

Модели эксплозивного извержения. (13.04.2010)

- 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 эксплозивными и экструзивными фазами извержения.

МЕЛЬНИК ОЛЕГ ЭДУАРДОВИЧ

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

Страница курса в Интернете:

http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Вулканология

Эксплозивное извержение, вызванное обрушением купола



- Mount St Helens, 18 May 1980

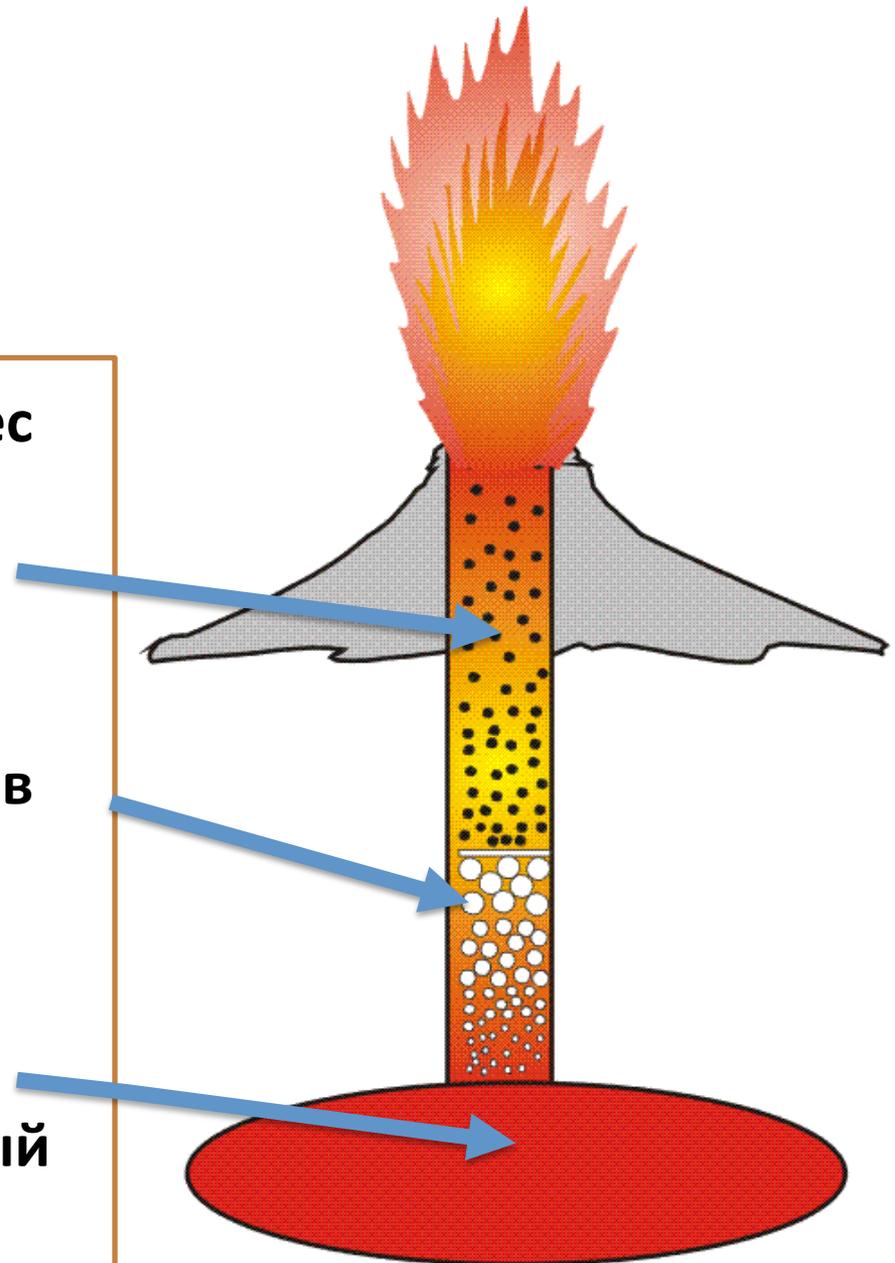


Эксплозивный режим

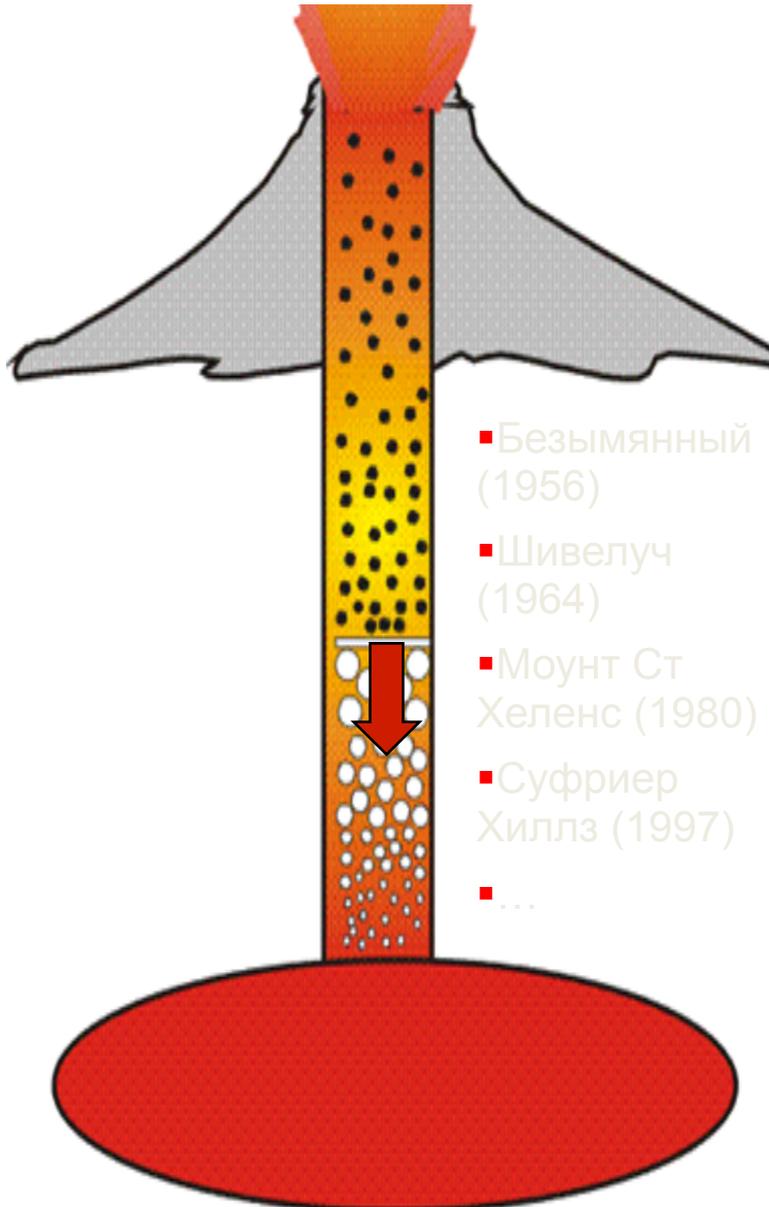
Газовзвесь: сопротивление и вес малы, до и сверх-звуковые скорости.

