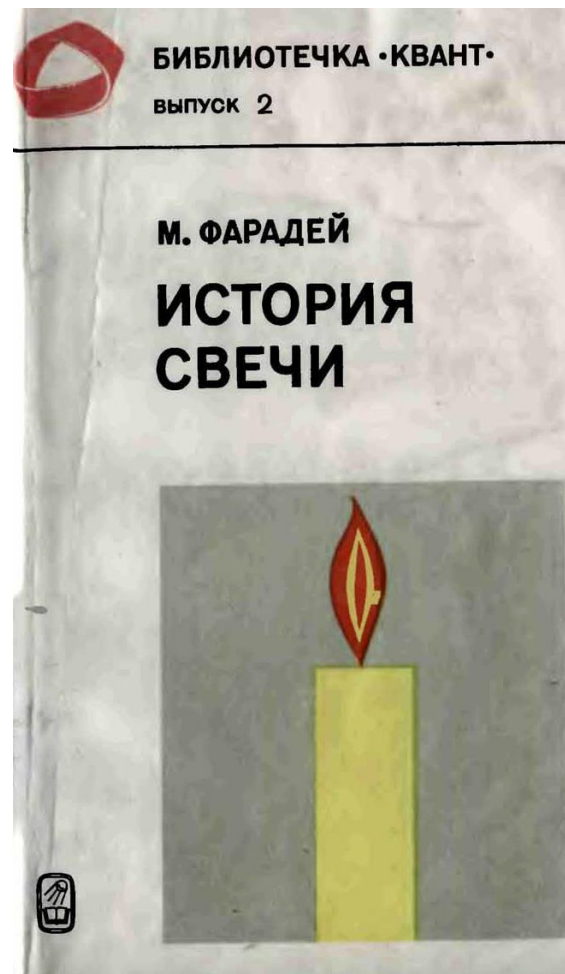
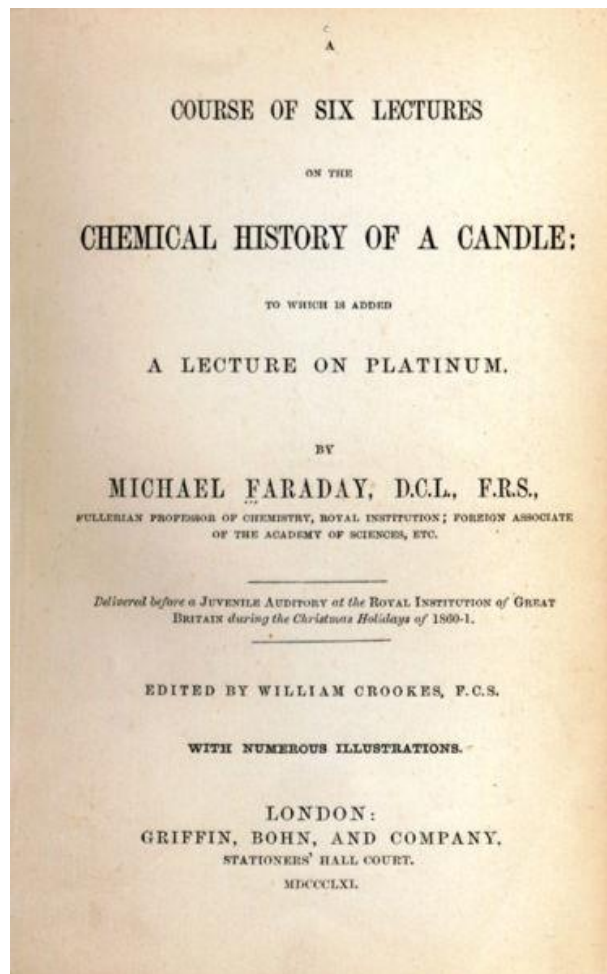
Геологический факультет МГУ
каф.петрологии

моя палатка

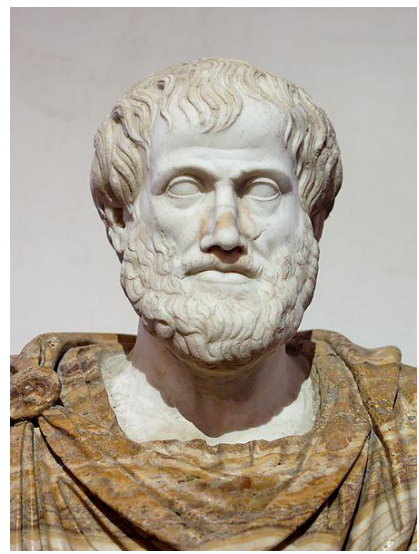
Лекции Фарадея по химии и физике



Майкл Фарадей
1791 — 1867



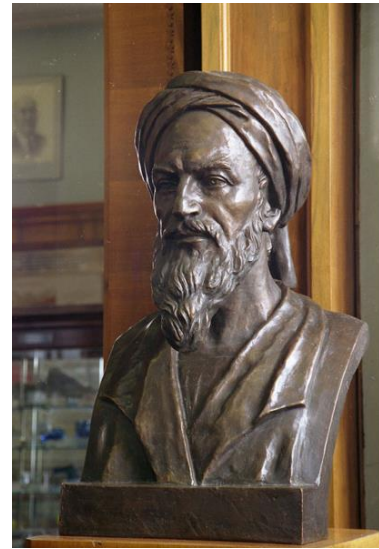
Истории о магме



Ἀριστοτέλης
(384 – 322 до н.э.)



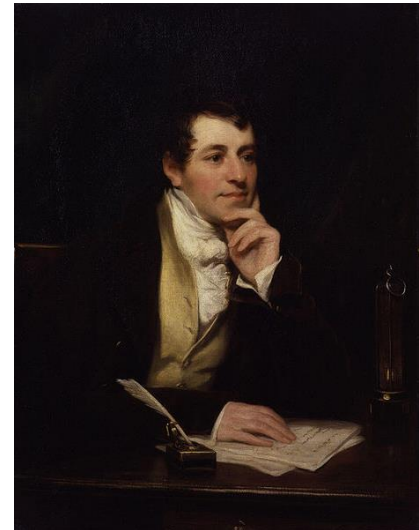
Плиний Младший
(61/63 – ок. 113)



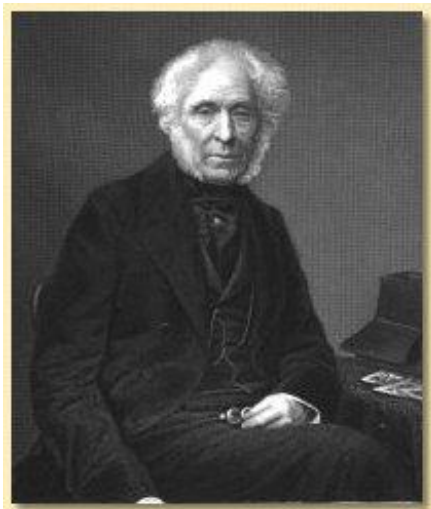
Аль-Бируни
(973-1048)



Роберт Бойль
(1627 – 1691)



Х.Дэви, 1778 – 1829



Д.Брюстер, 1781 – 1868



Г.Тазиев, 1914-1998



А.Н.Заварицкий (1884-1952)

Понятие магмы

Магма (От греч. "магма" - "густая мазь") смесь магматического расплава, кристаллов и/или их сростков и флюидной фазы, способная к перемещению в земной коре.



Вода + соль + Крупа + Т = Каша

Расплав + флюид + Кристаллы + Т,Р = Магма

Понятия магмы и лавы

Магма, попадающая на поверхность Земли, теряет растворенные летучие компоненты и превращается в лаву.



Лавы = Магма - флюид

Понятия магмы и лавы

При застывании магмы и лавы образуются магматические породы.

