

Модели взрывного извержения. (10.04.2009)

- Насыщенные и перенасыщенные расплавы, гомогенная и гетерогенная нуклеация пузырьков, диффузия летучих.
- Динамика роста одиночного пузырька.
- Фрагментация магмы.
- Зависимость расхода магмы от давления в очаге.
- Влияние утока газа в стенки канала и его фильтрации сквозь магму.
- Переход между взрывными и экструзивными фазами извержения.

МЕЛЬНИК ОЛЕГ ЭДУАРДОВИЧ

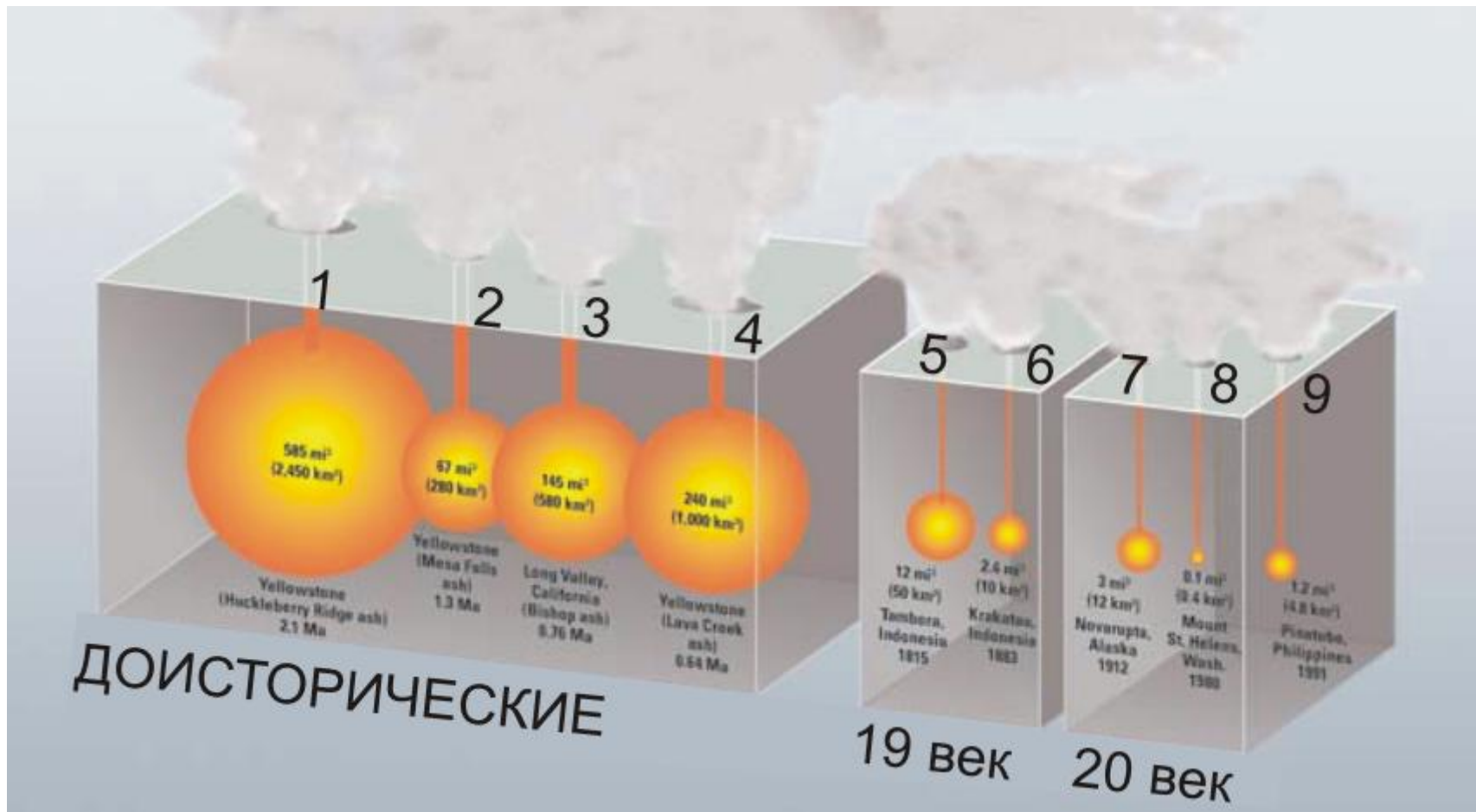
ТЕЛ 939-5476, EMAIL: MELNIK@IMEC.MSU.RU

Страница курса в Интернете:

[http://wiki.web.ru/wiki/Геологический факультет МГУ:Вулканология](http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Вулканология)



Крупнейшие извержения



1,2,4 – Йелоустон (2.1 МЛ, 2450 км³, 1.3 МЛ, 280 км³, 0.64 МЛ, 1000 км³) 3 – Лонг Велли кальдера (0.96 МЛ -580 км³)

5 – Тамбора (1815, 50 км³), 6 – Кракатау (1863, 10 км³)

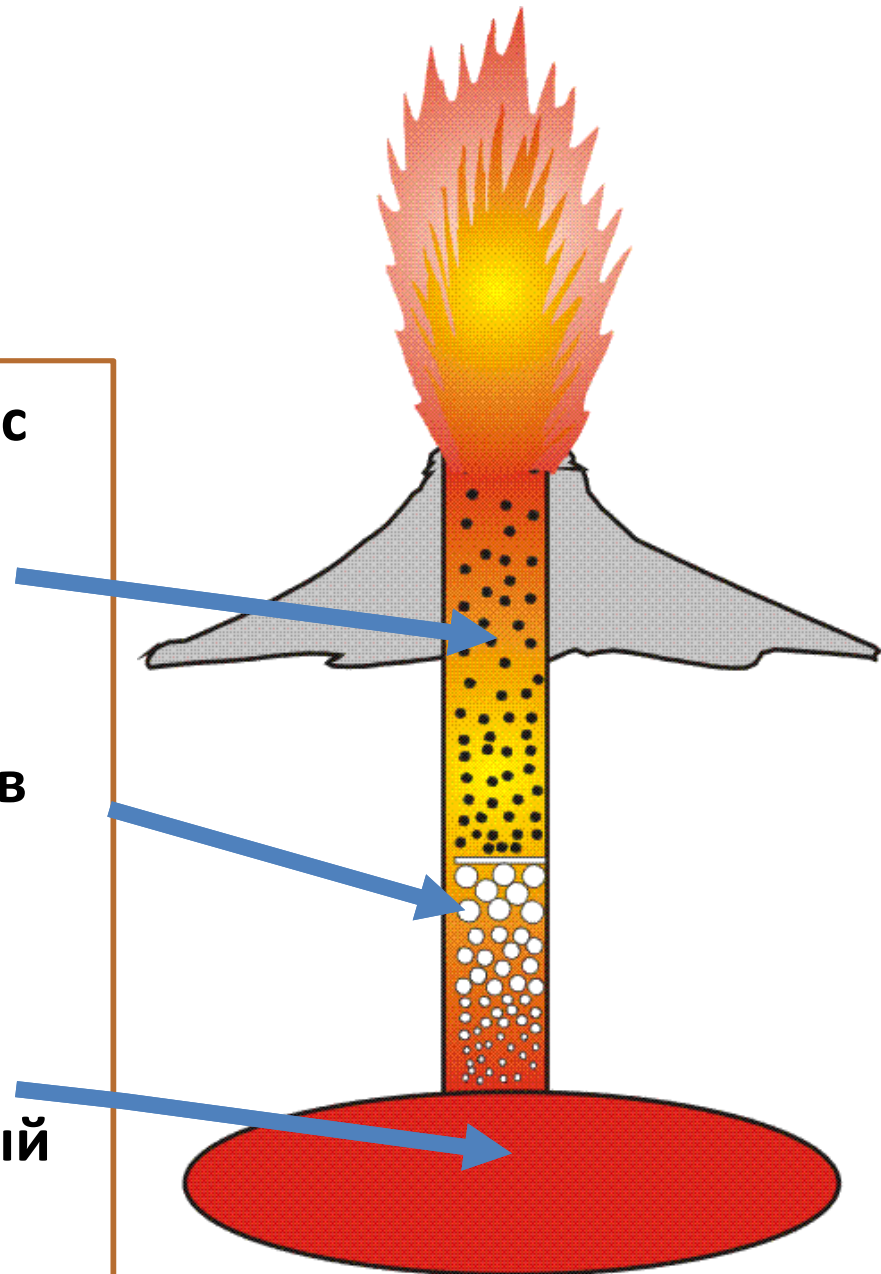
7 – Новарупта (1912, 12 км³), Маунт Ст Хеленс (1980, 0.4 км³), Пинатубо (1991, 4.8 км³)

Эксплозивный режим

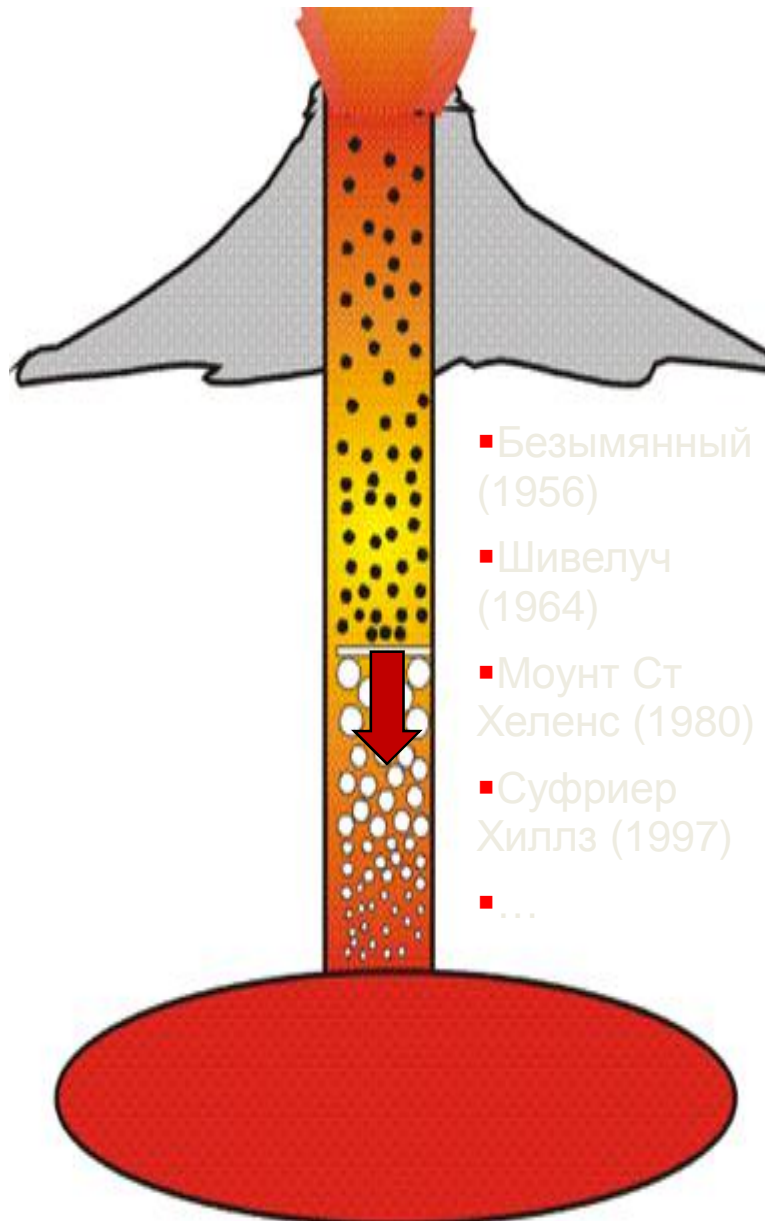
Газовзвесь: сопротивление и вес малы, до и сверх-звуковые скорости.

Пузырьковая жидкость: большая вязкость, рост пузырьков за счет дегазации, слияние, фильтрация газа.

Очаг: Резервуар содержащий расплав, кристаллы, растворенный газ.



Моделирование взрывного извержения

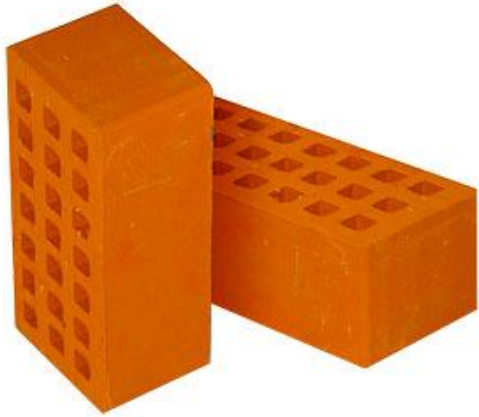


- Безымянный (1956)
- Шивелуч (1964)
- Моунт Ст Хеленс (1980)
- Суфриер Хиллз (1997)
- ...