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

Очаг: Резервуар содержащий расплав, кристаллы, растворенный газ.



Моделирование взрывного извержения



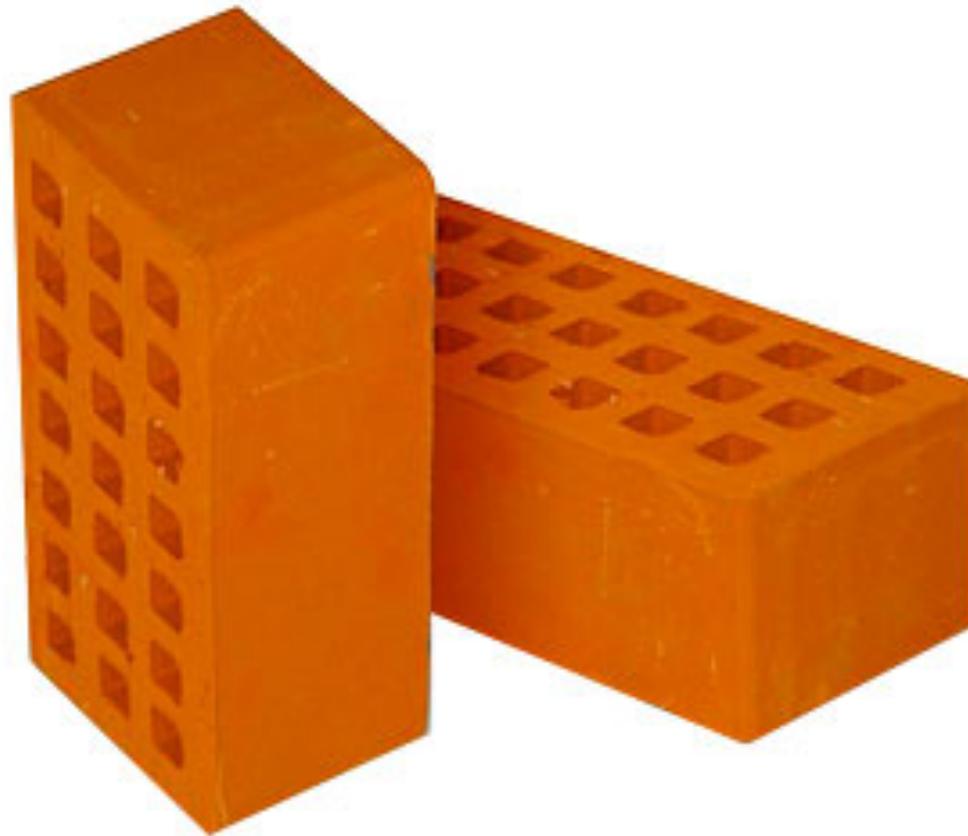
- Безымянный (1956)
- Шивелуч (1964)
- Моунт Ст Хеленс (1980)
- Суфриер Хиллз (1997)
- ...