ЗАСТЫВШАЯ МАГМА

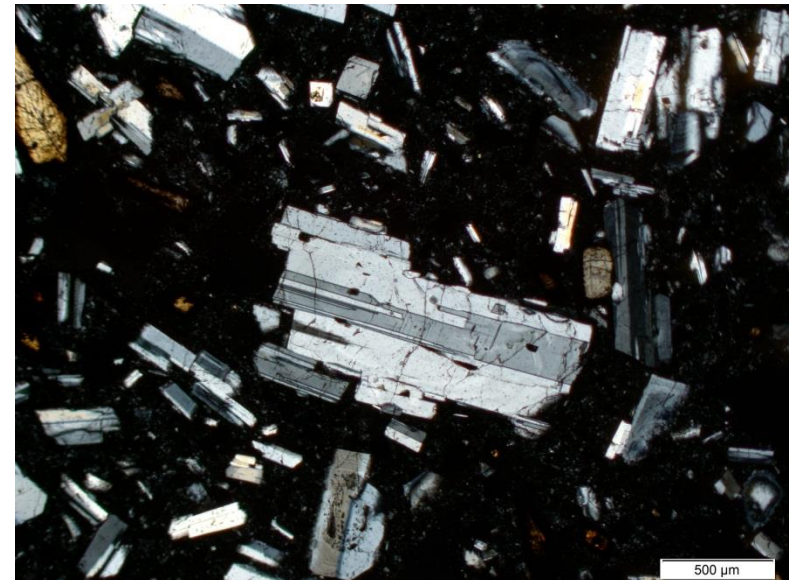
Плутонические = Интрузивные



Полнокристаллические

ЗАСТЫВШАЯ ЛАВА

Вулканические ≠ Эффузивные

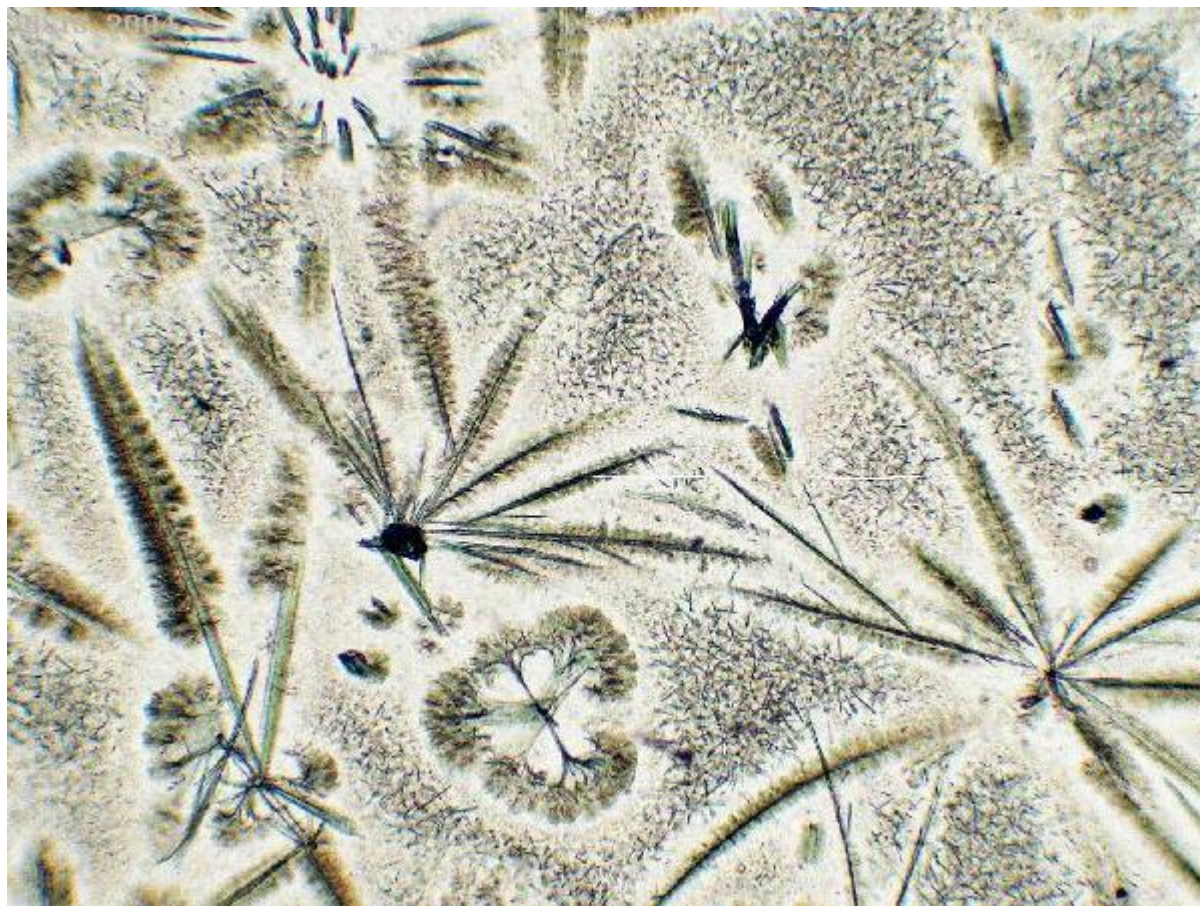


Неполнокристаллические,
Порфировые

Вулканическое стекло

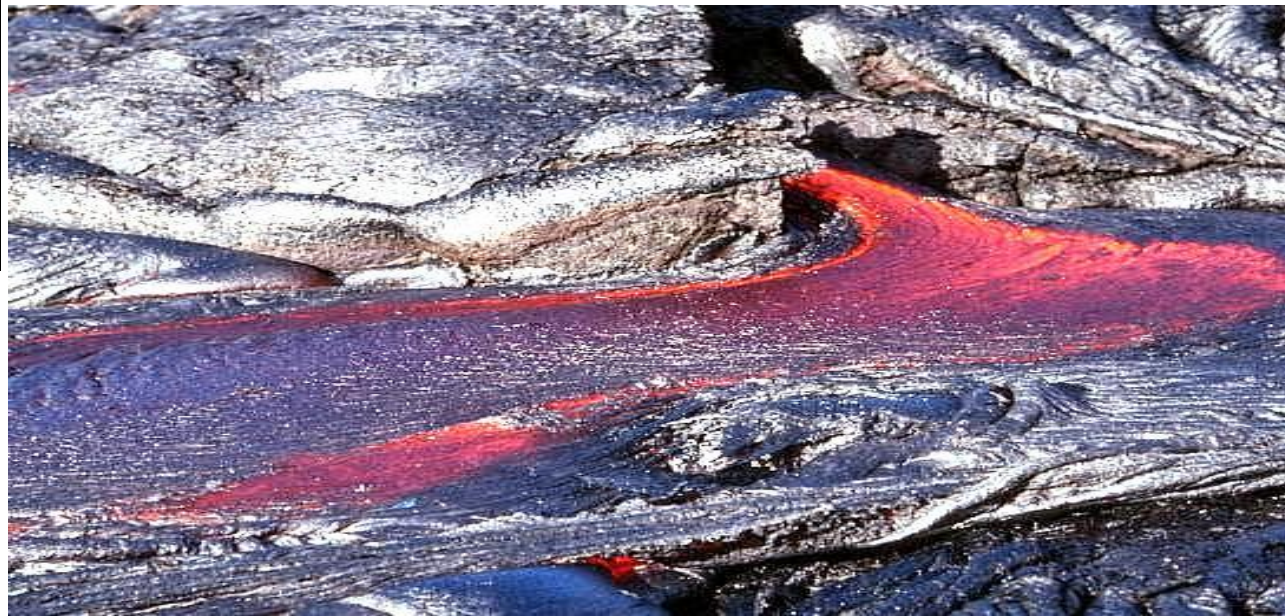
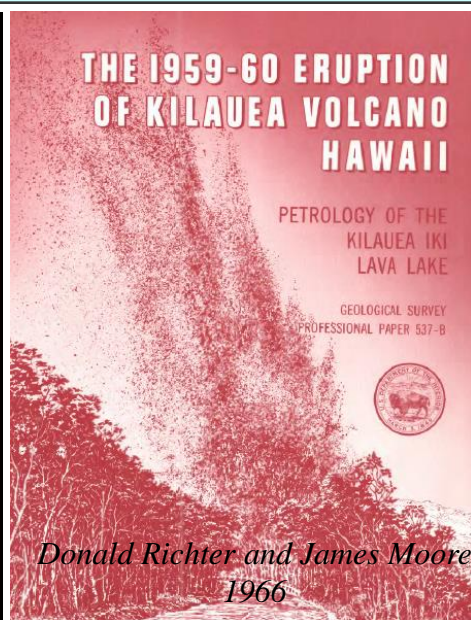


Обсидиан



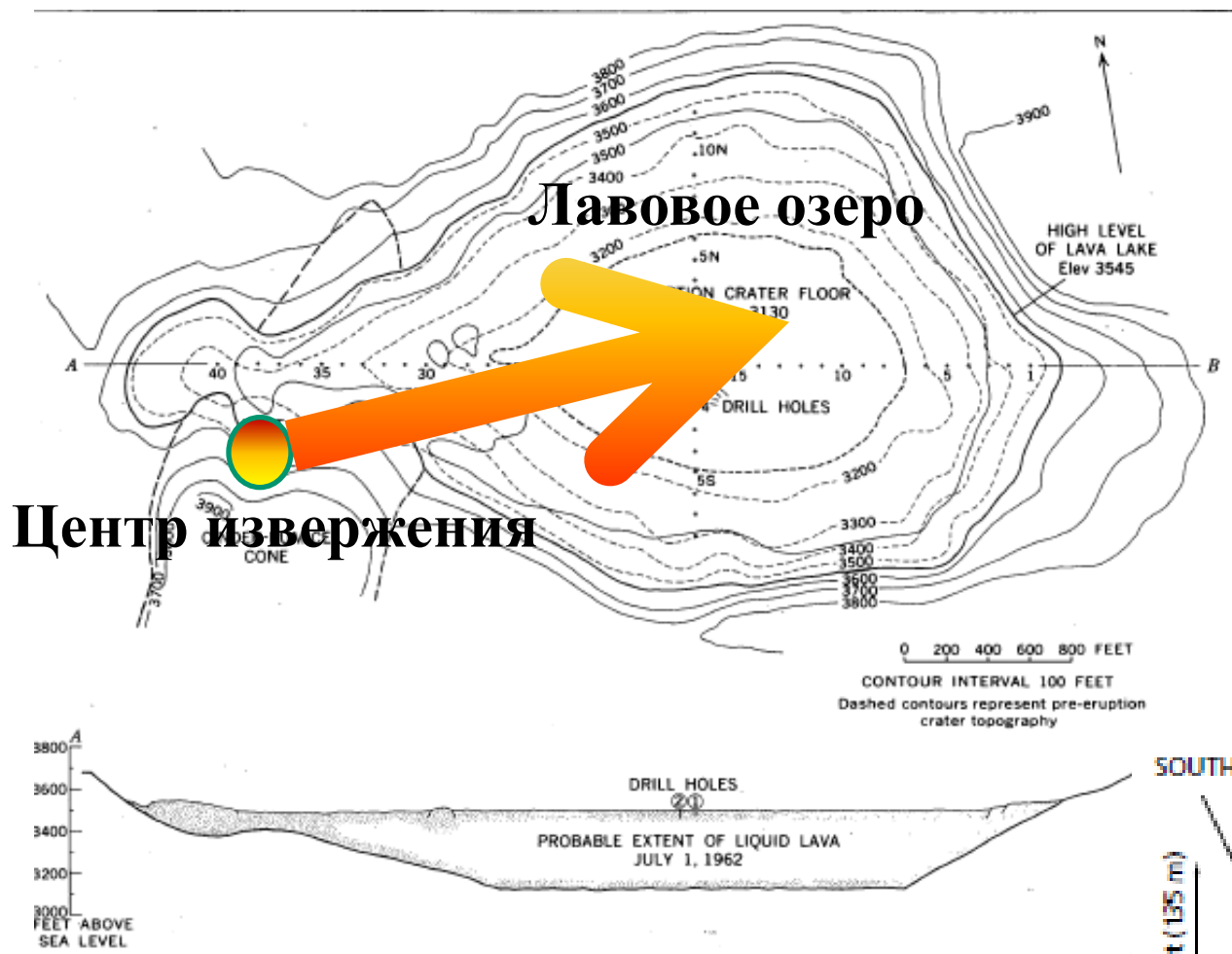
аморфное твердое тело (переохлажденная жидкость), состоящее из беспорядочных агрегатов структурных элементов размером порядка 10^{-8} - 10^{-9} м; названия магматическим стеклам даются: по составу - риолитовое (обсидиан и др.), базальтовое (тахилит)