Течение газозвеси

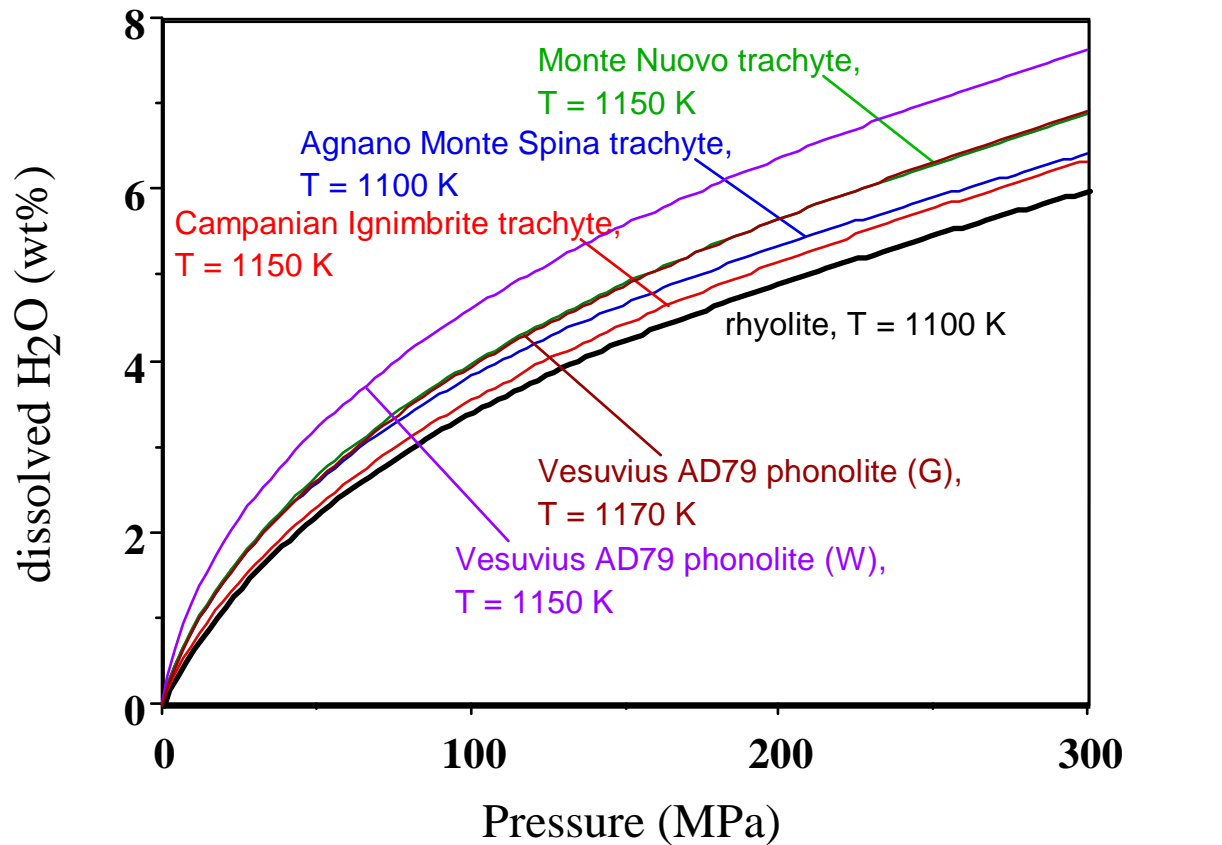
Условия фрагментации

Течение пузырьковой жидкости



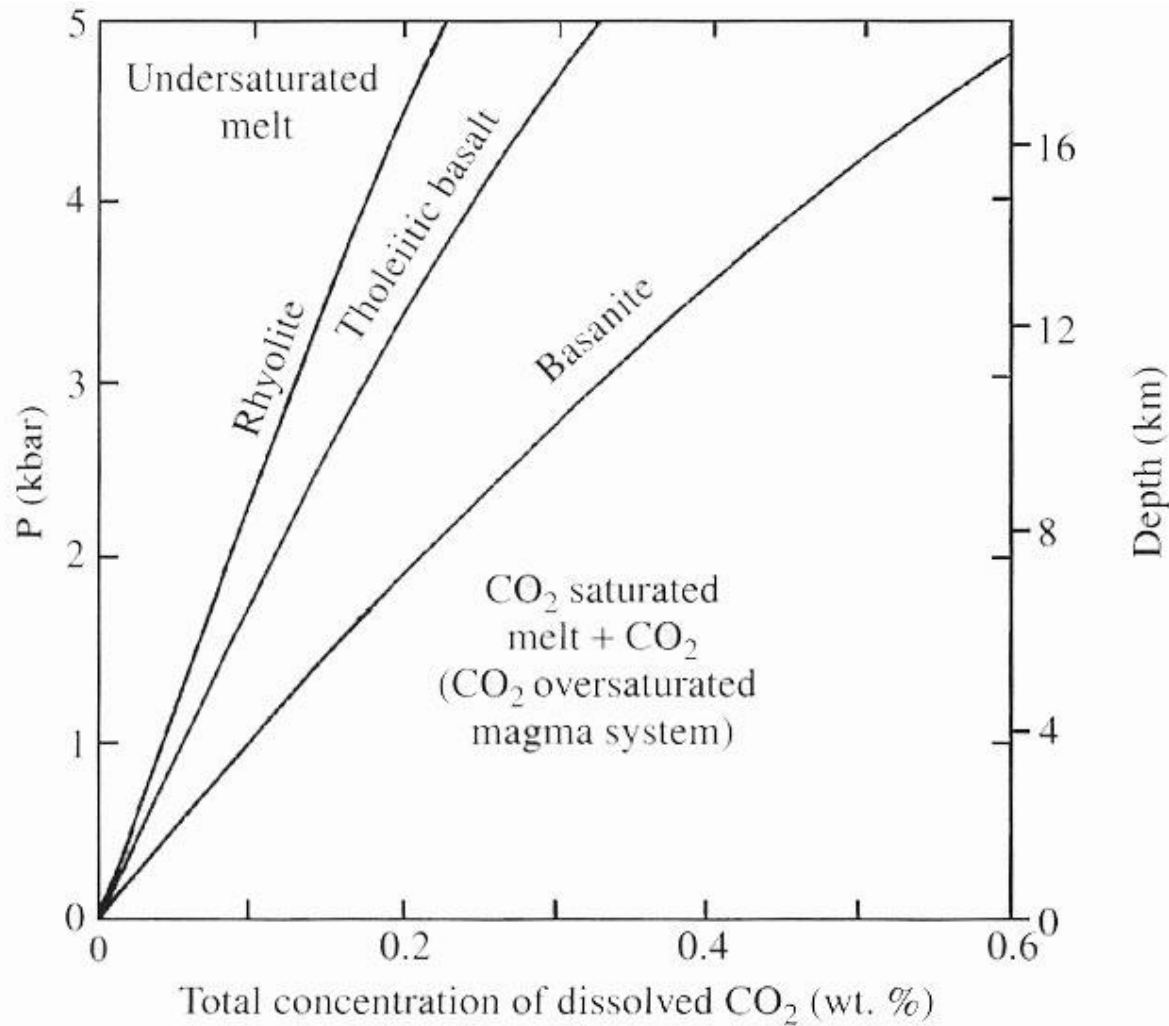
Кирпичики модели

- Растворимость воды в силикатных расплавах:
 $X = C p^n$
 $n \sim 0.5$,
C (состав)

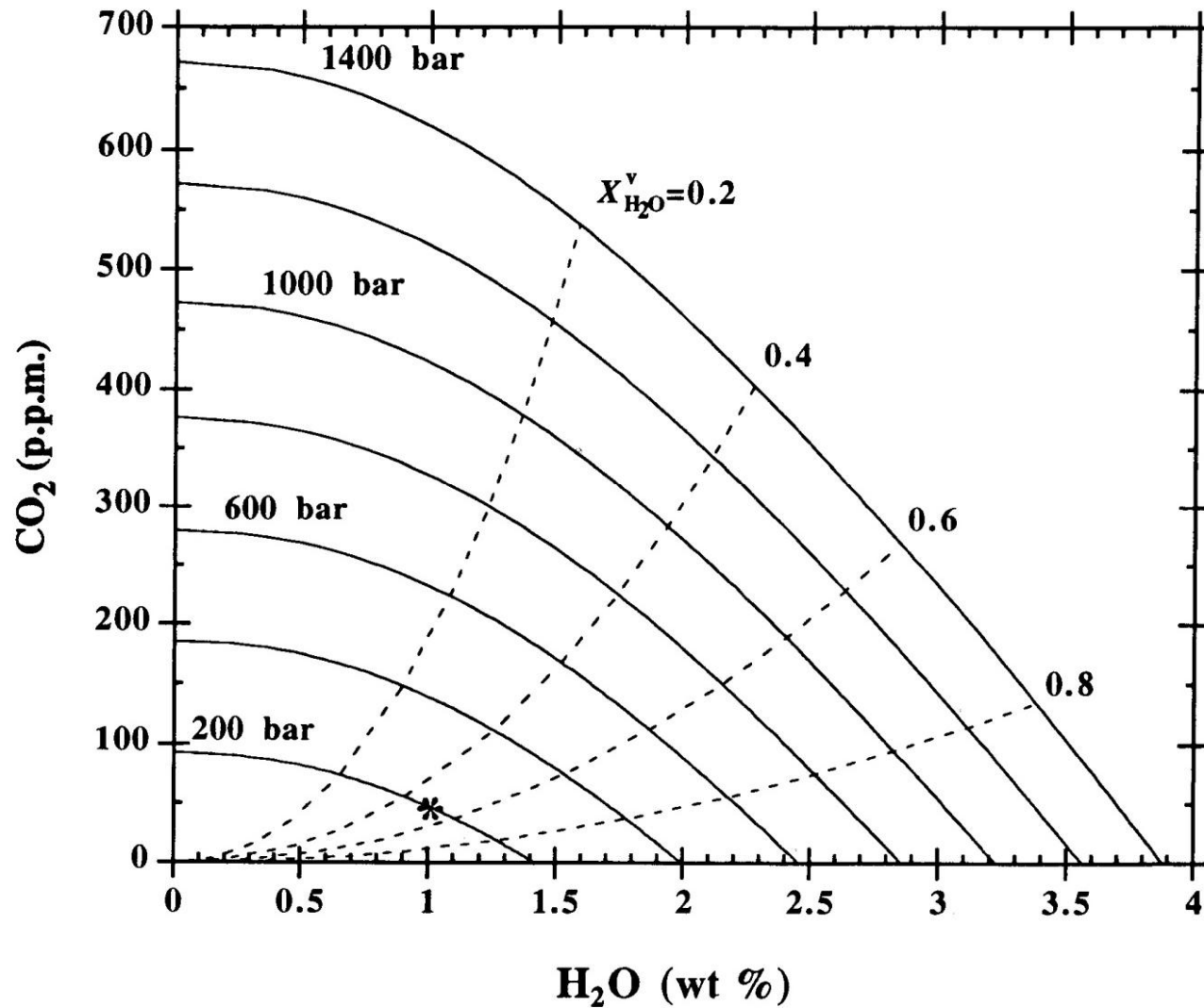


After Papale, 1997

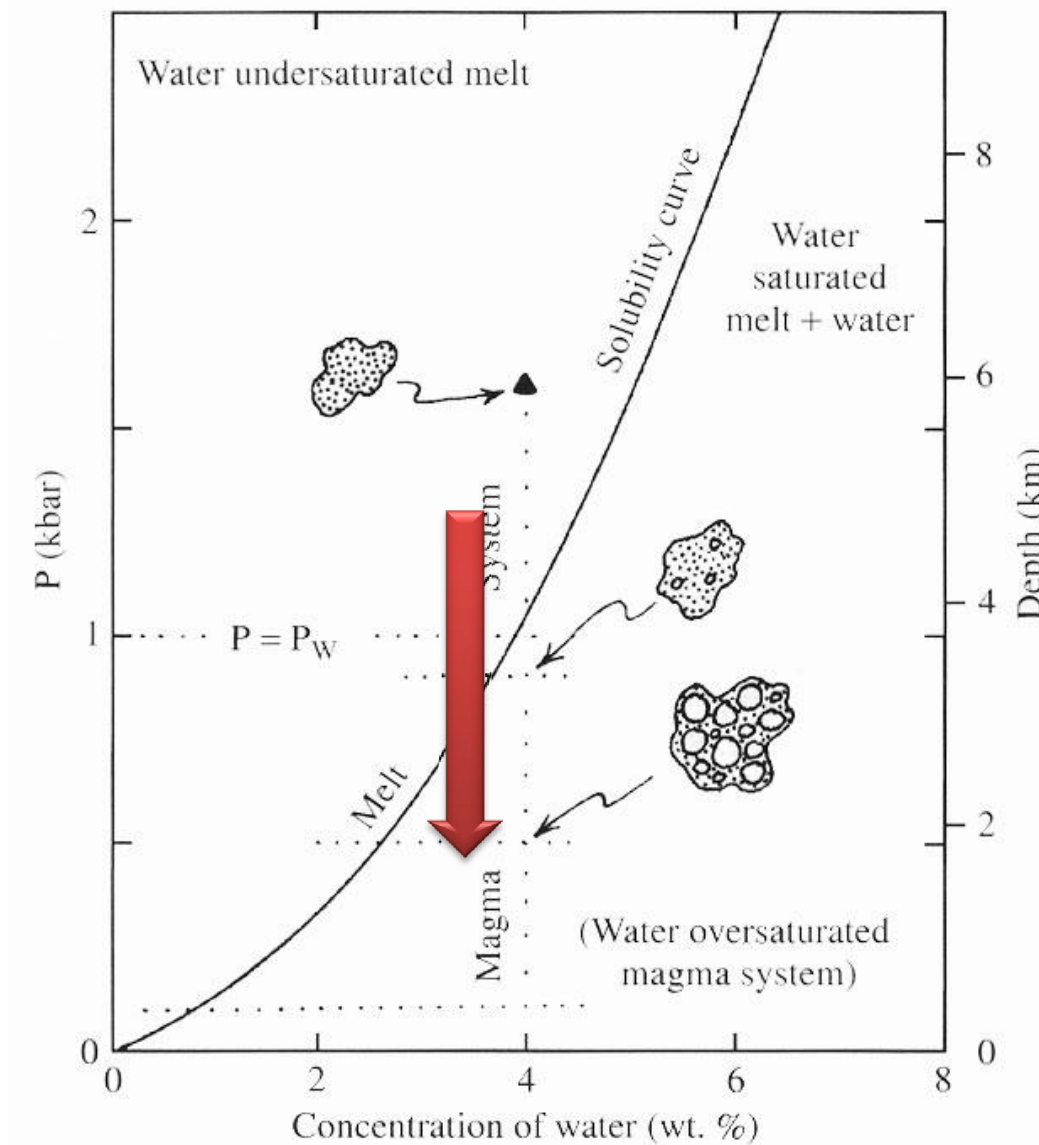
Растворимость CO₂



Система $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

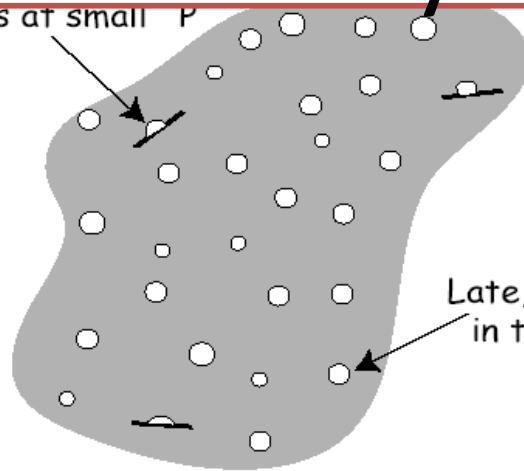


Нуклеация пузырьков



Гомогенная и гетерогенная нуклеация

on crystals at small P



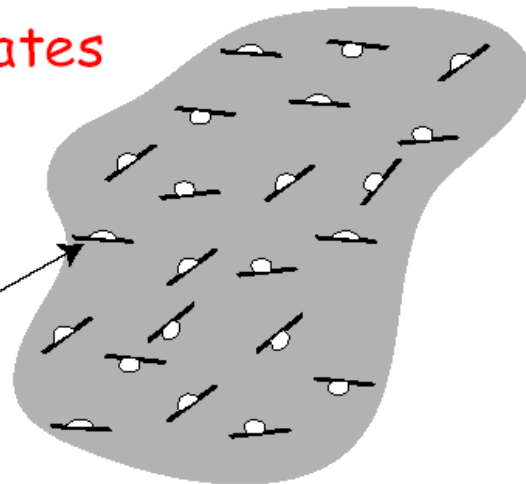
Crystallinity (cryptic sites)
 $< 10^4 / \text{cm}^3$