Течение газозвеси

Условия фрагментации

Течение пузырьковой жидкости

Кирпичики модели

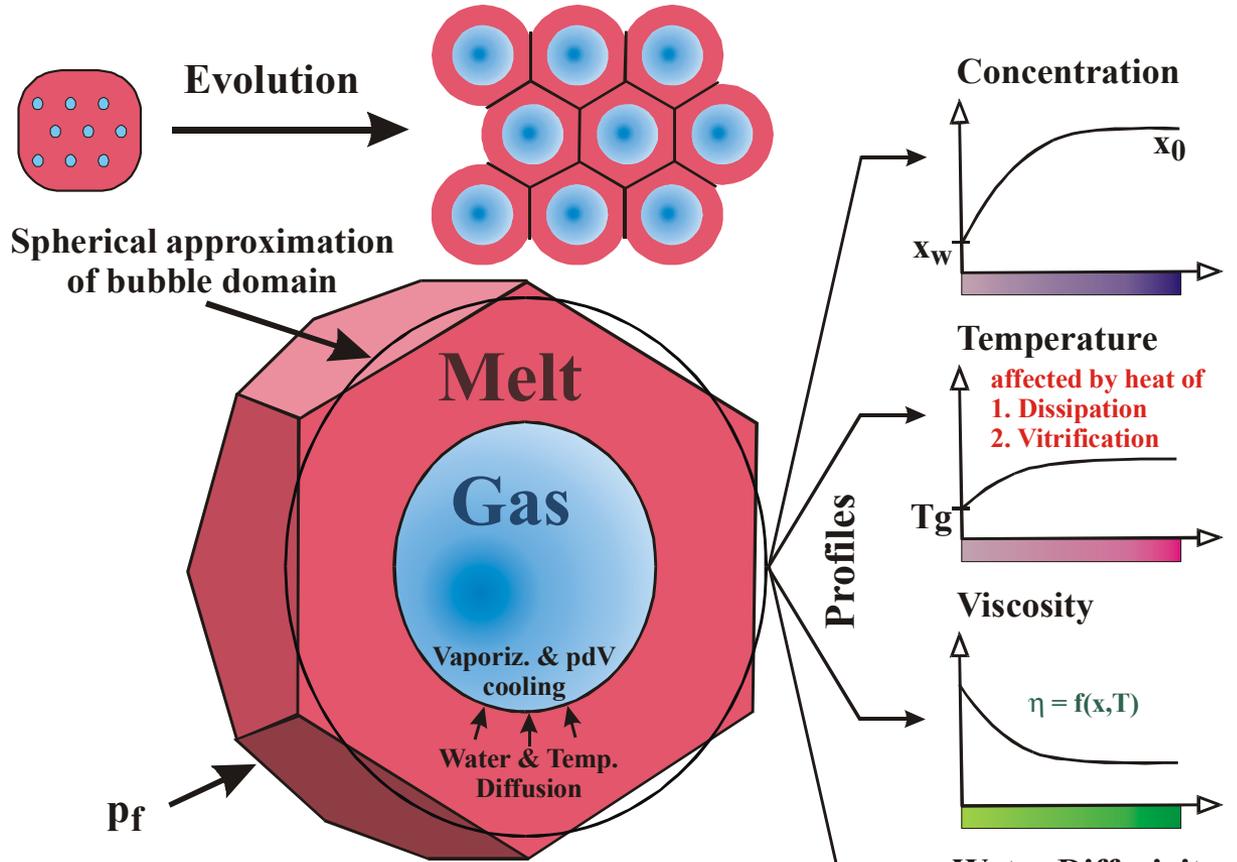


От пузырька к фрагментации





Alex Prousevitch



Bubble Temperature

- T_g affected by
1. Vaporization cooling
 2. PdV cooling
 3. Heating from melt

Ambient Pressure

- (p_f)
1. Conduit flow hydrodynamics

Bubble Pressure

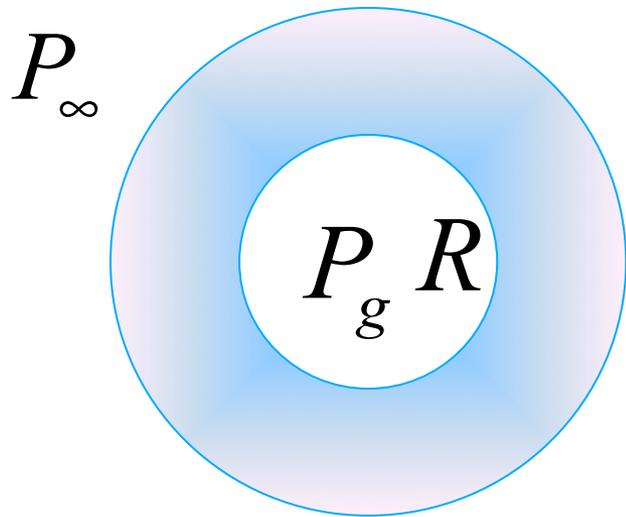
$$p_g = p_f + p_\sigma + p_\eta$$

Interface concentration

$$x_w = f(p_g)$$

Сохранение массы оболочки

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad \rho = \text{const}, \quad \vec{V} = (V_r, 0, 0)$$



$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 V = 0 \Rightarrow r^2 V = f(t)$$

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

Уравнения импульсов

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

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

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

На границе пузырька и ЖИДКОСТИ

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

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

Малые члены

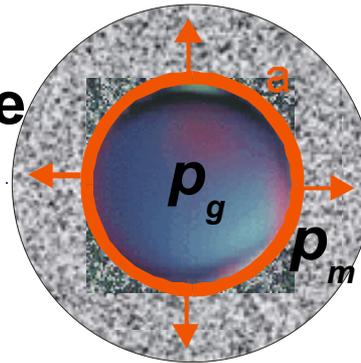


Rayleigh, John William
Strutt (1842-1919)

Модели фрагментации магмы

► Фиксированная объемная доля пузырьков (Спаркс 1978).

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



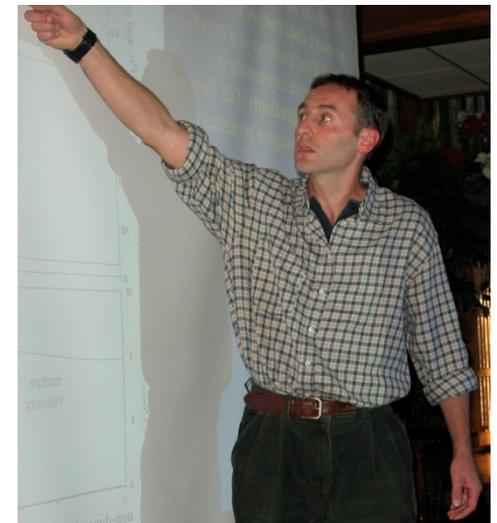
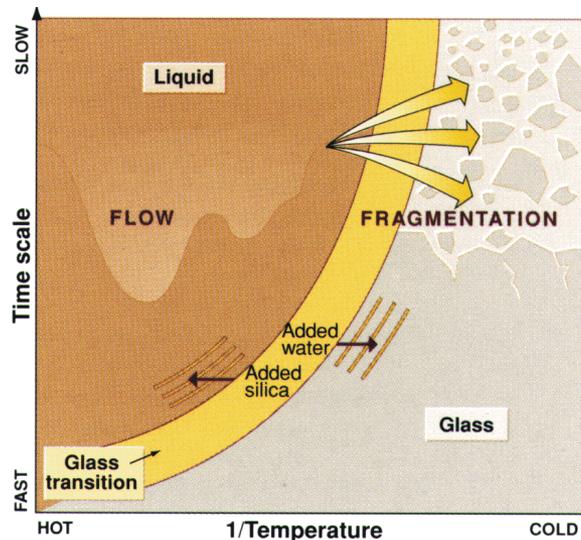
$$p_g - p_m = \frac{4\mu_m}{R} \frac{dR}{dt} +$$