Гавайи – природная лаборатория



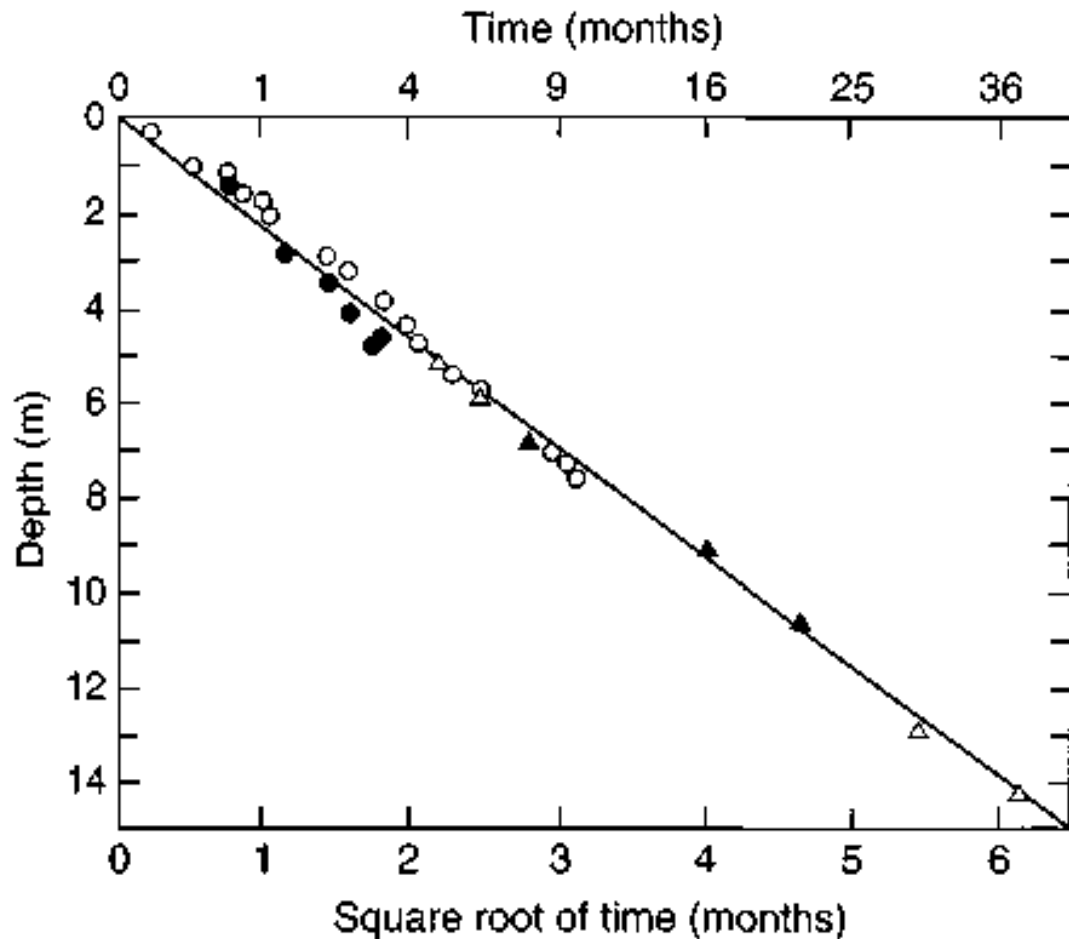
Извержение 1959-1960 гг
Длилось 5 недель
Лавы фонтанировала на
высоту до 500 м
Образовалось лавовое
озеро глубиной 135 м.

Бурение лавового озера на Гавайях

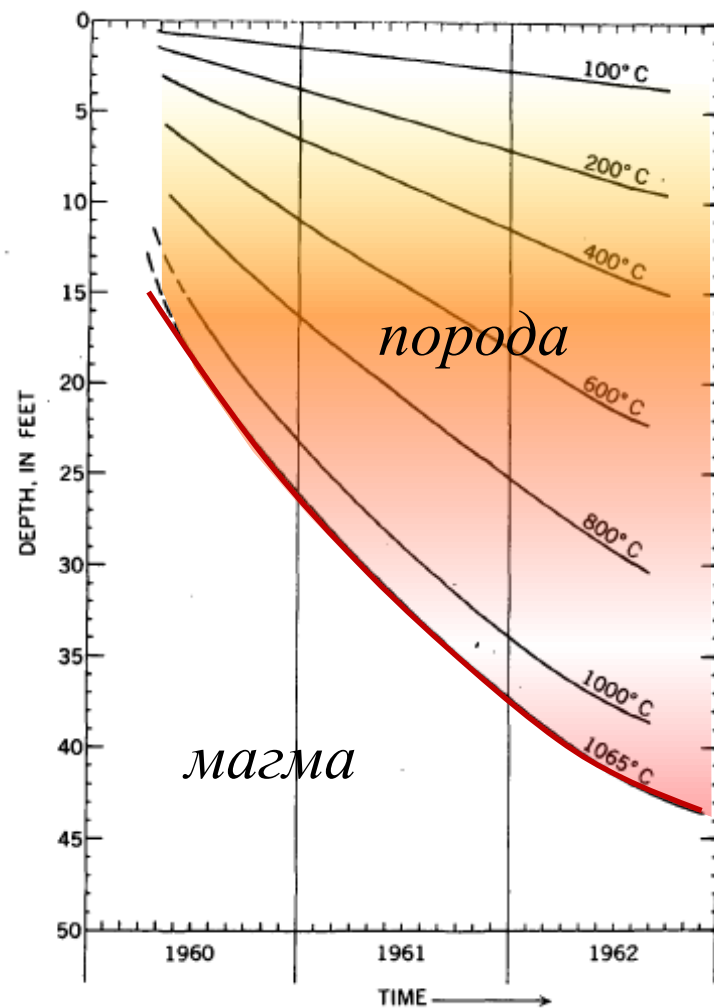


В озере проводилось периодическое бурение. При кристалличности > 55% корка вела себя как твердая порода. При кристалличности < 50% бур свободно продвигался руками. Температура образования корки ~1065°C. В 1988 г в озере уже не было магмы, но были участки, содержащие магматический расплав.

Бурение лавового озера на Гавайях



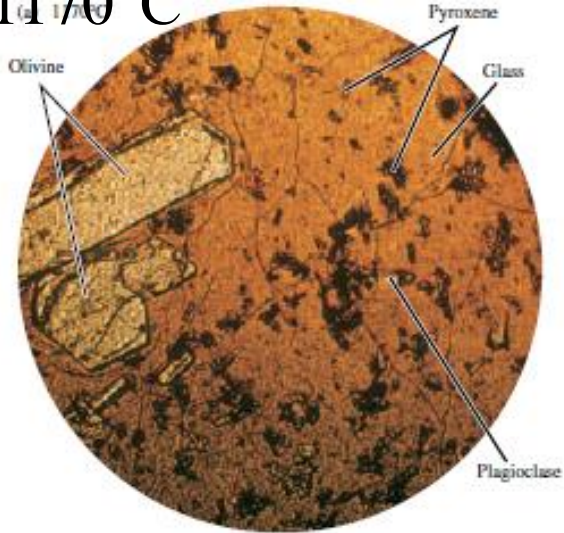
$$\text{Глубина фронта} = \lambda \cdot \sqrt[2]{t}$$