Late, homogeneous nucleation
in the bulk melt at large P

Heterogeneous Mechanism Dominates

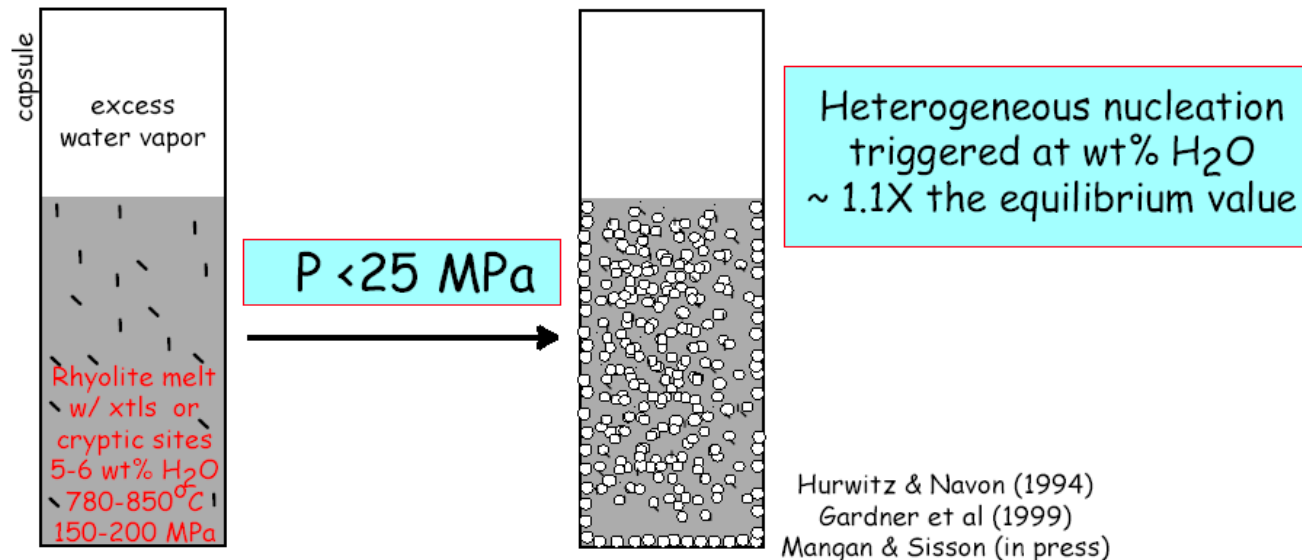
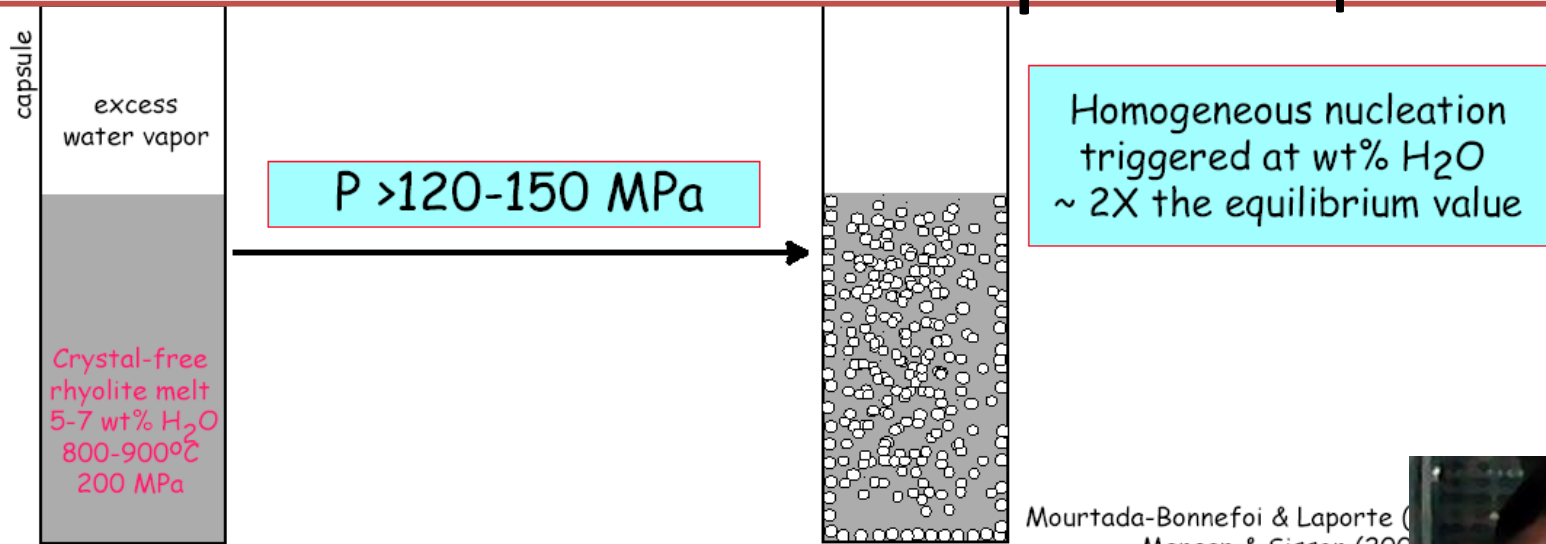
Crystallinity (cryptic sites)
 $> 10^6 / \text{cm}^3$

Early,
heterogeneous nucleation
on crystals at small P ,
no homogeneous nucleation



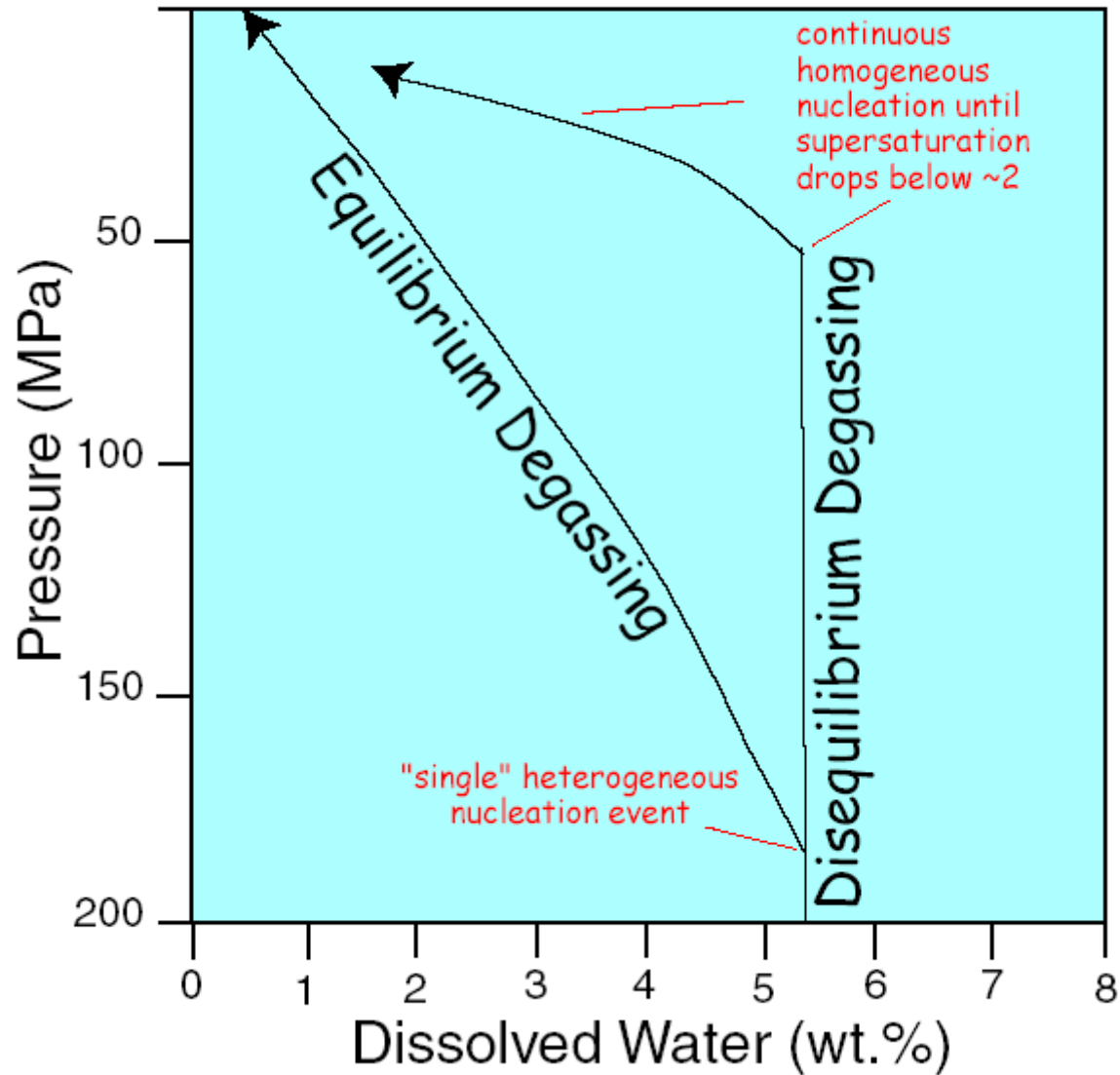
Data of Gardner et al (1999);
Mangan & Sisson (2000; in press)