малые члены

Критическая скорость

► растяжения
Parale P, 1999

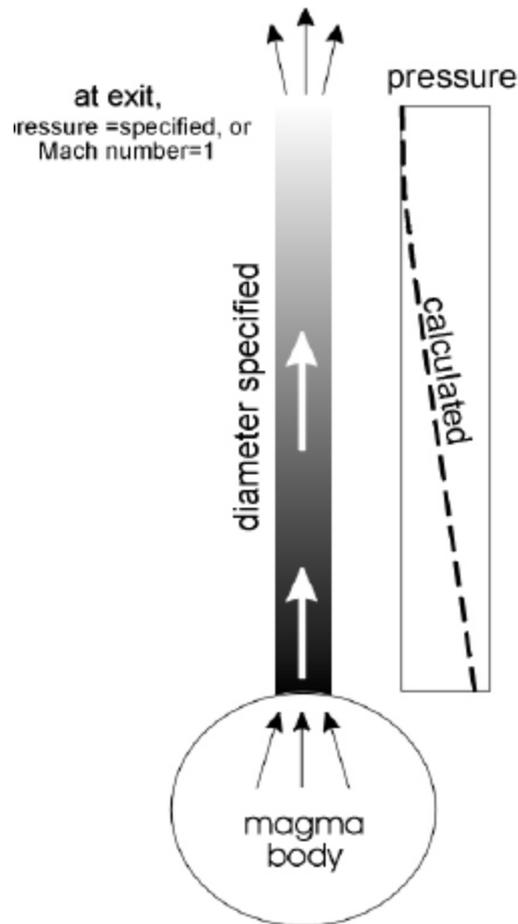
$$\frac{dv_z}{dz} > k \frac{1}{\tau}$$



Гидростатический или литостатический градиент давления?

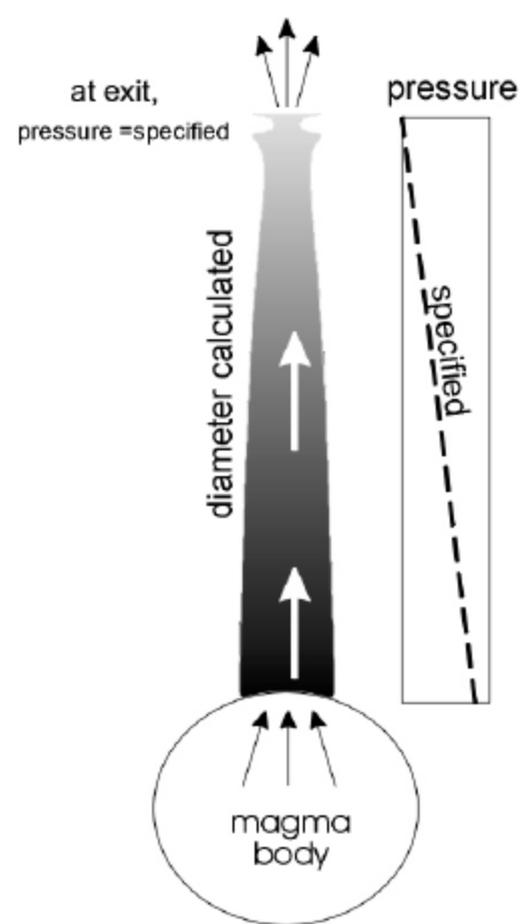
Option 1

specified conduit diameter
program calculates pressure profile

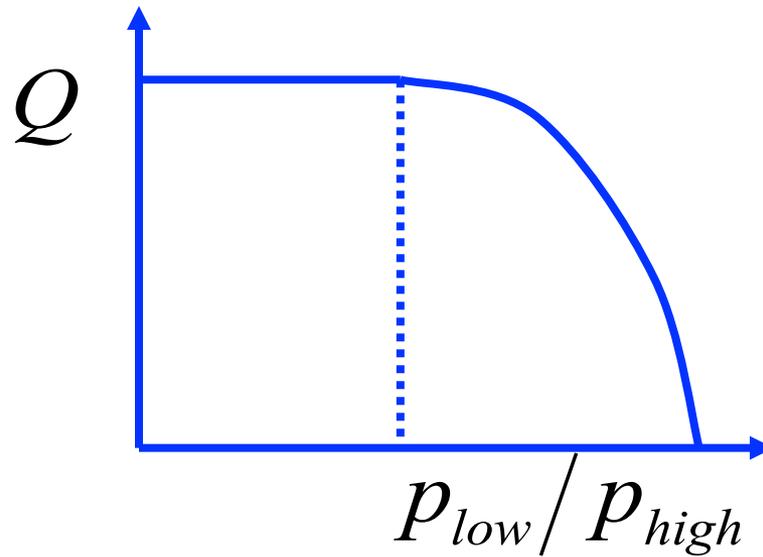
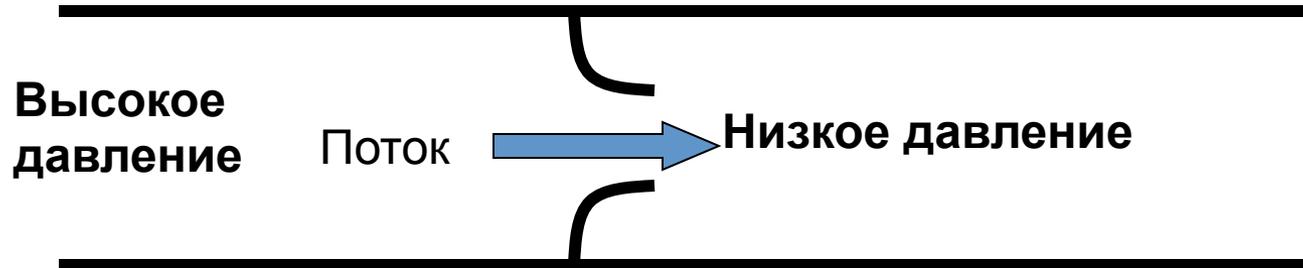