Продвижение фронта затвердевания пропорционально корню из времени

Кристаллизация лавового озера

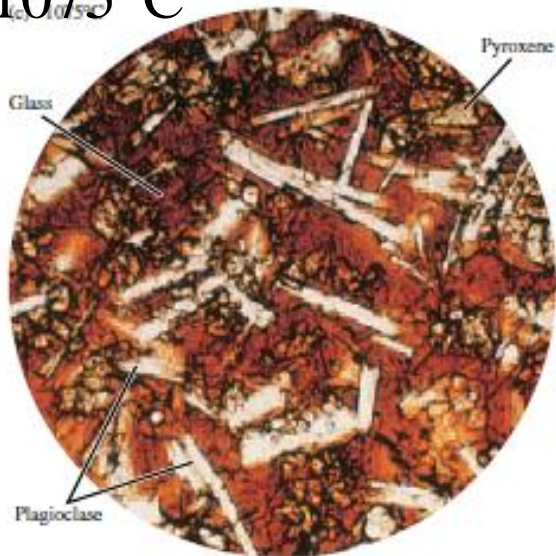
1170°C



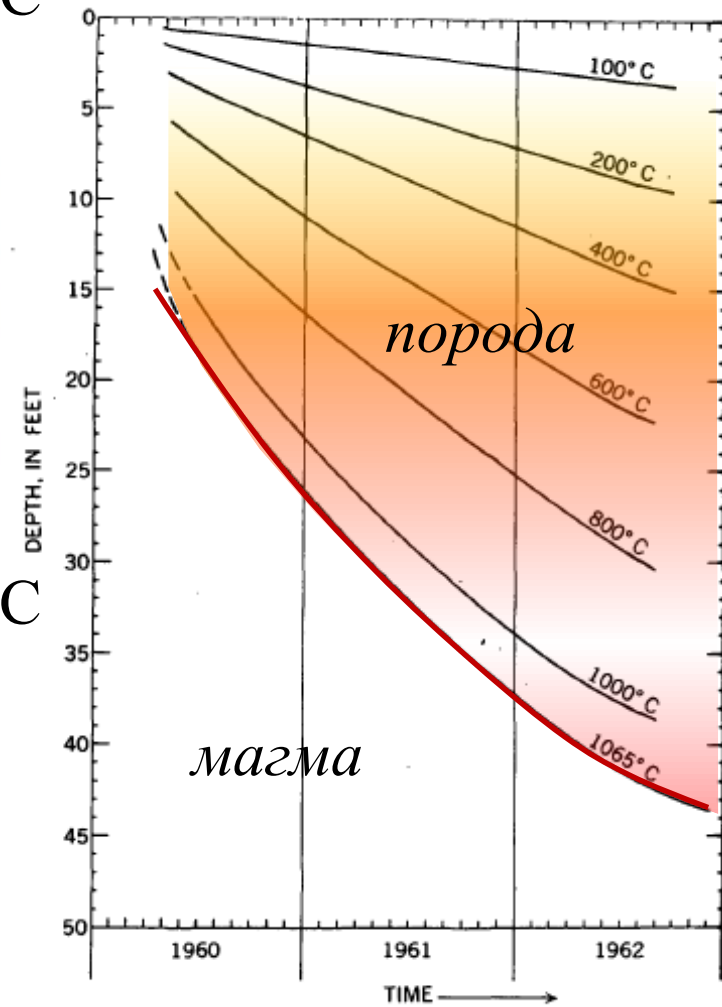
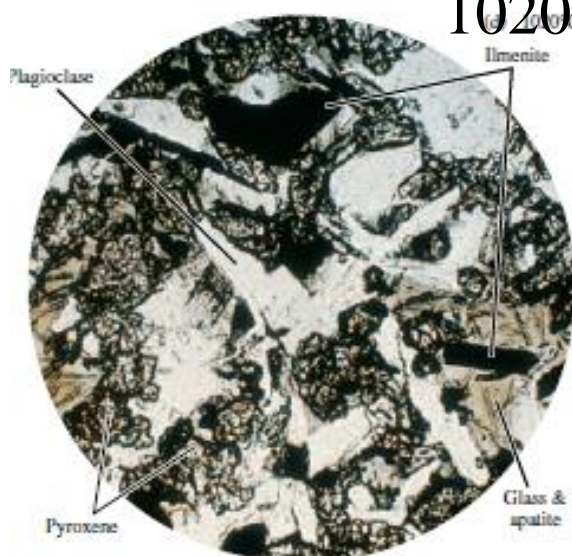
1130°C



1075°C

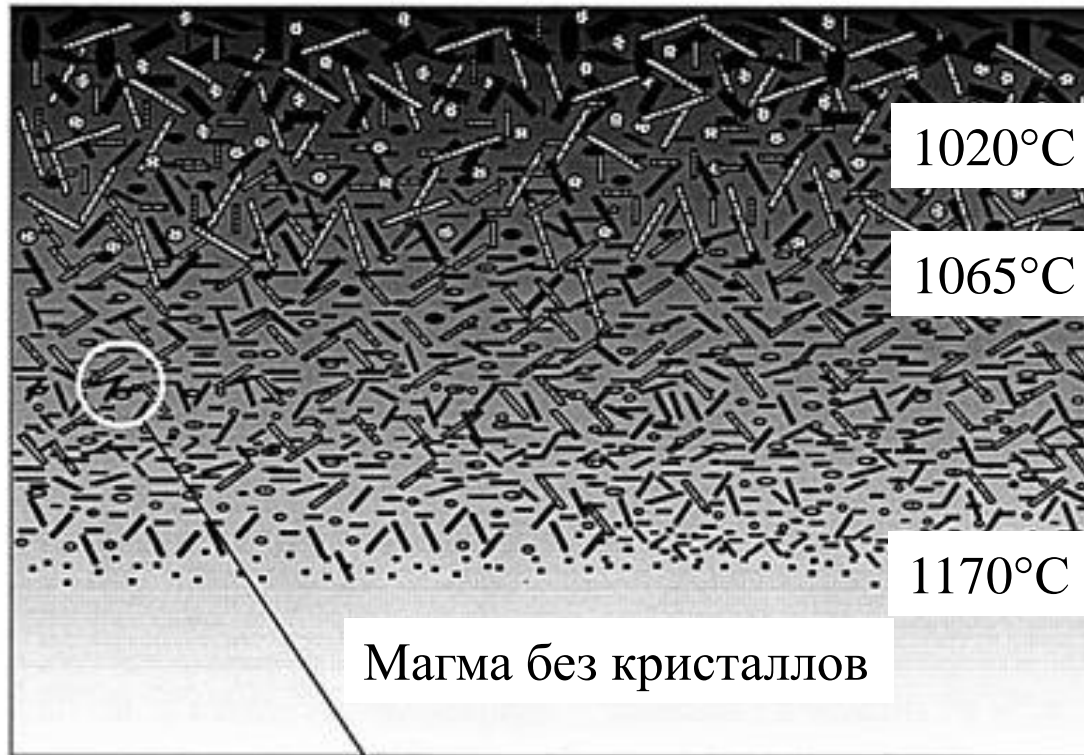


1020°C



Понятие предельной кристалличности

Marsh, 1989, Marsh, 2002



Полностью застывшая магма

1020°C

Твердая корка

1065°C

Кристаллическая каша

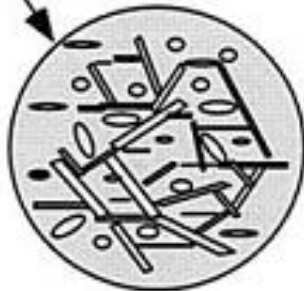
Фронт связывания

Суспензия

1170°C

Магма без кристаллов

Магма без кристаллов



Для лавового озера Макаопухи:

Твердая корка $1 \geq S > 0.55$

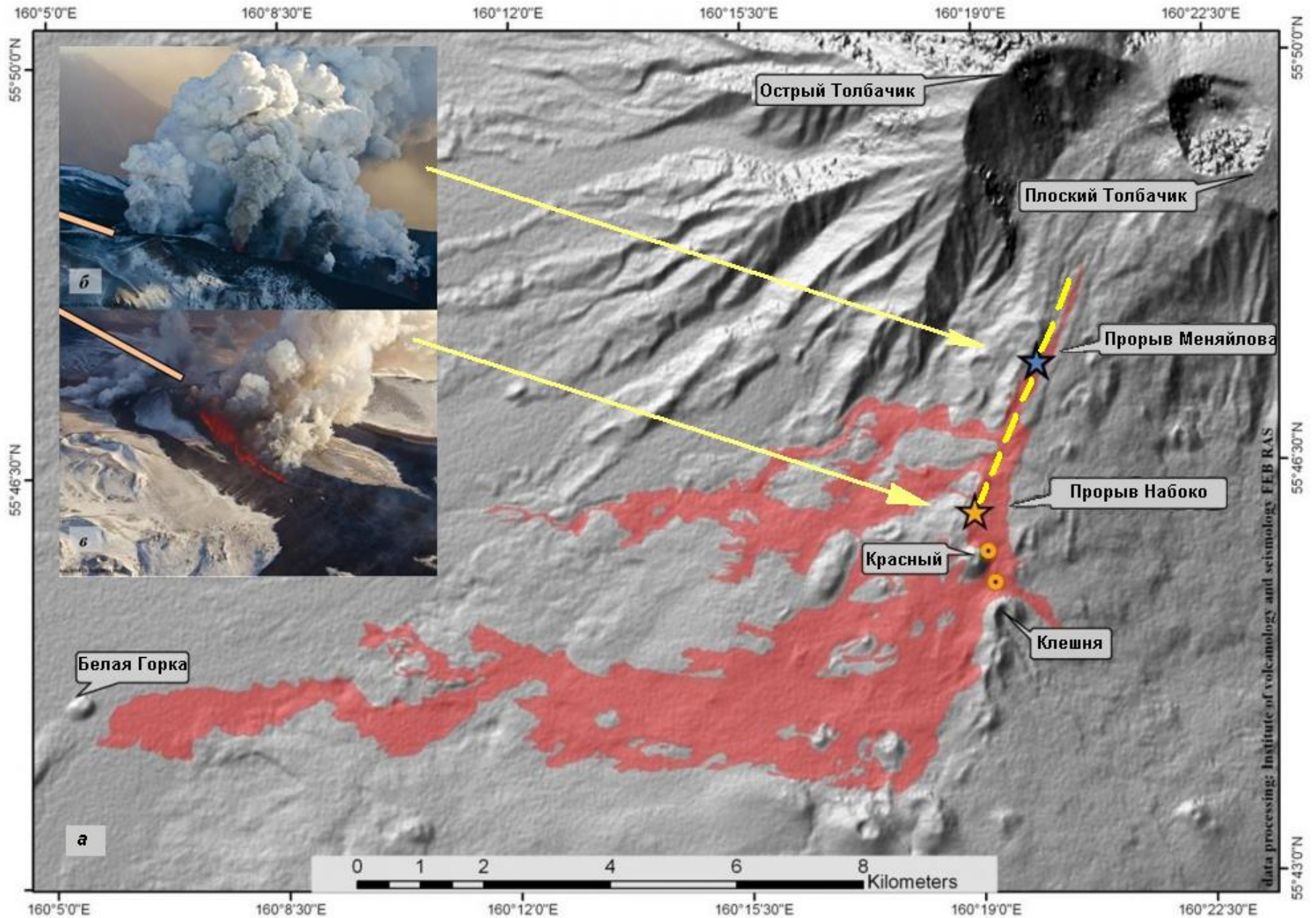
Кристаллическая каша $0.55 \geq S > 0.25$