Гомогенная нуклеация требует очень больших пересыщений



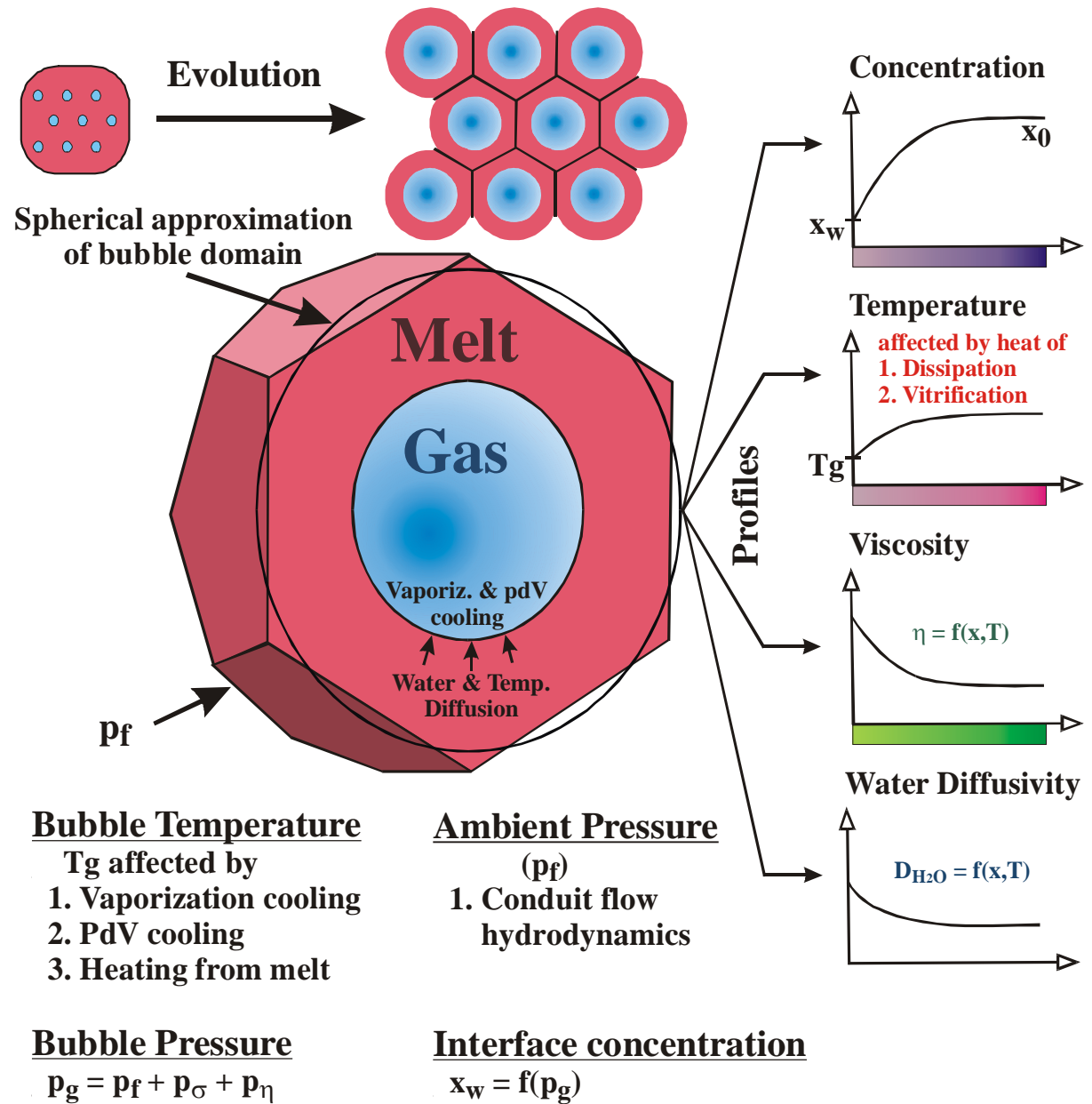
Margaret Mangan

Дегазация магмы

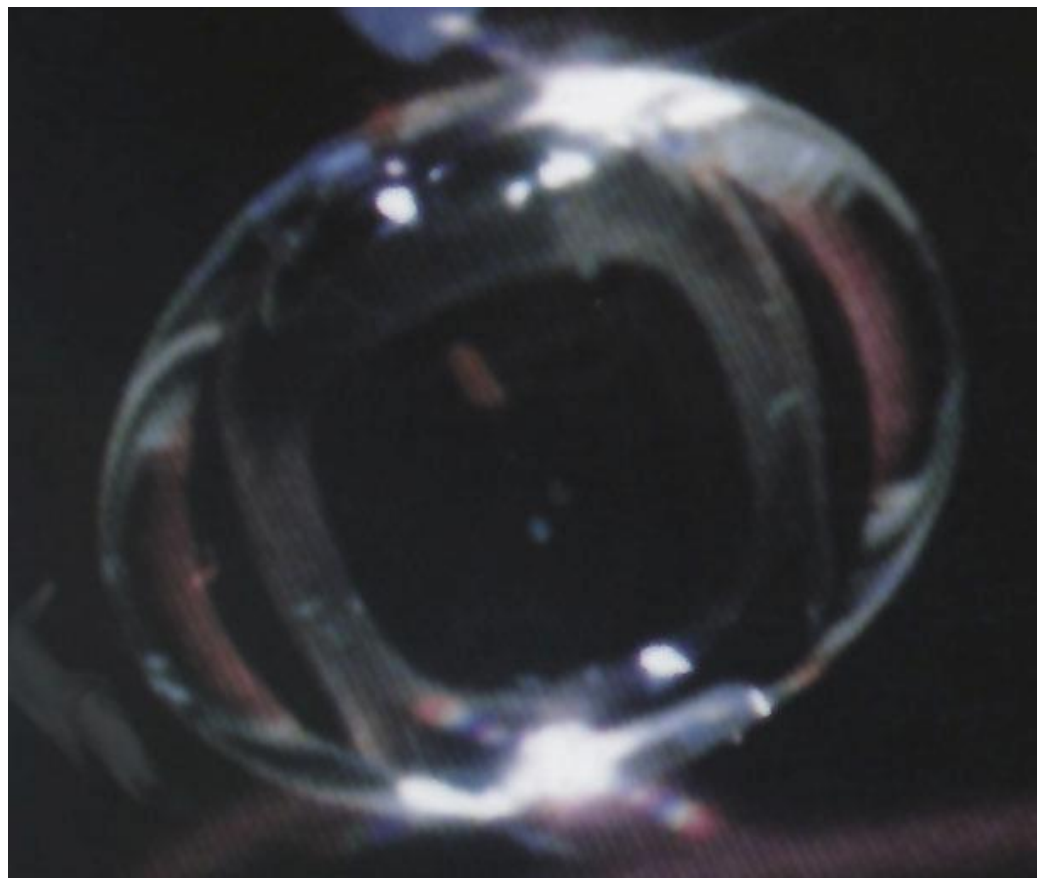




Alex Proussevitch



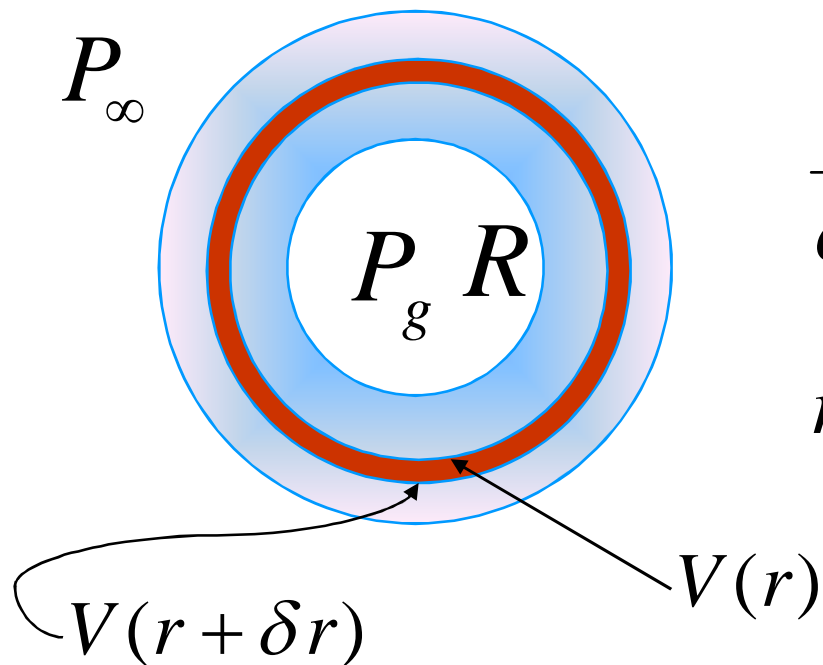
Динамика роста пузырька



Mass conservation

$$4\pi (r + \delta r)^2 V(r + \delta r) = 4\pi r^2 V(r)$$

$$4\pi \cancel{r^2} V(r) + 8\pi r \delta r V(r) + 4\pi r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \delta r - 4\pi \cancel{r^2} V(r) = 0$$



$$\frac{\partial}{\partial r} r^2 V = 0 \Rightarrow r^2 V = f(t)$$

$$r = R : V = \dot{R} \Rightarrow V = \frac{R^2 \dot{R}}{r^2}$$

Уравнения импульсов

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial V}{\partial r} - 2 \frac{V}{r^2} \right)$$

$$V = \frac{R^2 \dot{R}}{r^2} \Rightarrow \rho \left[2 \left(\frac{R}{r^2} - \frac{R^4}{r^5} \right) \dot{R} + \frac{R^2}{r^2} \ddot{R} \right] = - \frac{\partial p}{\partial r}$$

Решим и подставим $r = R$

$$p(R) = \rho \left(\frac{3}{2} \dot{R}^2 + R \ddot{R} \right) + p_\infty(t)$$

На границе пузырька и ЖИДКОСТИ

$$-p_g = \tau_{rr} = \left(-p + 2\mu \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{2\sigma}{r} \right) \Big|_{r=R}$$

Окончательно имеем

$$p_g - p_\infty(t) = \frac{2\sigma}{R} + \rho \left(\frac{3}{2} \dot{R}^2 + R\ddot{R} \right) + 4\mu \frac{\dot{R}}{R}$$

Малые члены

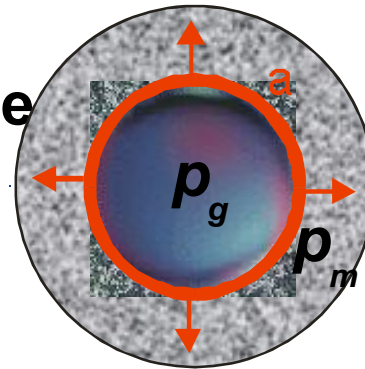


Rayleigh, John William
Strutt (1842-1919)

Модели фрагментации магмы

► Фиксированная объемная доля пузырьков (Спаркс 1978).

► Критическое Избыточное давление в растущем пузырьке (Бармин, Мельник, 1993)



$$p_g - p_m = \frac{4\mu_m}{R} \frac{dR}{dt} +$$

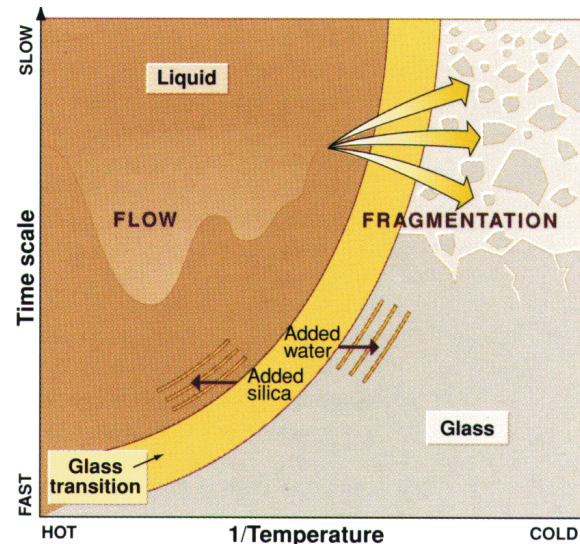
~~$$2\frac{\sigma}{R} + \rho \left(\frac{3}{2} \dot{R}^2 + \ddot{R}R \right)$$~~

Малые члены

Критическая скорость

► растяжения
Parale P, 1999

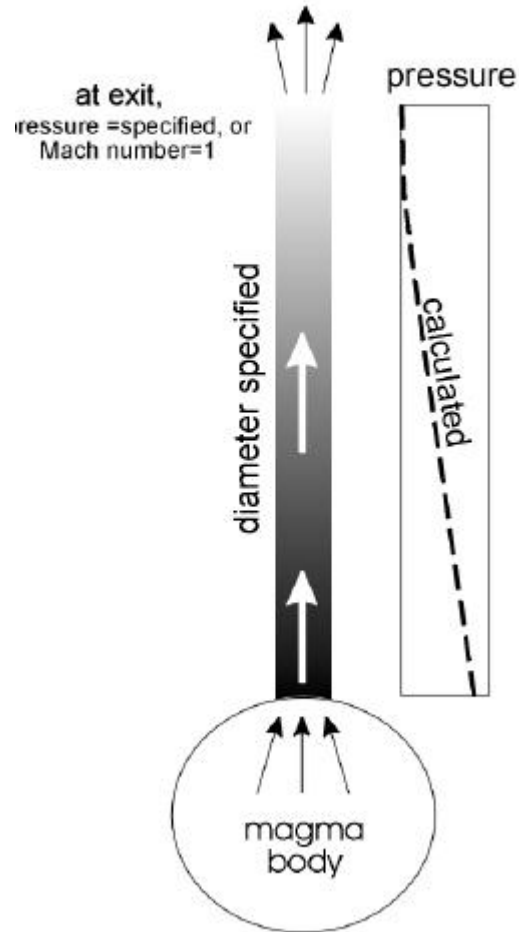
$$\frac{dv_z}{dz} > k \frac{1}{\tau}$$



Гидростатический или литостатический градиент давления?

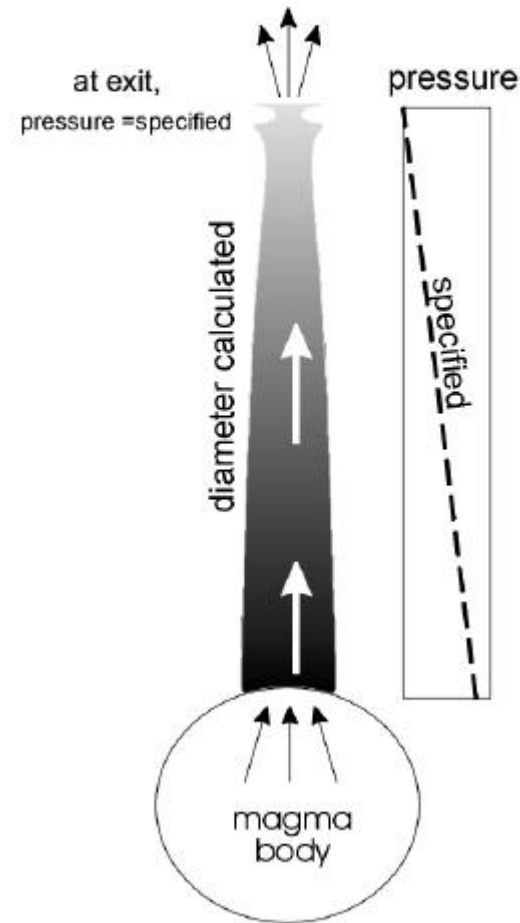
Option 1

specified conduit diameter
program calculates pressure profile

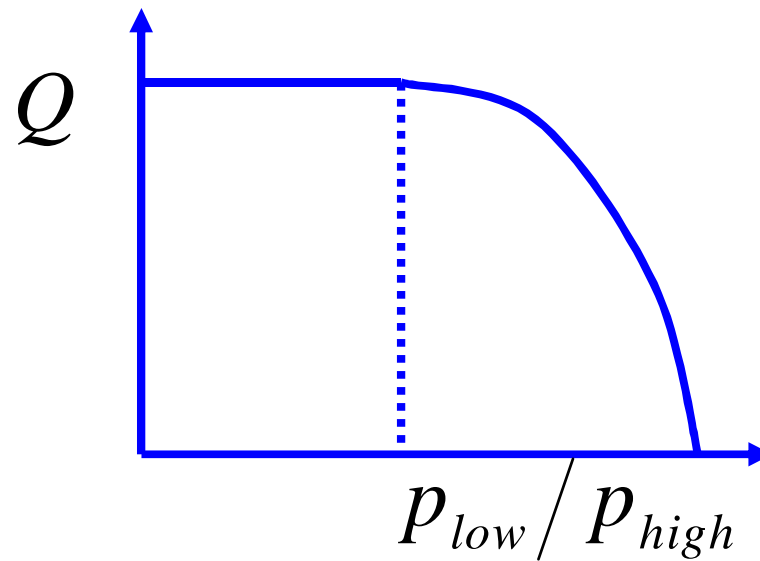
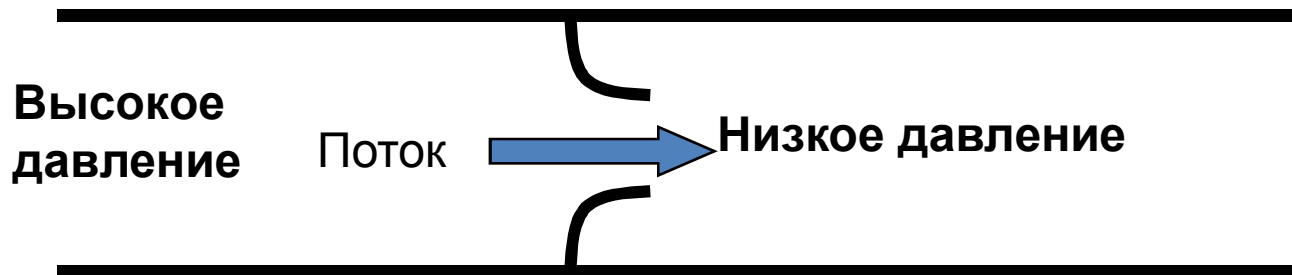


Option 2

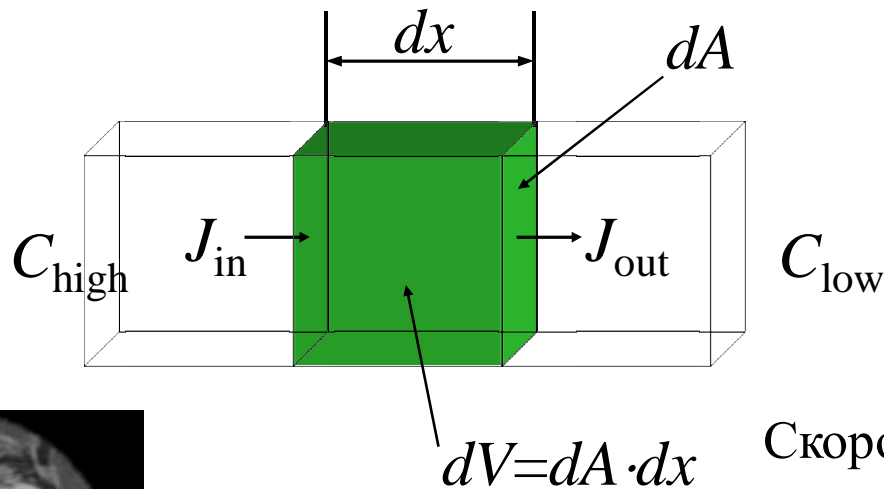
specified pressure gradient
program calculates conduit geometry



Условие записания

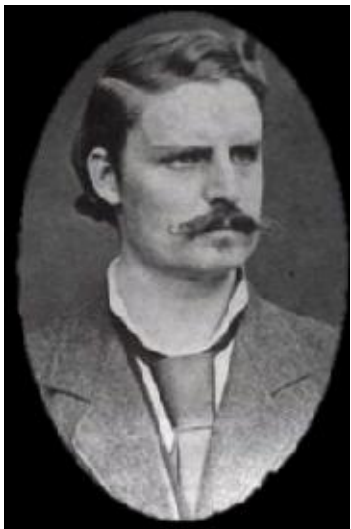


Диффузия, закон Фика $J_m = -D_m \text{grad}(c)$



$$\frac{\partial C}{\partial t} dV = (J_{in} - J_{out}) dA$$

Скорость изменения концентрации атомов в объеме dV = Скорость притока – скорость оттока