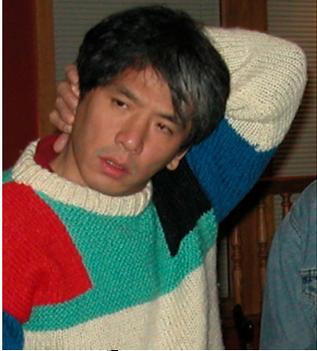
Option 2

specified pressure gradient
program calculates conduit geometry



Условие записания





Простейшая модель

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

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

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

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

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Z=0 (очаг) : P=P_{ch}

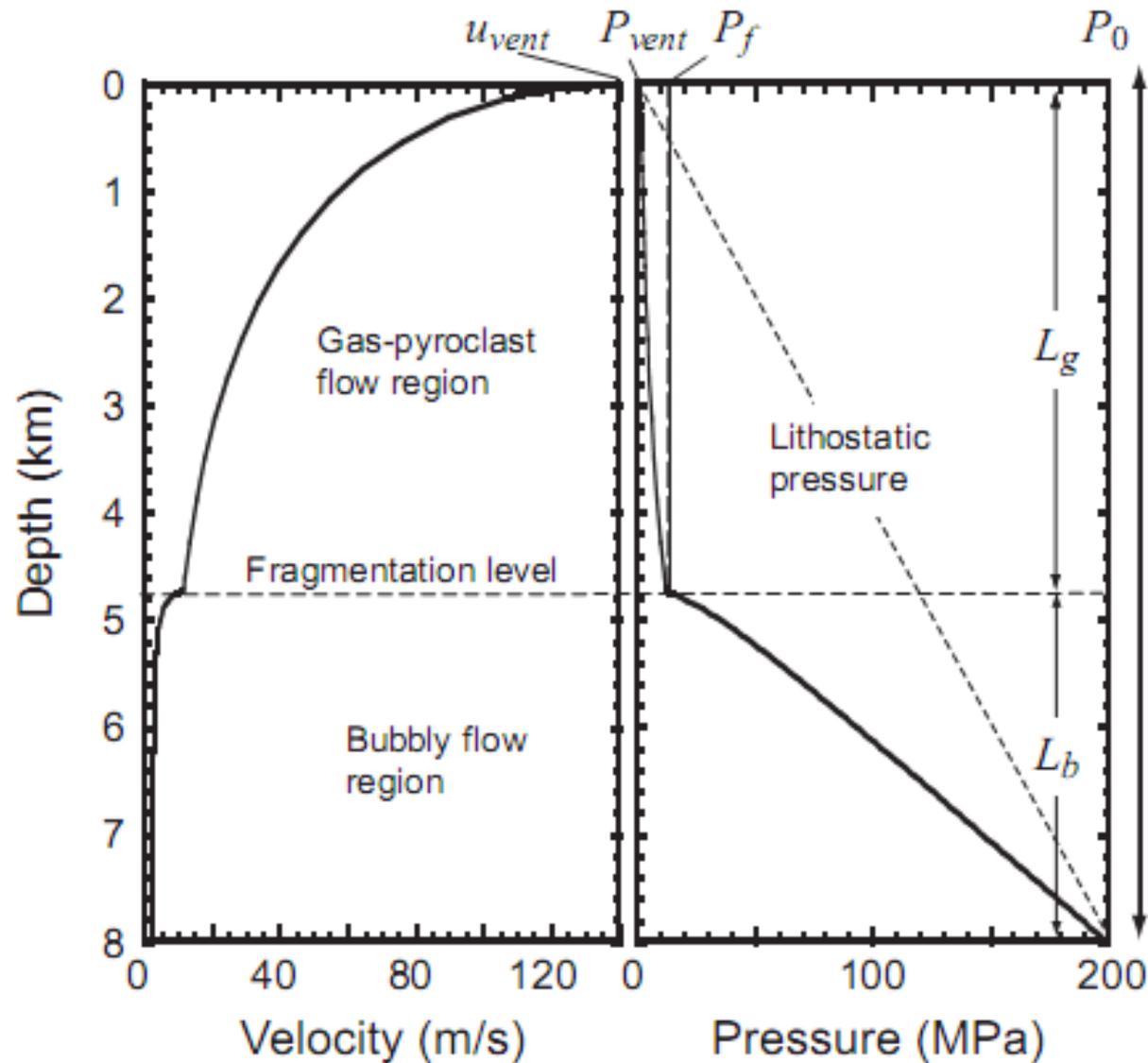
Z=L (атм.) : Условие
запирания или
атмосферное давление

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

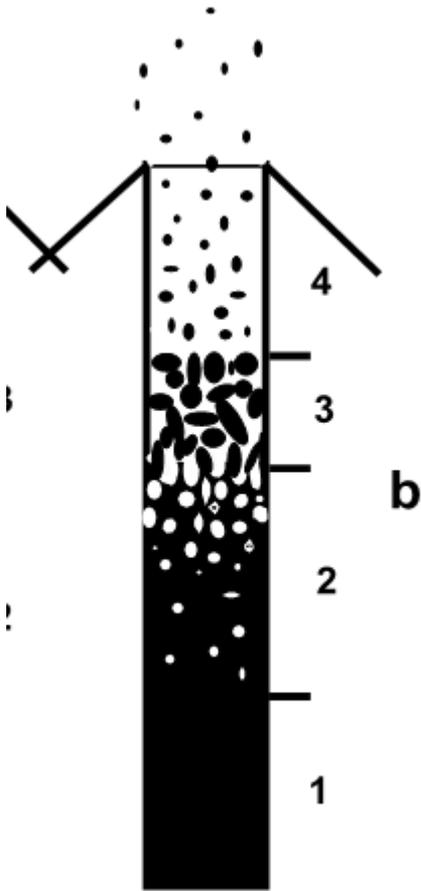


Volcanic eruption mechanisms: Insights from
intercomparison of models of conduit processes