Магматическая суспензия $0.25 \geq S > 0$

Камчатка – природная лаборатория



Вулкан Толбачик, извержение 2012-2013



Вязкость магматических расплавов

Вязкость (η) – физическое свойство, отражающее способность жидкости к течению



Svetlana Sewell

$$\tau = \eta \frac{du}{dz}$$

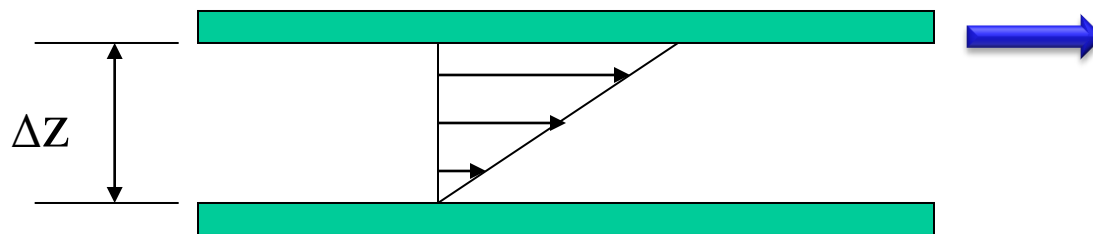
Закон вязкости Ньютона

Закон вязкости Ньютона



$$\tau = \eta \frac{du}{dz}$$

Подвижная пластина движется
с постоянной скор. u



Неподвижная пластина

τ (Н/м²) – напряжение деформации

u (м/с) – скорость

z (м) - координата

$$\eta = \tau / \frac{du}{dz}, \text{ Па} \cdot \text{сек}$$

Применение закона Ньютона к лавовому потоку

Дано:

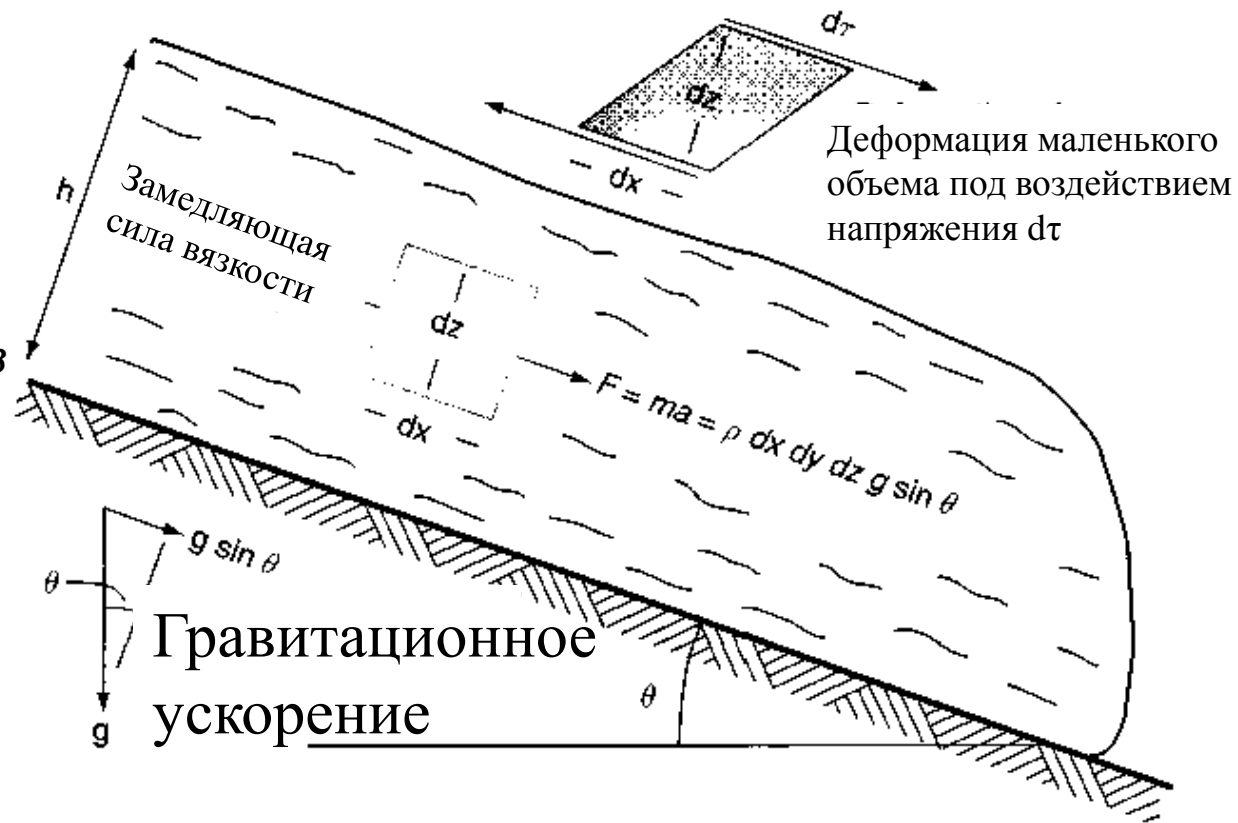
Лавовый поток течет по склону вулкана Толбачик со скоростью 2 м/с.

Угол склона 7.5 градусов.

Плотность лавы 2610 кг/м³

Вязкость лавы 944 Па*с

Оценить максимальную глубину лавового потока, предполагая ньютоновское поведение жидкости



Поскольку поток стационарен (нет ускорения), можно считать равной нулю сумму всех сил

$$0 = F + \text{Замедляющая сила вязкости} = \rho \cdot dx \cdot dz \cdot g \sin \theta + \tau \cdot dx \cdot dz$$

Применение закона Ньютона к лавовому потоку

$$0 = F + \text{Замедляющая сила вязкости} = \rho \cdot dx \cdot dz \cdot g \sin \theta + \tau \cdot dx$$

$$\rho \cdot dx \cdot dz \cdot g \sin \theta = -\tau \cdot dx$$

$$\tau = -\rho \cdot dz \cdot g \sin \theta$$

τ не зависит от z , проинтегрируем:

$$\tau = -\rho \cdot g \sin \theta \cdot z + \text{Const}$$

$\tau=0$ на поверхности потока, когда $z = h$

Отсюда,

$$\text{Const} = \rho \cdot g \sin \theta \cdot h,$$

а формула примет вид:

$$\tau = \rho \cdot g \sin \theta \cdot (h - z) = \eta \frac{du}{dz}$$

Интегрируем еще раз по dz :

$$u = \frac{\rho \cdot g \sin \theta}{\eta} \cdot \left(hz - \frac{z^2}{2} \right) + \text{Const}$$

Закон Ньютона

$$\tau = \eta \frac{du}{dz}$$



Применение закона Ньютона к лавовому потоку

$$u = \frac{\rho \cdot g \sin \theta}{\eta} \cdot \left(hz - \frac{z^2}{2} \right) + \text{Const}$$

На дне потока скорость равна нулю, т.е. при $z=0$ - $u=0$. Отсюда $\text{Const}=0$ и, конечная формула:

$$u = \frac{\rho \cdot g \sin \theta}{\eta} \cdot \left(hz - \frac{z^2}{2} \right)$$

Замеренная скорость относится к поверхности потока, где $z=h$.

Подставим все величины в уравнение:

$$2 \text{ м/с} = \frac{2610 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \sin 7.5^\circ}{944 \text{ Па} \cdot \text{с}} \cdot \left(\frac{h^2}{2} \right)$$

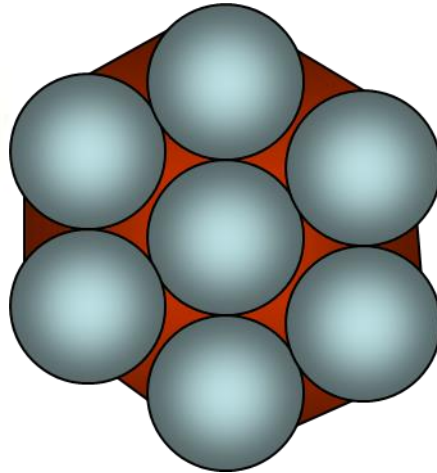
$$h^2 = \frac{2 \cdot 2 \cdot 944}{2610 \cdot 9.81 \cdot 0.1305} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{Па} \cdot \frac{\text{с}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} \right) = 1.13 \text{ м}^2$$

Ответ: максимальная мощность потока $\sqrt{1.13} = 1.06 \text{ м}$

Влияние флюидной фазы на вязкость магмы



$$\eta_{magma} = \eta_{melt} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_0} \right)^{-5/2}$$



ϕ (об. доля) – количество пузырьков в магме (лаве)
 ϕ_0 (об.доля) – максимально возможное количество пузырьков. В случае плотнейшей упаковки, $\phi_0 \sim 0.6$

Пена имеет гораздо большую вязкость, чем вода

Свободная флюидная фаза увеличивает вязкость магмы (но не магматического расплава).