Adolf Eugen Fick
(1829-1901)

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= (J_{in} - J_{out}) \frac{dA}{dV} = -\frac{\partial J}{\partial x} \\ &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \end{aligned}$$

\Rightarrow

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Диффузионный рост пузырька

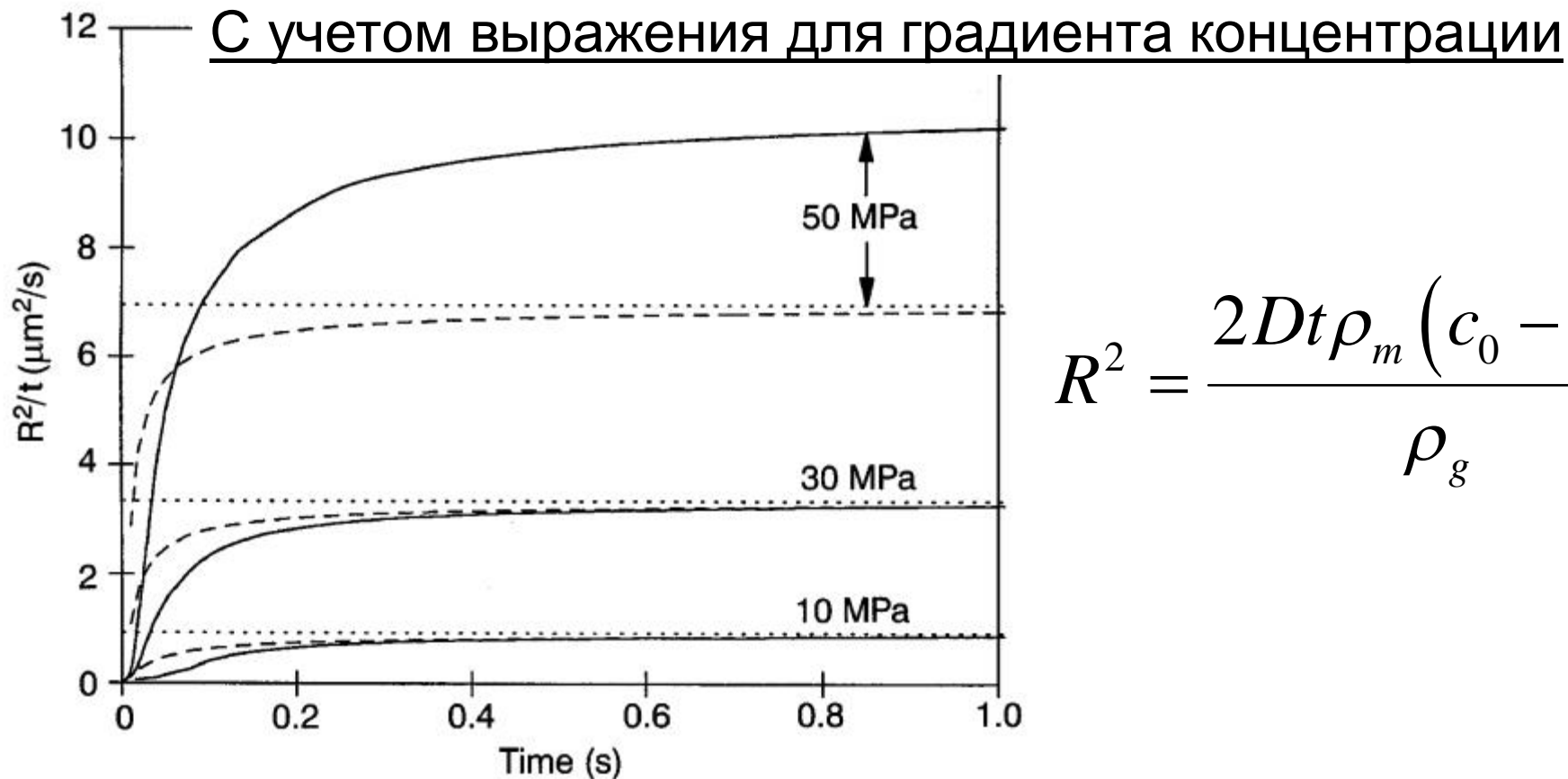
$$\cancel{\frac{\partial C}{\partial t} + v_r \frac{\partial C}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right)}$$

В случае большого коэффициента диффузии

$$\left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_R = \frac{C_0 - C_R}{R}$$

Закон сохранения массы для одного пузырька

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi \rho_g R^3 \right) = 4 \pi R^2 \rho_m D \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_R$$



$$R^2 = \frac{2Dt\rho_m (c_0 - c_f)}{\rho_g}$$



Простейшая модель

$$\frac{d}{dz} \rho V = 0 \Rightarrow \rho V = Q = \text{const}$$

$$\rho V \frac{dV}{dz} = -\frac{dp}{dz} - \rho g - f_c$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1-x_g}{\rho_m^0} + \frac{x_g}{\rho_g^0}; \quad x_g = x_0 - C_g \sqrt{p};$$

$$\rho_g^0 = \frac{p}{RT}; \quad f_c = \begin{cases} \frac{32\mu V}{D^2}, & \text{пузырьковая} \\ 0, & \text{газовзвесь} \end{cases}$$

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Z=0 (очаг) : P=P_{ch}

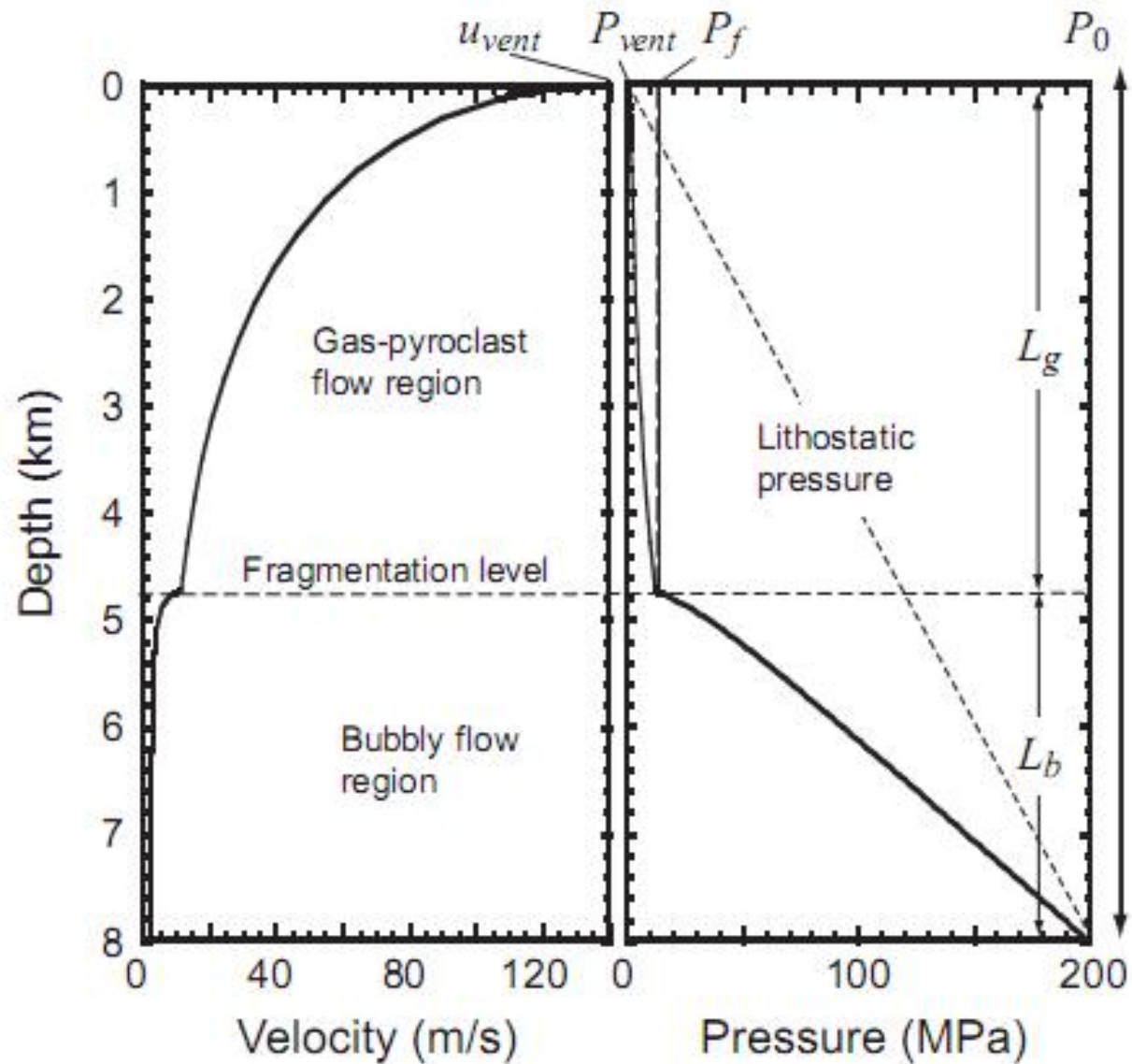
Z=L (атм.) : Условие запирания или атмосферное давление

Z=Z_f (фрагм): $\alpha = \alpha_* \approx 0.7$

Задача – определить расход магмы по перепаду давления

Koyaguchi, T., 2005. An analytical study for 1-dimesional steady flow in volcanic conduits. J. Volcanol. Geotherm. Res. 143, 29–52.

Профили скорости и давления в канале



Современное состояние

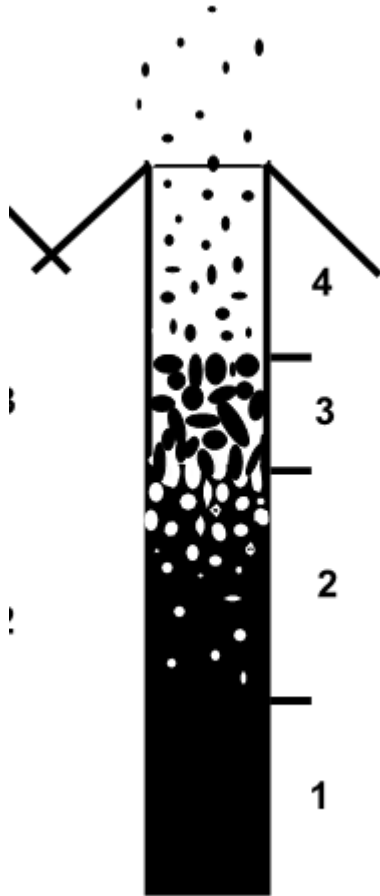


Volcanic eruption mechanisms: Insights from
intercomparison of models of conduit processes

Workshop in Durham, New Hampshire, November 2002

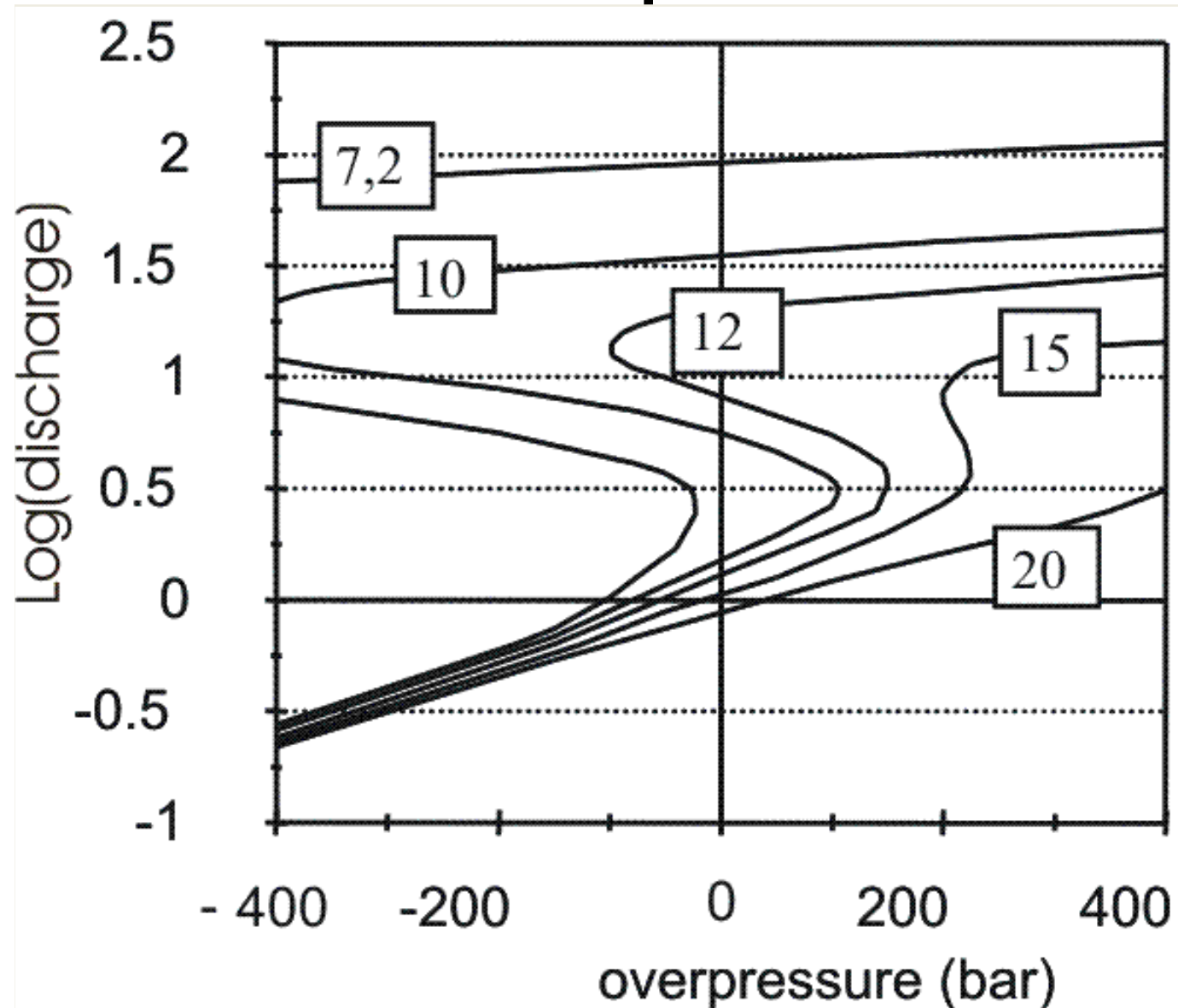
Model	Exit velocity (m/s)	Exit pressure (MPa)	Fragmentation depth (m)	Fragmentation vesicularity	Discharge rate ($\times 10^7$ kg/s)
Conflow	182	6.1	3107	0.64	7.7
Conduit4	gas: 211 particle: 201	2.3	2283	0.83	3.4
Bubbledrive	150 to 450	set at 0.1 MPa	2400	0.8	4.1
Nuclascent	118	0.7	1100	0.735	6.0
Kamchatka	gas: 162–445 particle: 160–227 (mass fraction particles 0.05–0.95)	1.5–4.1	2585	0.73	5.4
CPIUC	169	4.1	2950	0.75	4.8

Учет газоотделения (Слезин, 1983)



- До концентрации пузырьков 70% магма и газ движутся совместно – пузырьковый режим
- Потом высвобождающийся газ движется с большей скоростью, $(u_g - u_l)^2 = \frac{gd_p \rho_l (1 - \beta)}{C_f(\delta) \rho_g}$ как у одиночной частицы в потоке газа
- Как только концентрация «свободного» газа достигает 40% частички магмы перестают связываться друг с другом, возникает газовзвесь

Почему могут быть разные режимы?