Workshop in Durham, New Hampshire, November 2002

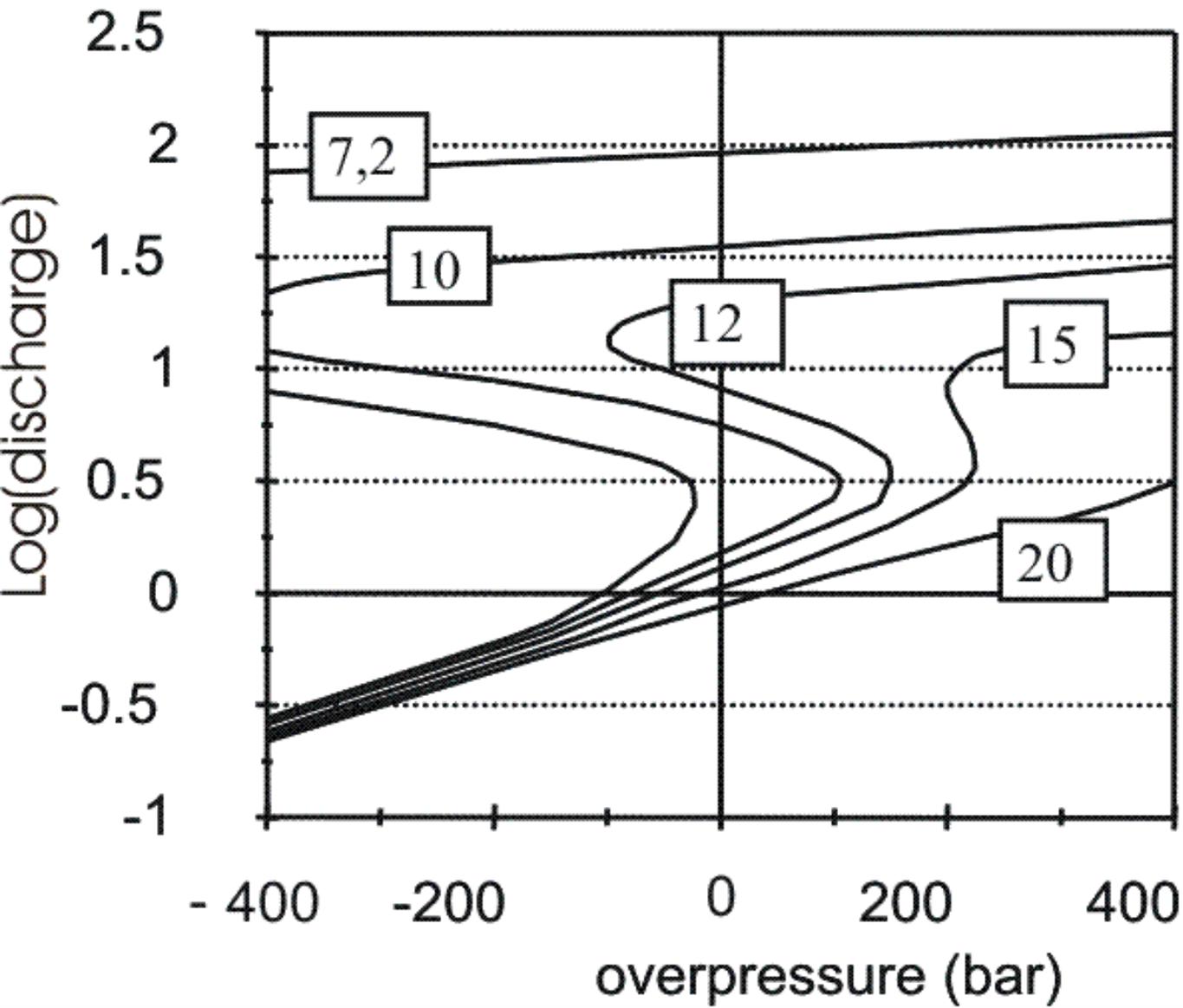
Model	Exit velocity (m/s)	Exit pressure (MPa)	Fragmentation depth (m)	Fragmentation vesicularity	Discharge rate ($\times 10^7$ kg/s)
Conflow	182	6.1	3107	0.64	7.7
Conduit4	gas: 211 particle: 201	2.3	2283	0.83	3.4
Bubbledrive	150 to 450	set at 0.1 MPa	2400	0.8	4.1
Nuclascent	118	0.7	1100	0.735	6.0
Kamchatka	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, $C_d A (V_g - V_p)^2 = m_p g$ 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?