Кристаллы также увеличивают вязкость магмы (но не магматического расплава).

Влияние кристаллов на вязкость магмы

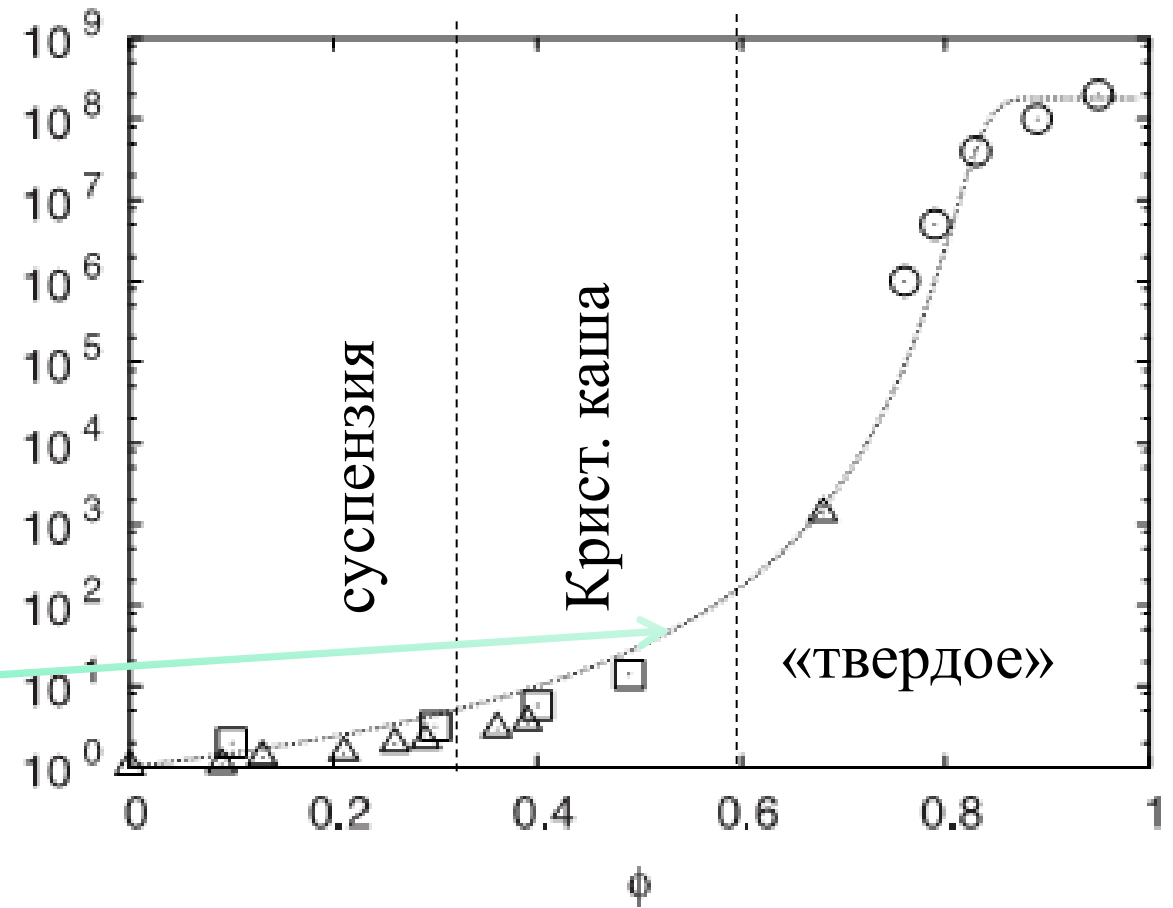
Для идеально круглых кристаллов: $\eta_{magma} = \eta_{melt} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_o} \right)^{-5/2}$



1075°C



η



Другие истории магмы: почему существуют разные типы извержений?



Гавайский тип



Стромболианский тип



Плинианский тип

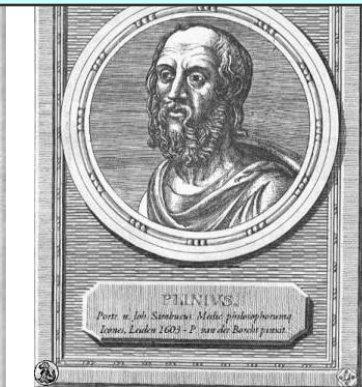


Пелейский тип

Что случилось в Помпеях в 79 г. н.э.?



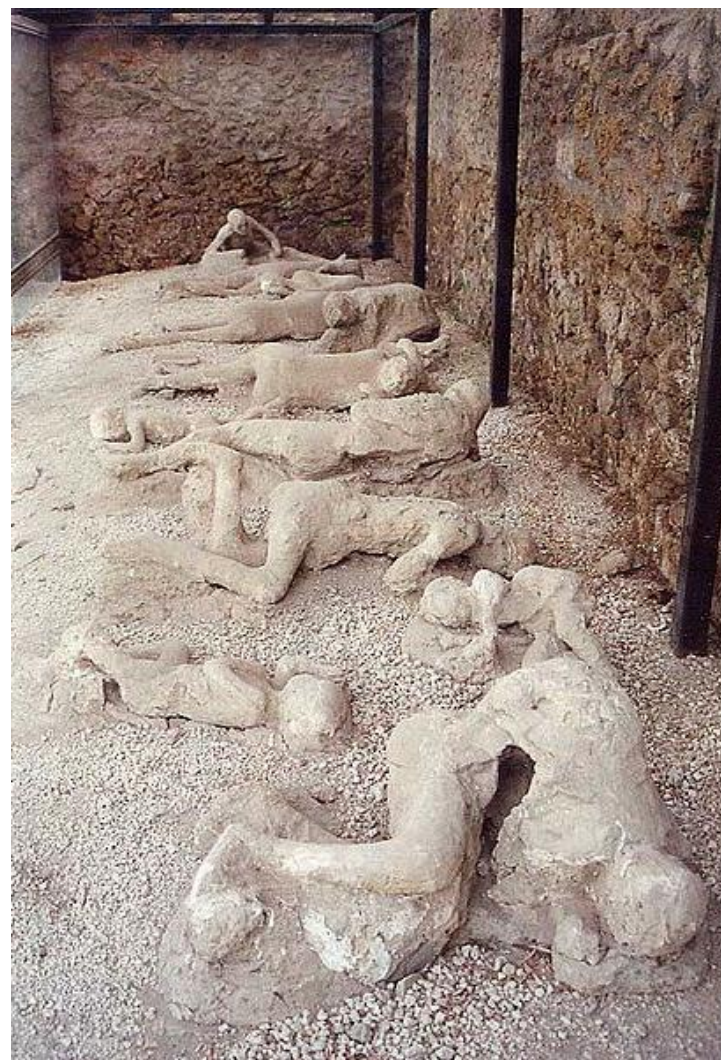
Плиний Старший
(23 –79, 25 авг.)



Плиний Младший
(61/63 –ок. 113)

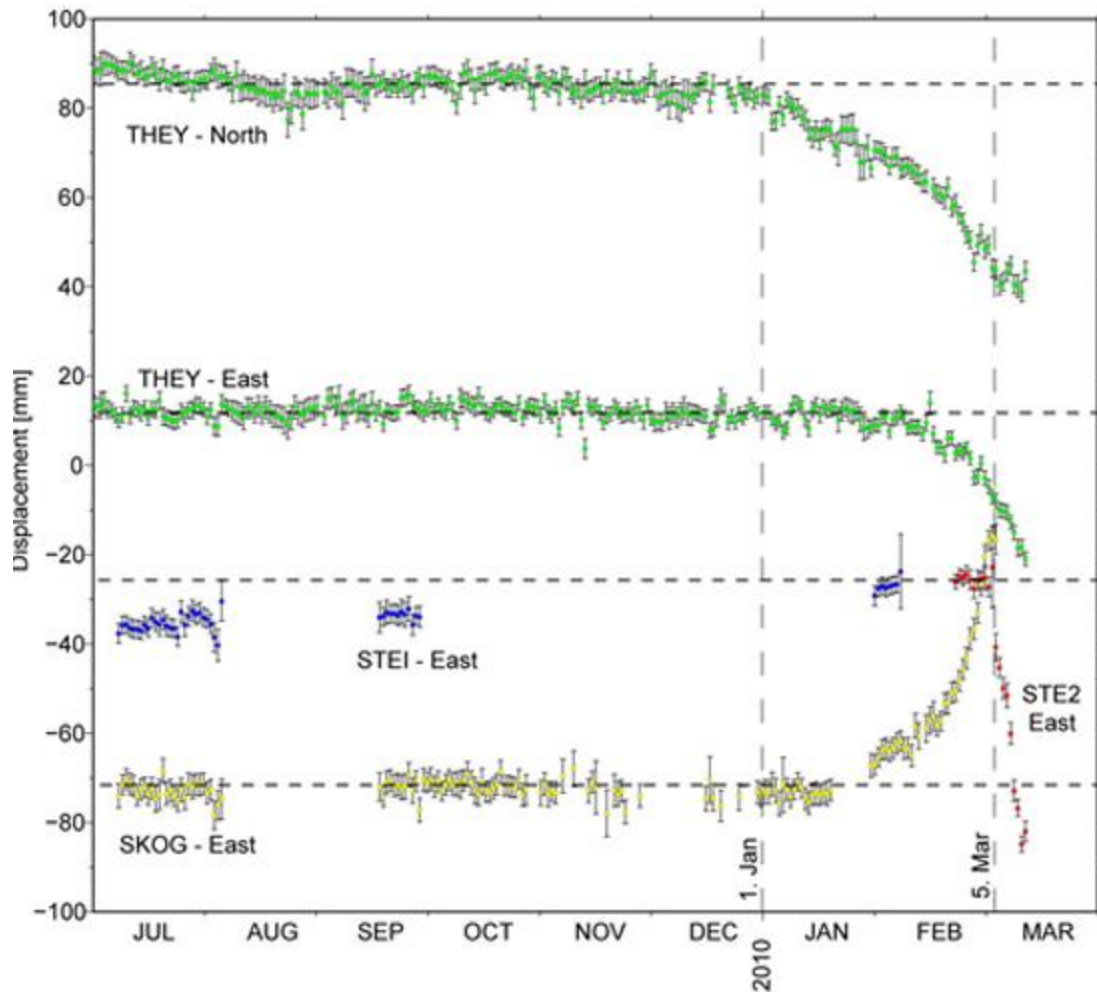


Извержение Везувия,
24-25 авг. 79 г.