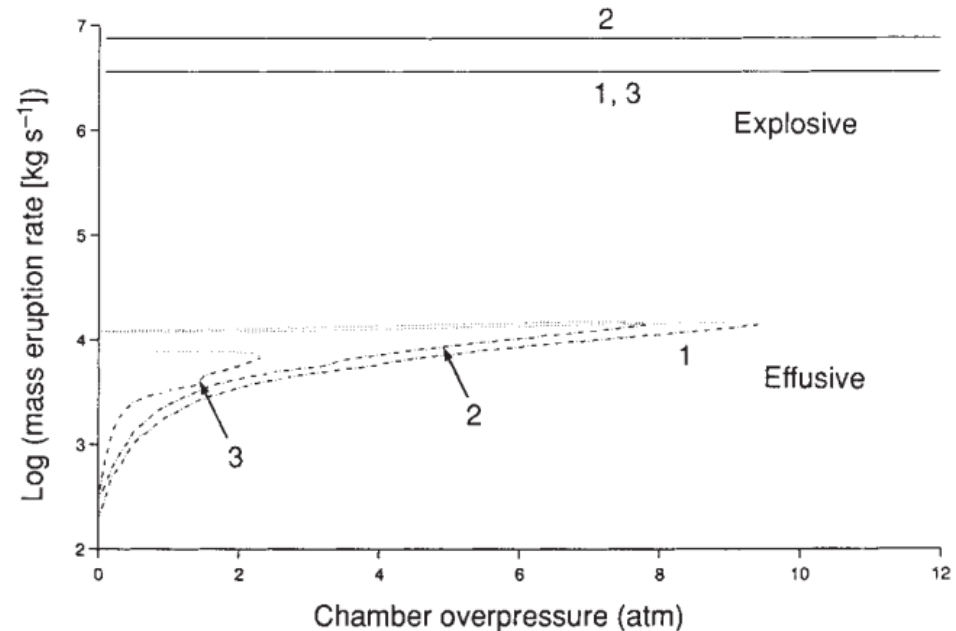
Слезин (1983)



Уток газа в стенки канала

A.W. Woods, T. Koyaguchi (1994) Transitions between explosive and effusive eruptions of silicic magmas. *Nature*, 370: 641-644

- При подъеме магмы происходит фильтрация газа в окружающие породы



$$\frac{d}{dz} \rho V = - Q_w = 2\pi r \rho_w K (p - p_h) / \mu L$$

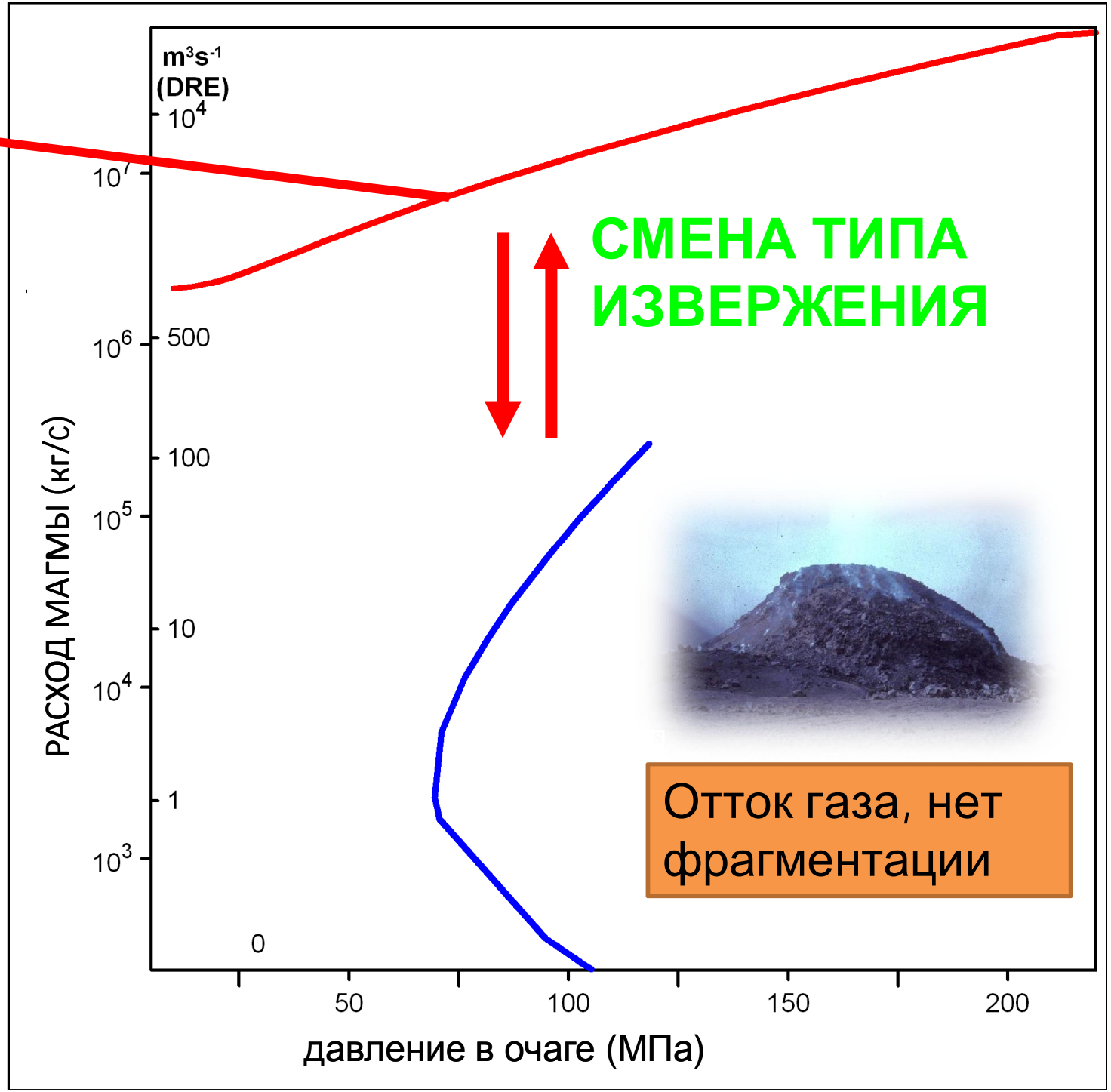
Куда на самом деле девается газ? До сих пор единого мнения нет!

Учет фильтрации и избыточного давления

- Модель учитывает фильтрацию газа по закону Дарси.
- Уравнение Релея-Ламба определяет давление в пузырьках.
- Критерий фрагментации по избыточному давлению.



Малый
отток
газа,
фрагмент
ация



Отток газа, нет
фрагментации

Эксплозивное извержение, вызванное обрушением купола



- Mount St Helens, 18 May 1980

Нестационарная система уравнений

Сохранение массы и числа пузырьков

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g V}{\partial x} = J, \quad \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \frac{\partial \rho_l V}{\partial x} = -J,$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial nV}{\partial x} = 0,$$

Сохранение импульса:

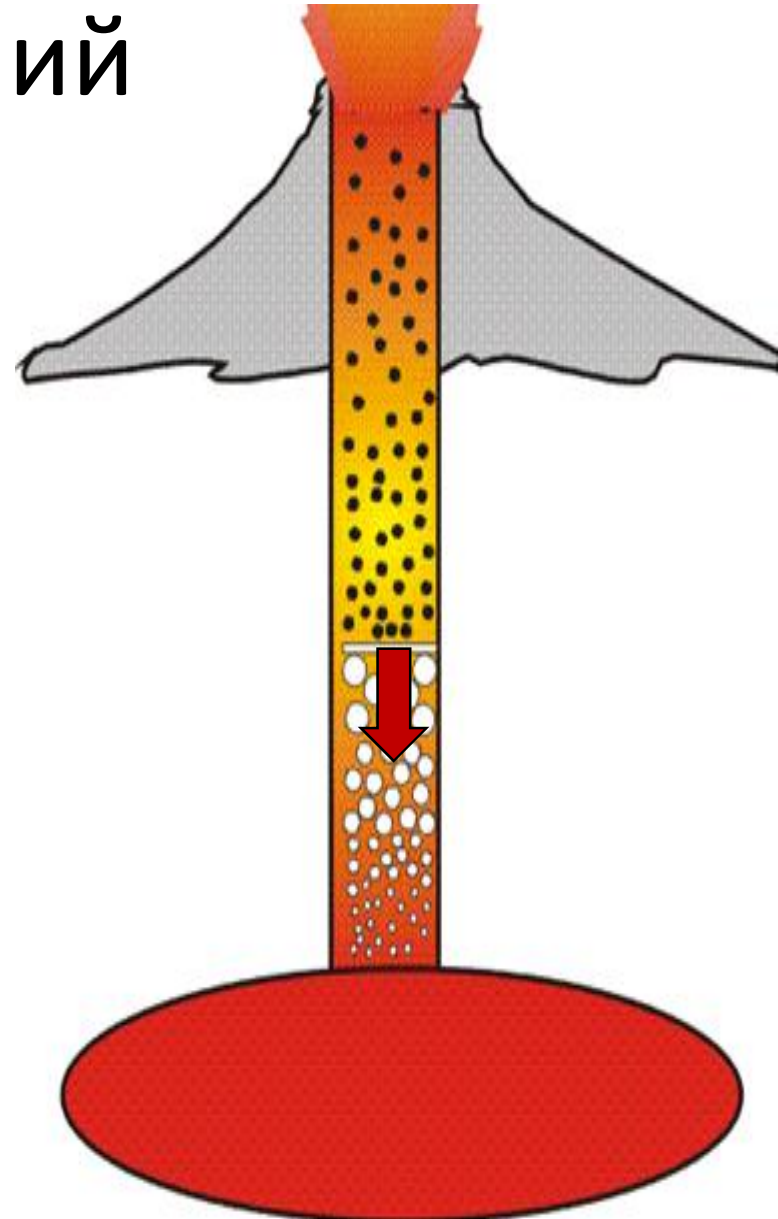
$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p_m}{\partial x} - \rho g - f_c$$

$$p_m = (1 - \alpha) p_l + \alpha p_g$$

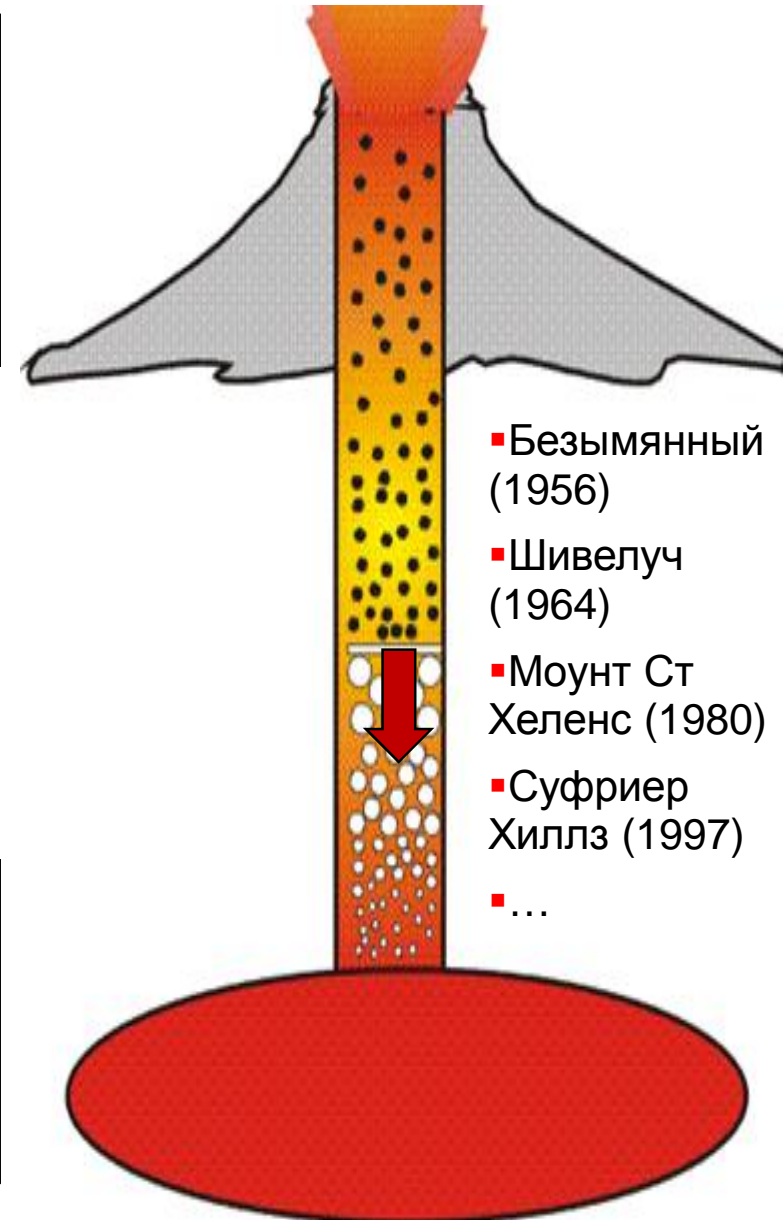
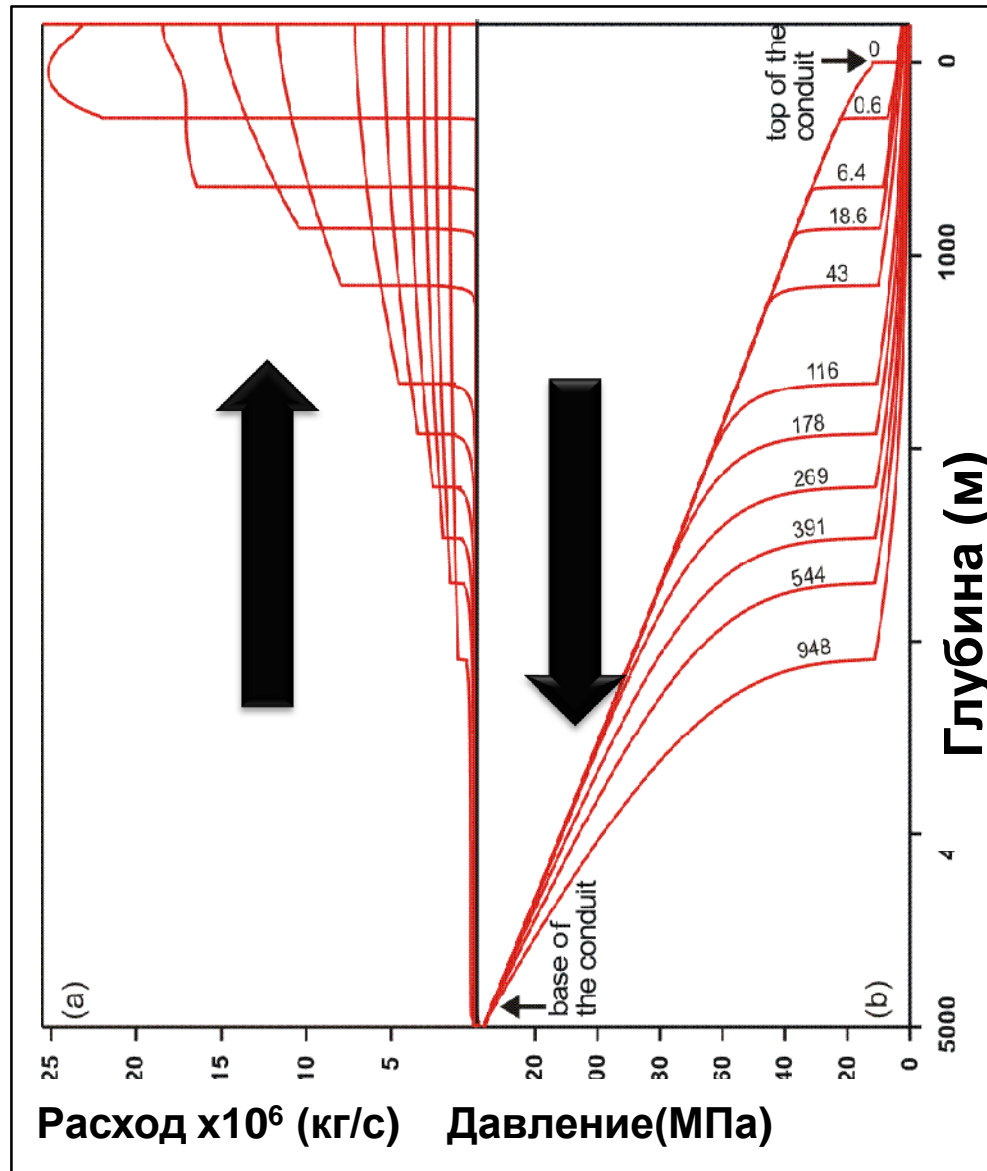
Уравнение Реллея-Ламба