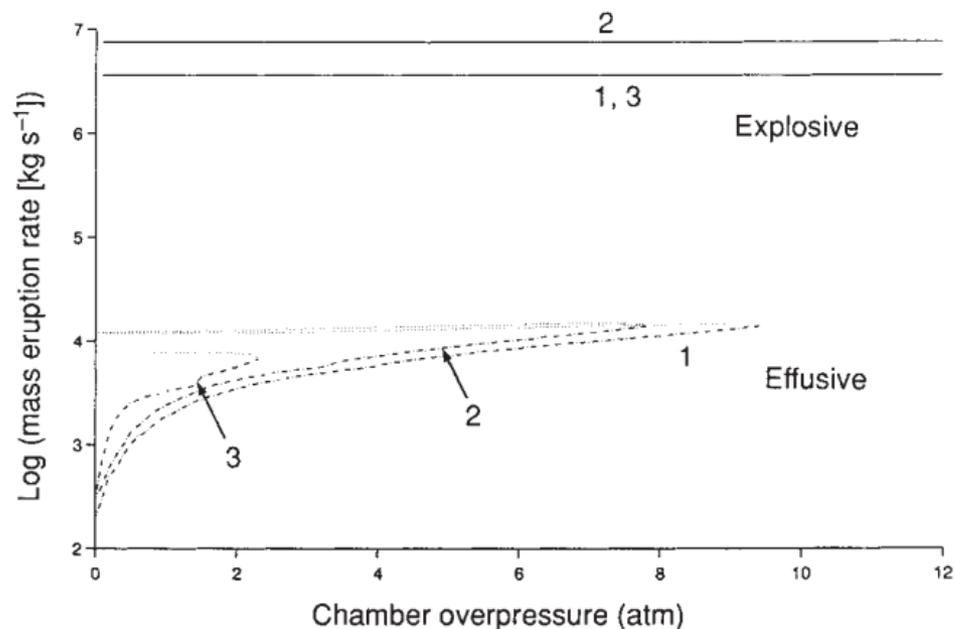
Слезин (1983)



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!