Карл Брюлов «Последний день Помпеи»

Как прогнозировать извержения?

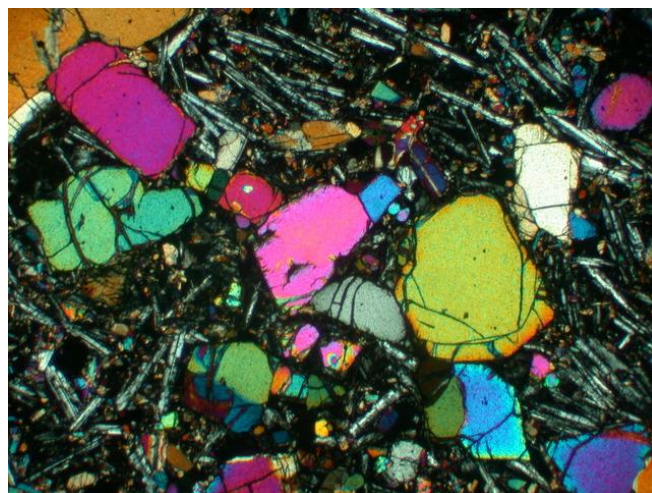
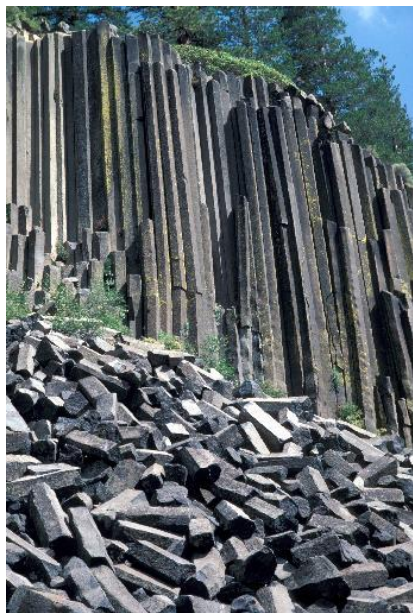


Результаты GPS измерений
в 2009-2010 гг

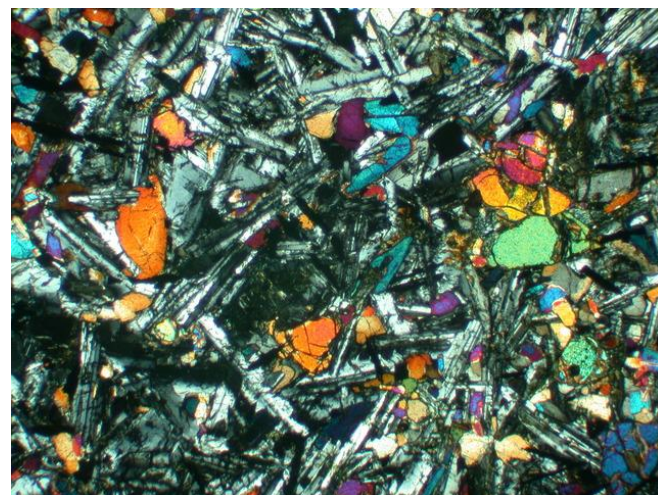


Sigrún Hreinsdóttir

Как образуется столбчатая отдельность?



East Lomond, Шотландия



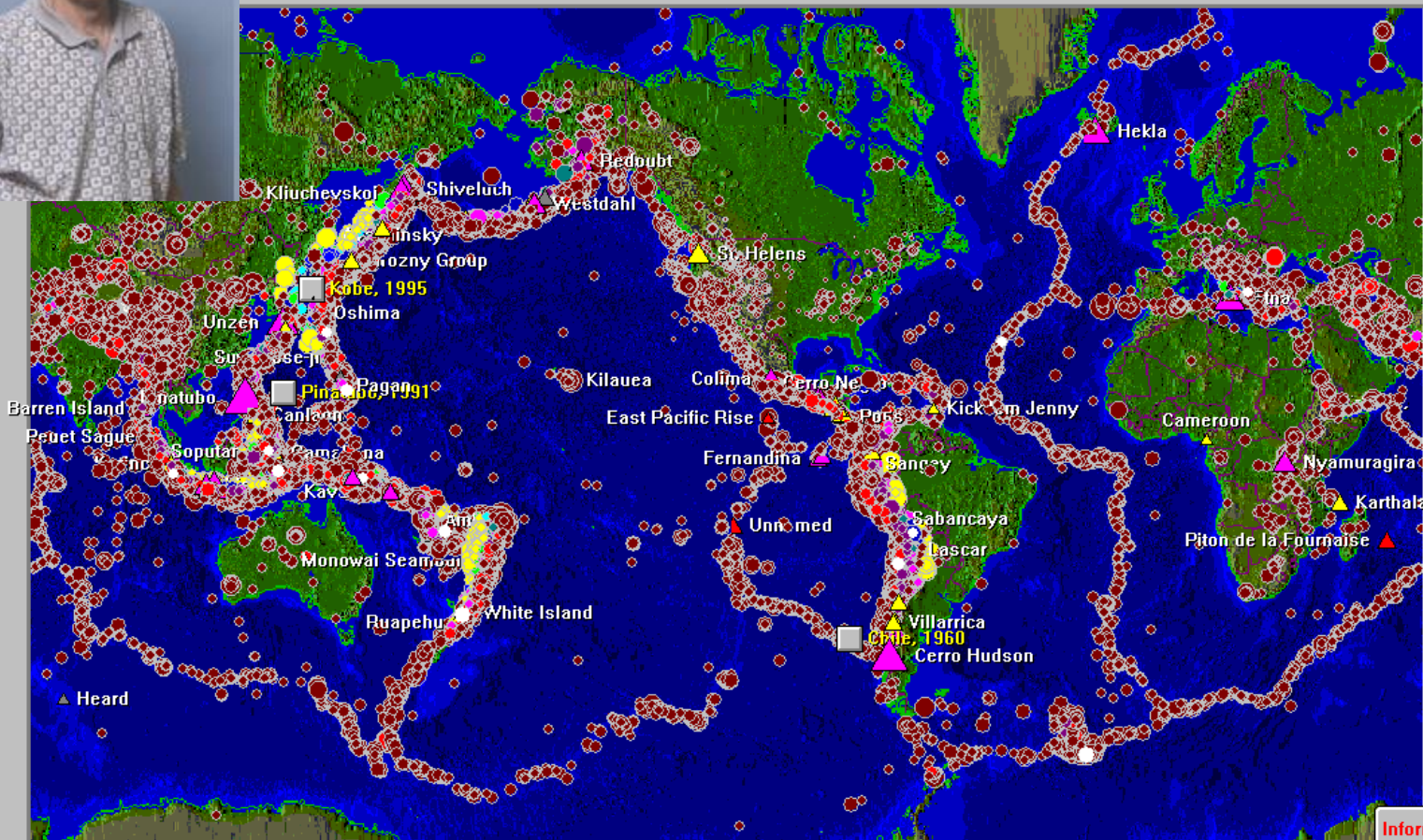
Drumcarrow Craig, Шотландия

Связь землетрясений и извержений

Alan L. Jones,
Purdue University

Скачать программу:
<http://bingweb.binghamton.edu/~ajones/>

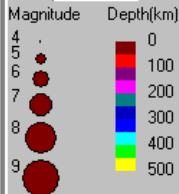
World Earthquakes & Volcanic Eruptions, 1960 to present