$$\frac{\partial a}{\partial t} + V \frac{\partial a}{\partial x} = \frac{a}{4\mu_m} (p_g - p_l)$$

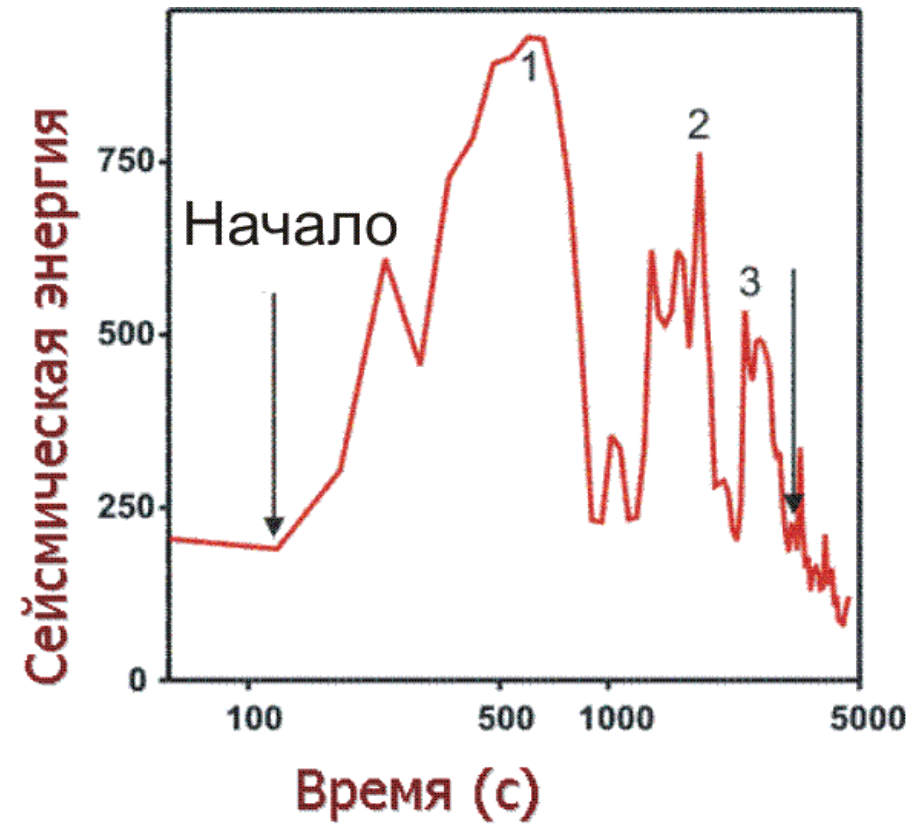
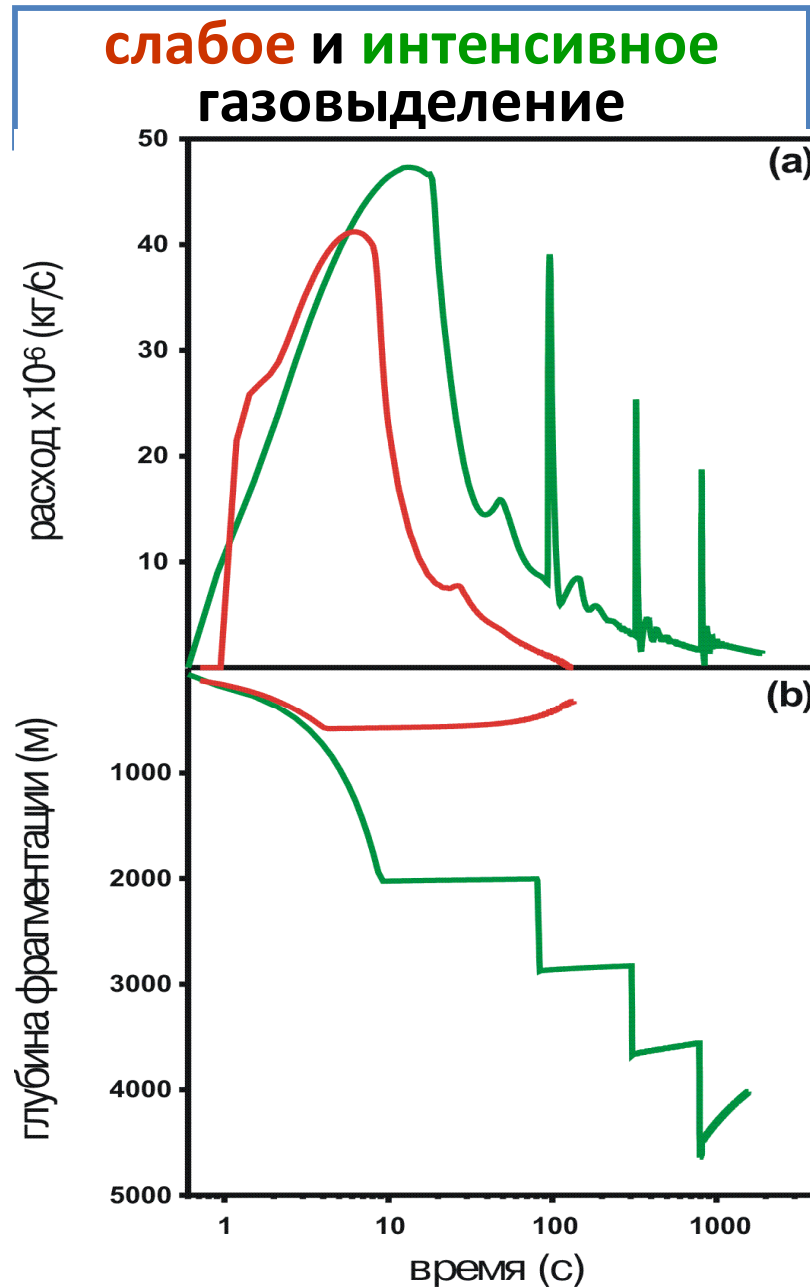
Условие фрагментации: $p_g - p_l = \Delta p_*$



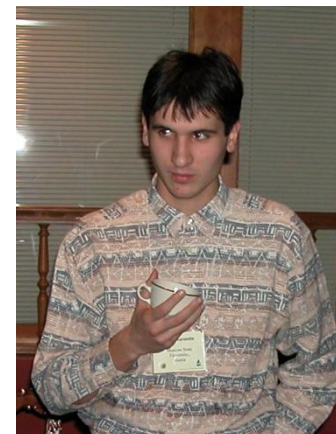
Развитие взрывного извержения



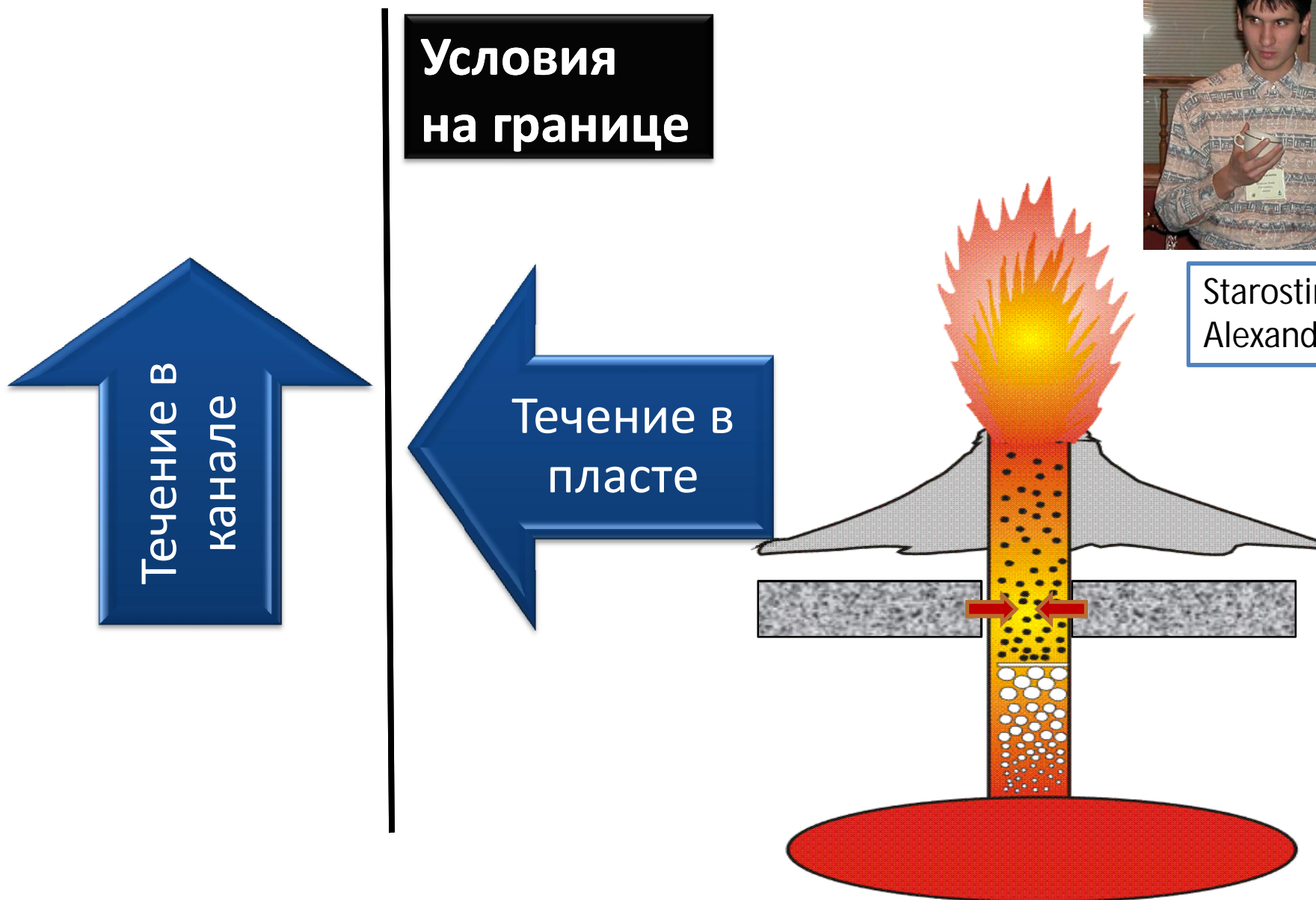
Изменение расхода магмы и глубины фрагментации