Key

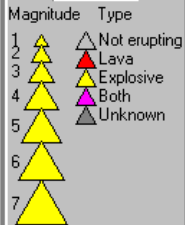
Earthquakes

57906



Eruptions

405



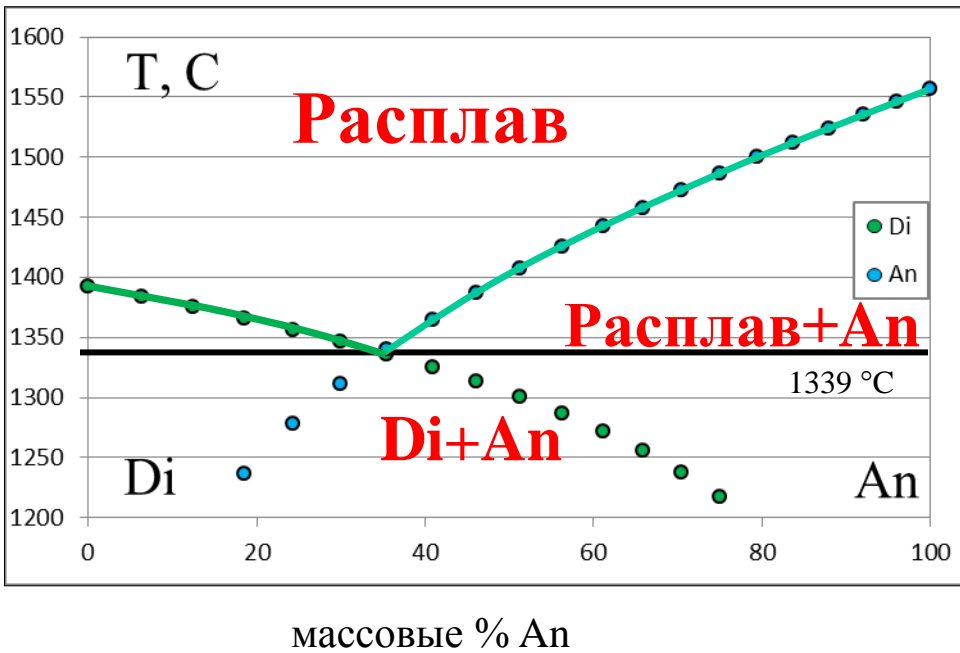
Information

Play Rew **1992 Jun 23** FFwd Repeat Pause Fast! EQ Cutoff Earthquakes Eruptions

Back 1959 Dec 31 Step Step 2009 Feb 04 EQ Cutoff 3.0 Eruption Cutoff 1

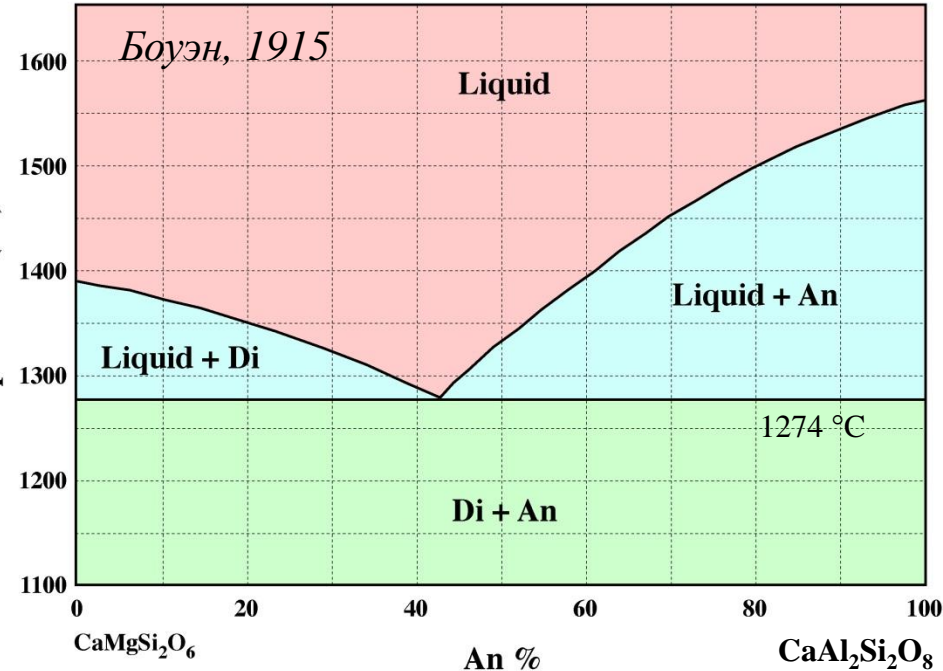
Plates

По каким законам кристаллизуется магма?



Расчетная диаграмма плавкости Di-An

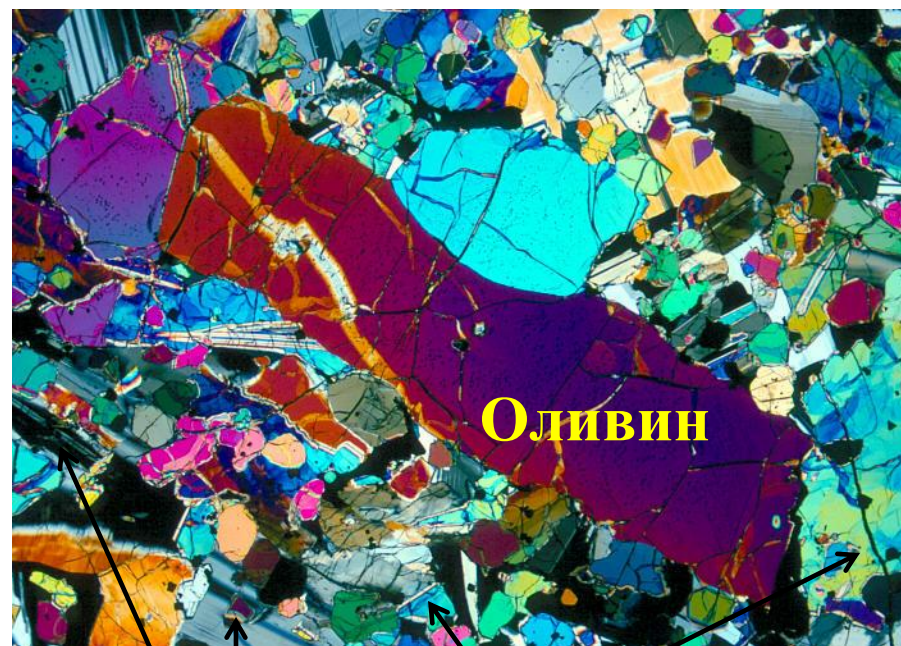
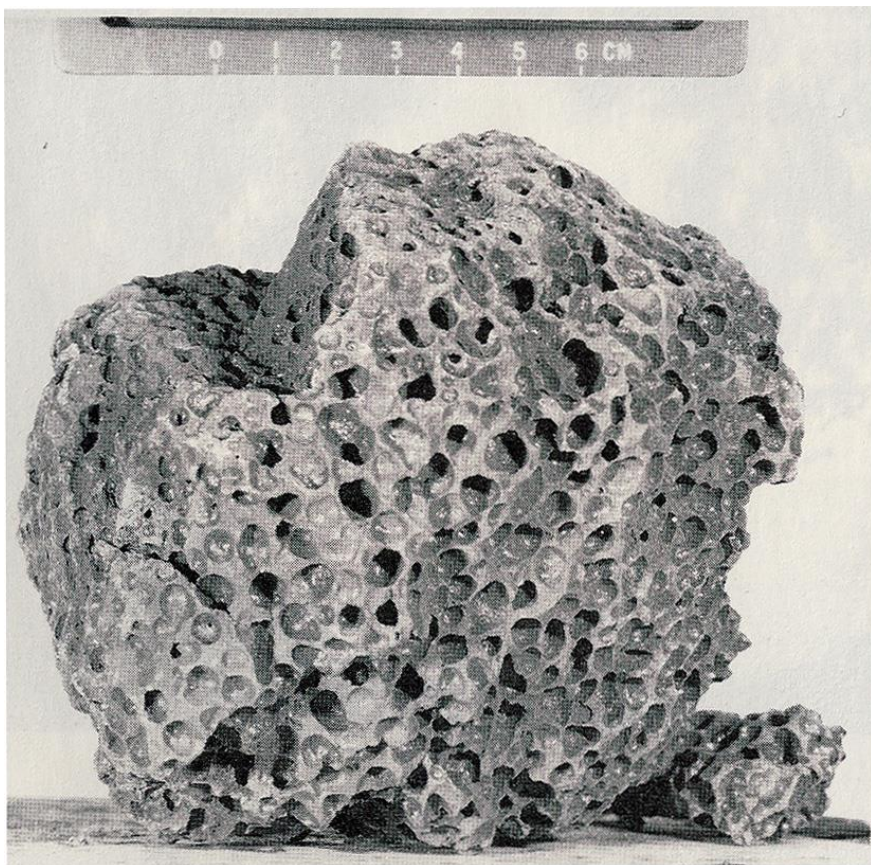
$$T = \frac{\Delta H_m}{\Delta S_m - R \ln(x_S^L)}$$



Экспериментальная диаграмма Di-An

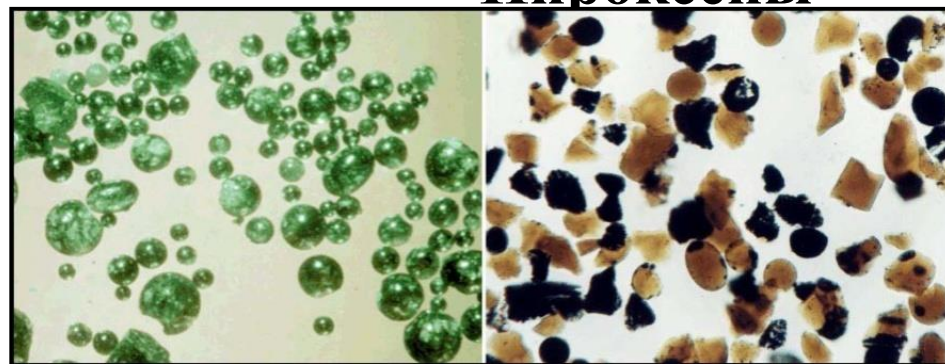
$$T = \frac{\Delta H_m}{\Delta S_m - R \ln(\gamma x_S^L)}$$

Как ведет себя магма на Луне и других планетах?



Плагноклаз

Пироксены



Реголит – лунная почва

Лунные базальты отличаются от земных. Считается, что на Земле такие породы были в самом начале, но не сохранились

Как изучать свойства магмы?