Фреатомагматические извержения



Starostin
Alexander



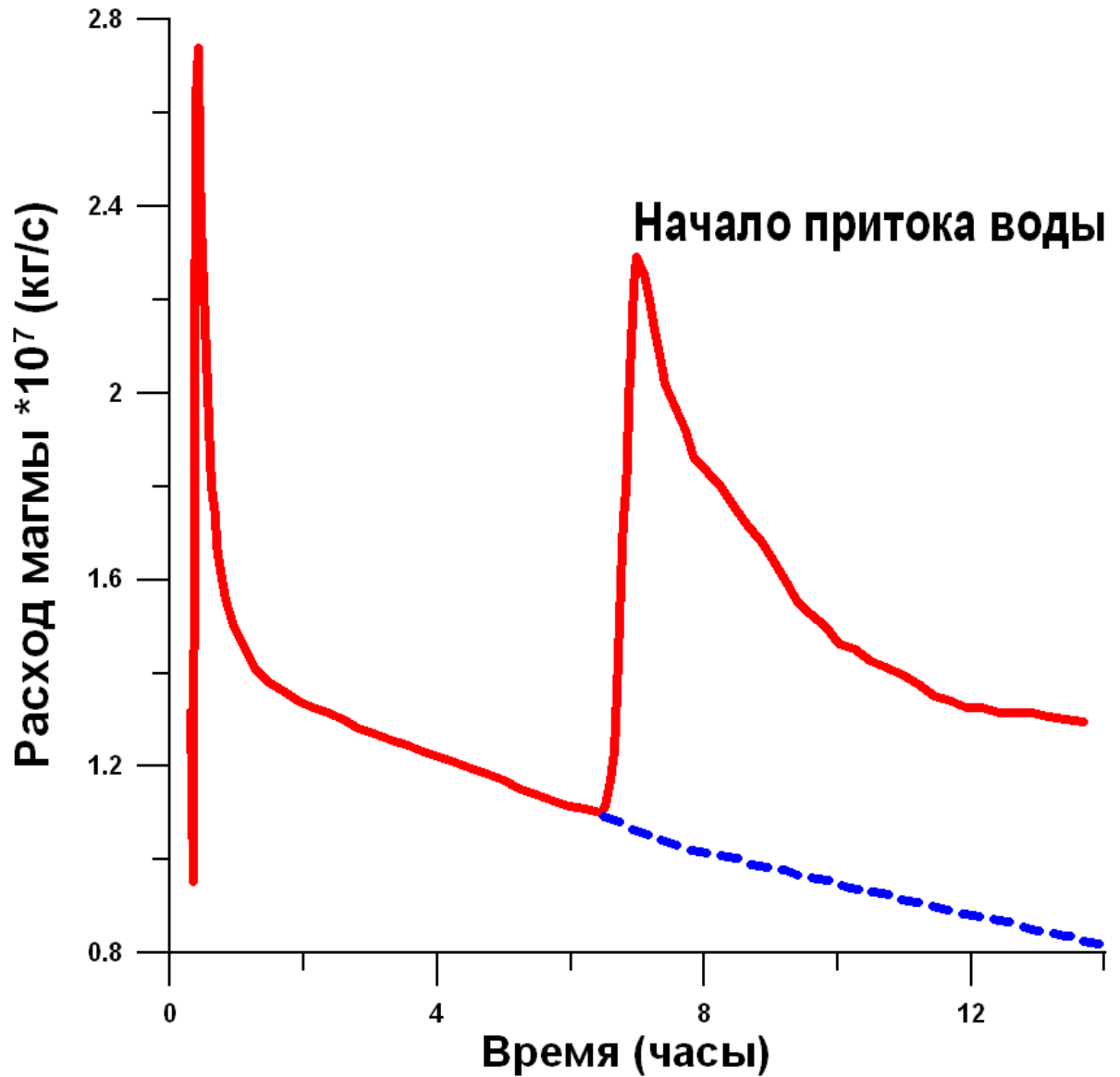
Важность моделирования и мониторинга



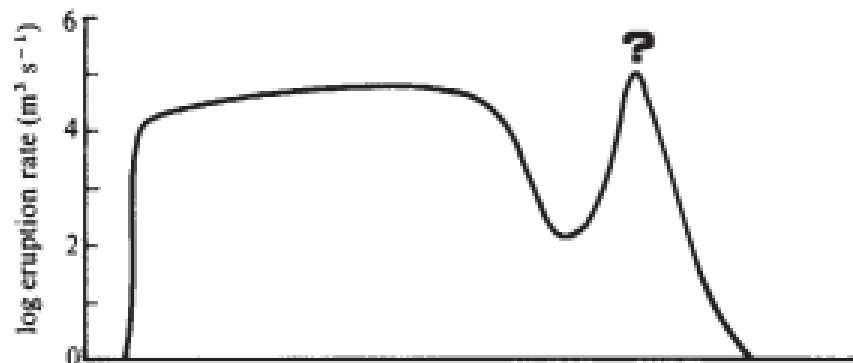
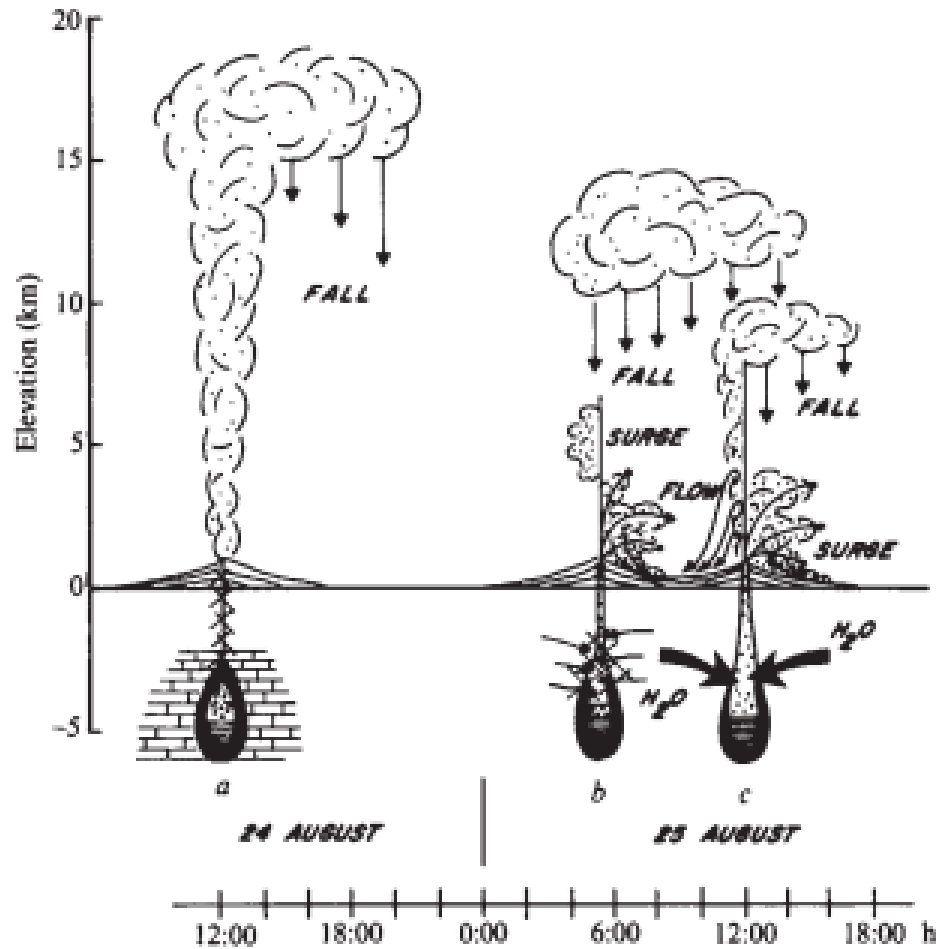
<http://www.islam.ru/lib/forpeople/4/>

- ✓ ...если бы случившееся было обычным извержением вулкана, то люди могли бы подготовиться. Извержению вулкана предшествует взрыв, в течение некоторого времени со стороны вулкана из-под земли доносятся различные звуки, которые не могут не насторожить людей. ...Складывается впечатление, что лава накрыла их раньше, чем какие-либо звуки дошли до них. ...Но кто способен сотворить такое? Это может сделать только Всевышний. ... Не следует и нам забывать о гибели Помпеи, ведь подобное наказание может постигнуть и наши города, ставшие источником разврата.

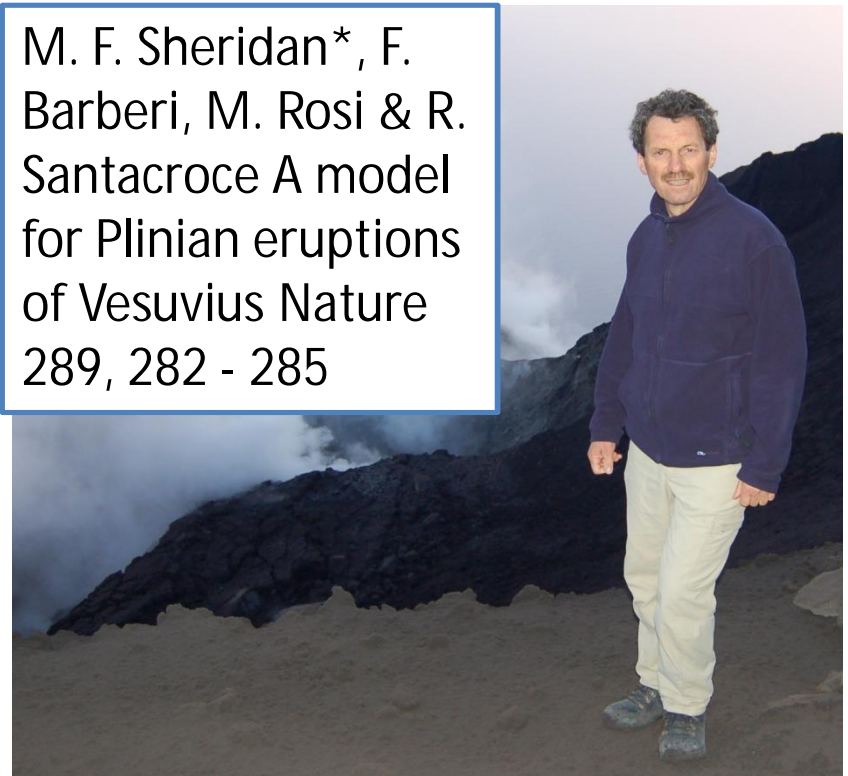
Усиление извержения Везувия, 79 г. н.э.



Геологическая интерпретация



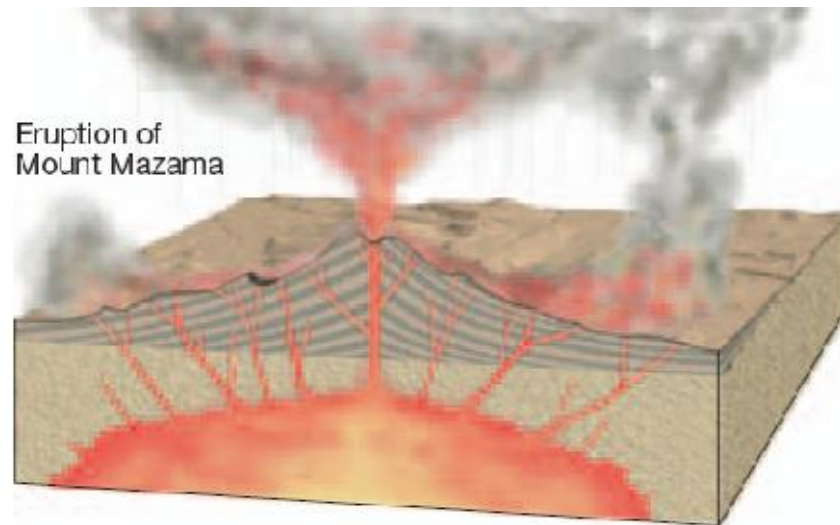
M. F. Sheridan*, F. Barberi, M. Rosi & R. Santacroce A model for Plinian eruptions of Vesuvius *Nature* 289, 282 - 285



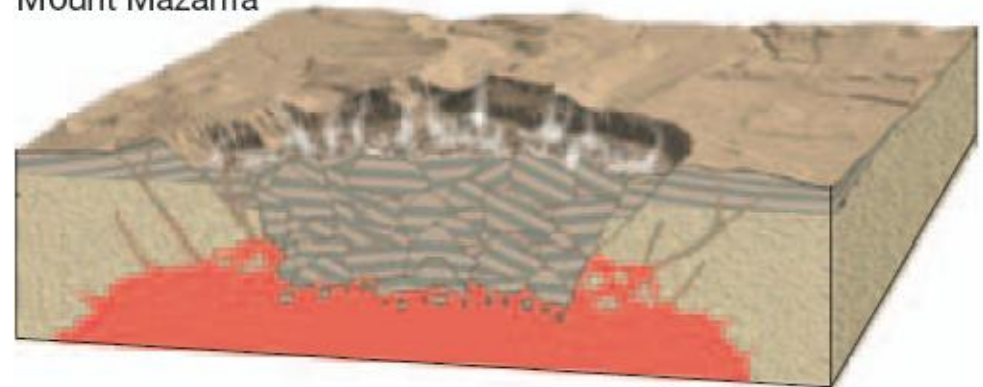
Кальдерообразующие извержения

- В результате крупных извержений в земле образуются гигантские провальные структуры – кальдеры.
- Их образование связано с опустошением очага и провалом кровли.
- При опускании кровли извержение из центрального канала сменяется извержением через систему трещин

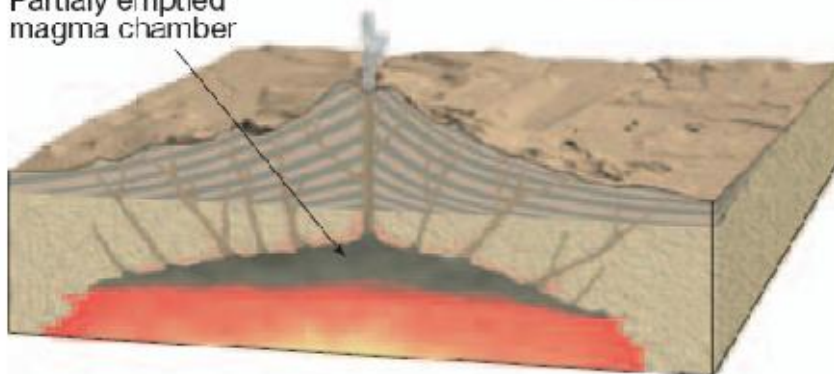
Формирование Crater Lake, Oregon



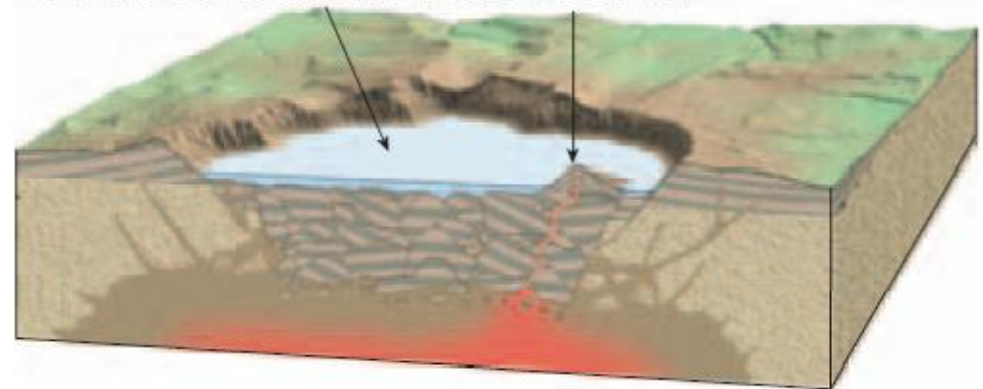
Collapse of Mount Mazama



Partially emptied magma chamber



Formation of Crater Lake and Wizard Island



Итак:

- «Кирпичики модели»: растворимость газа, нуклеация, фрагментация, запираение.
- Простейшая модель
- Влияние утока газа, переход между режимами извержения
- Развитие взрывного извержения в результате обрушения купола
- Фреатомагматические извержения
- Кальдеры.