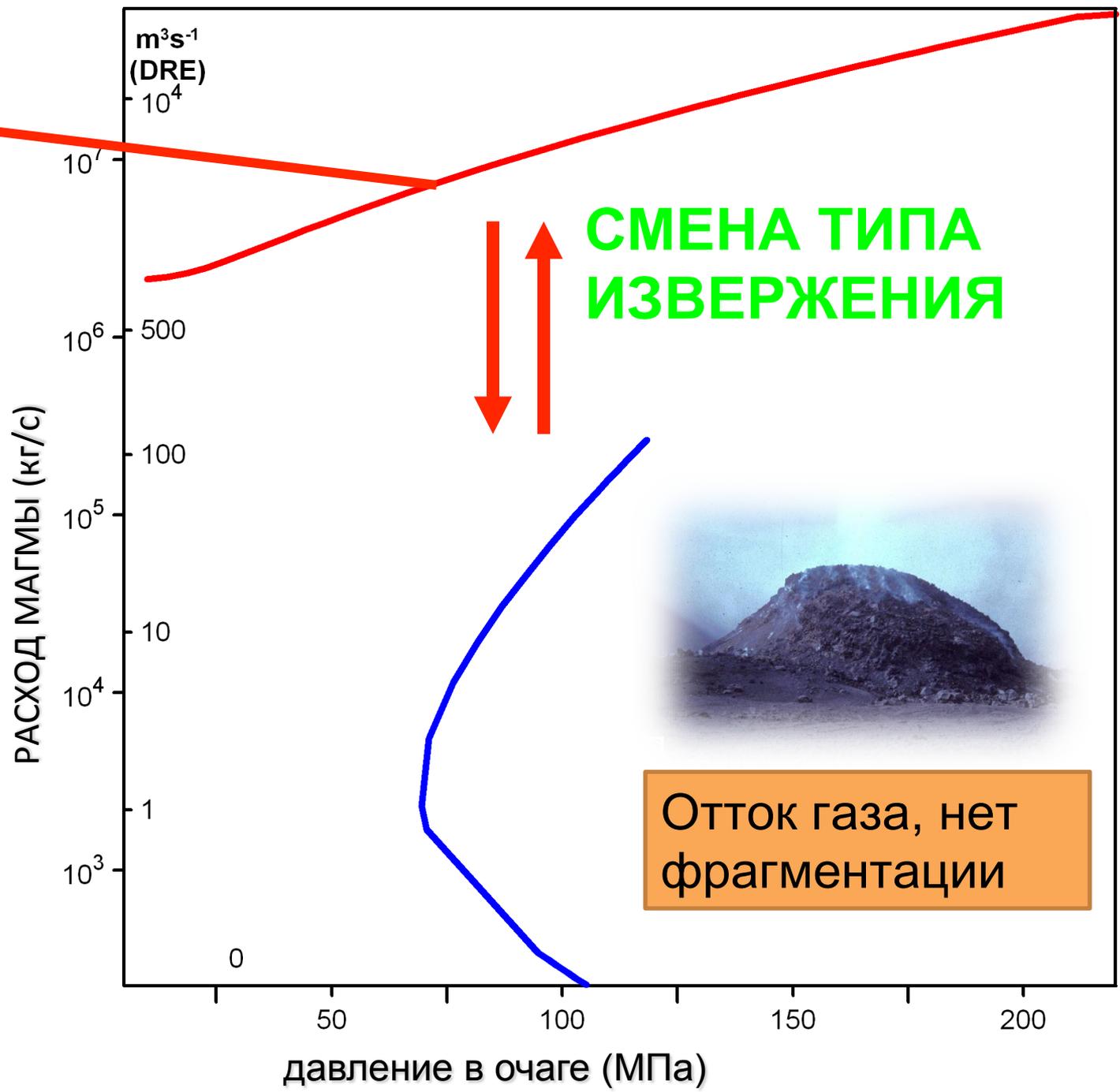
Учет фильтрации и избыточного давления

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



USGS

Малый
отток
газа,
фрагмент
ация



Отток газа, нет
фрагментации

Нестационарная система уравнений

Законы сохранения массы

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

Сохранения импульса для магмы

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

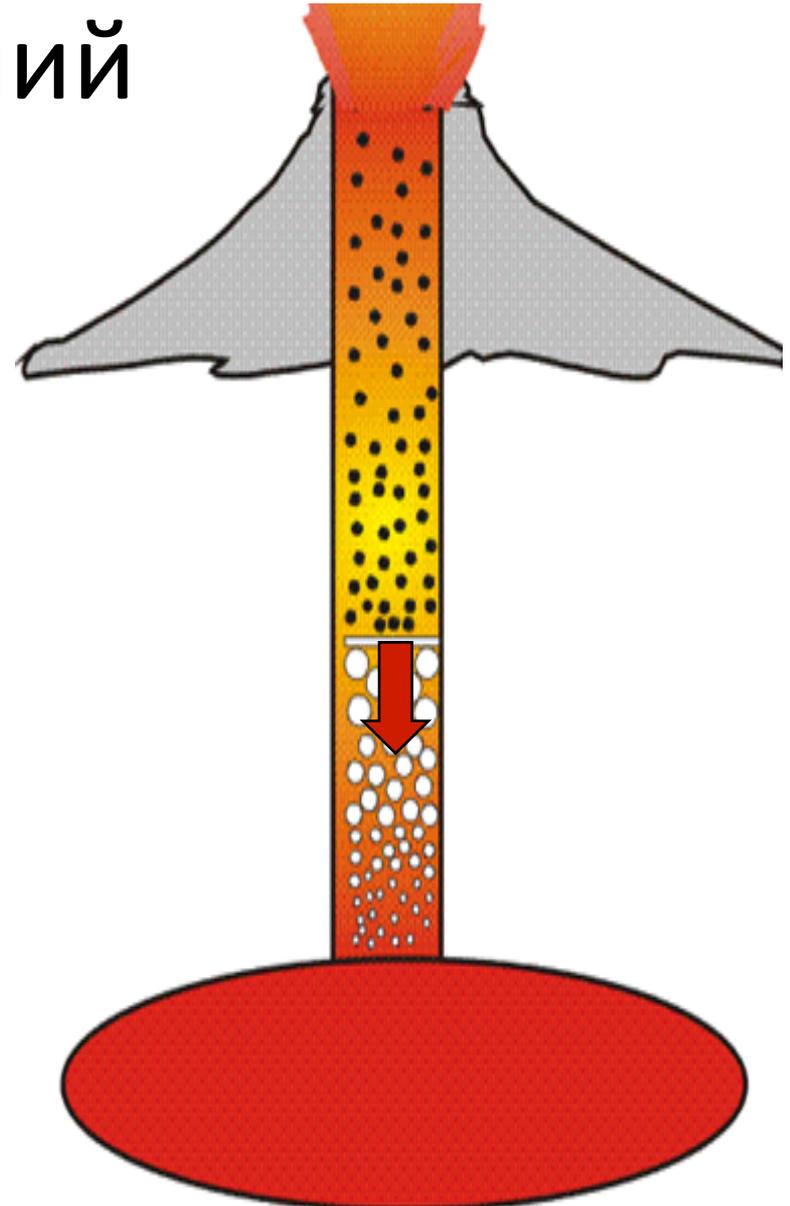
$$p_m = (1 - \alpha) p_l + \alpha p_g$$

Роста пузырька

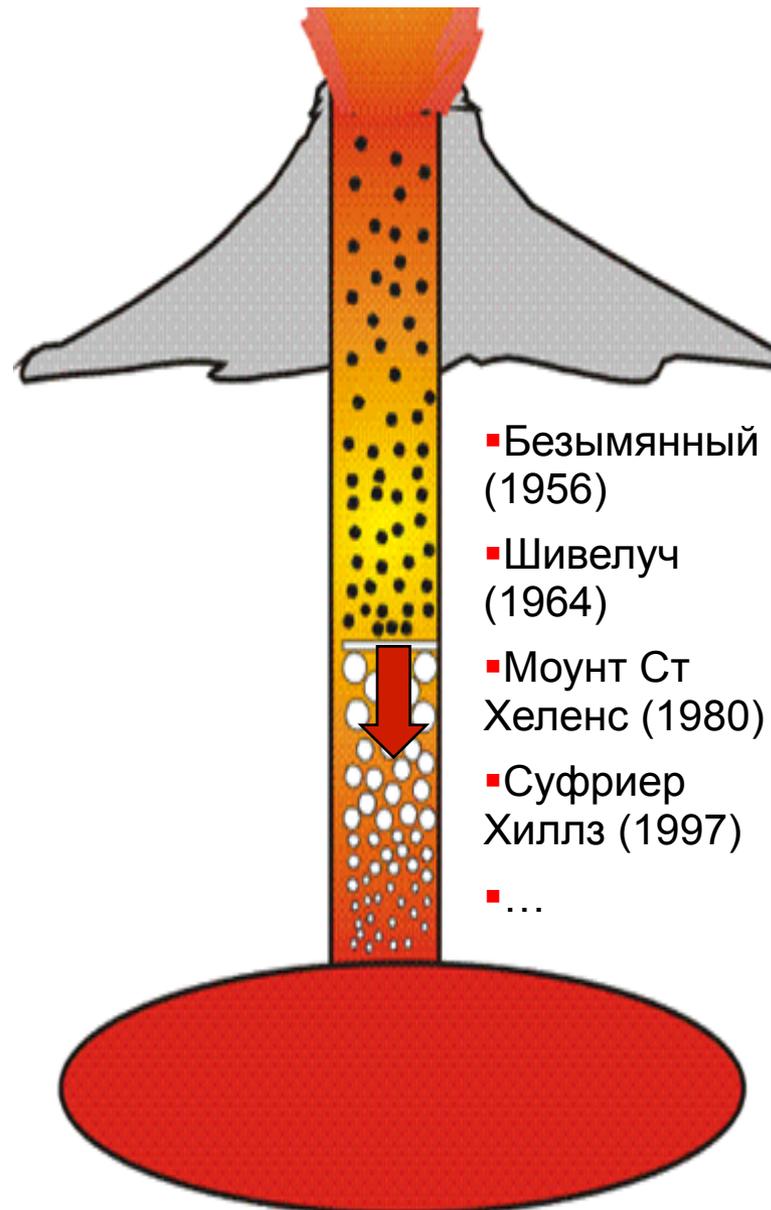
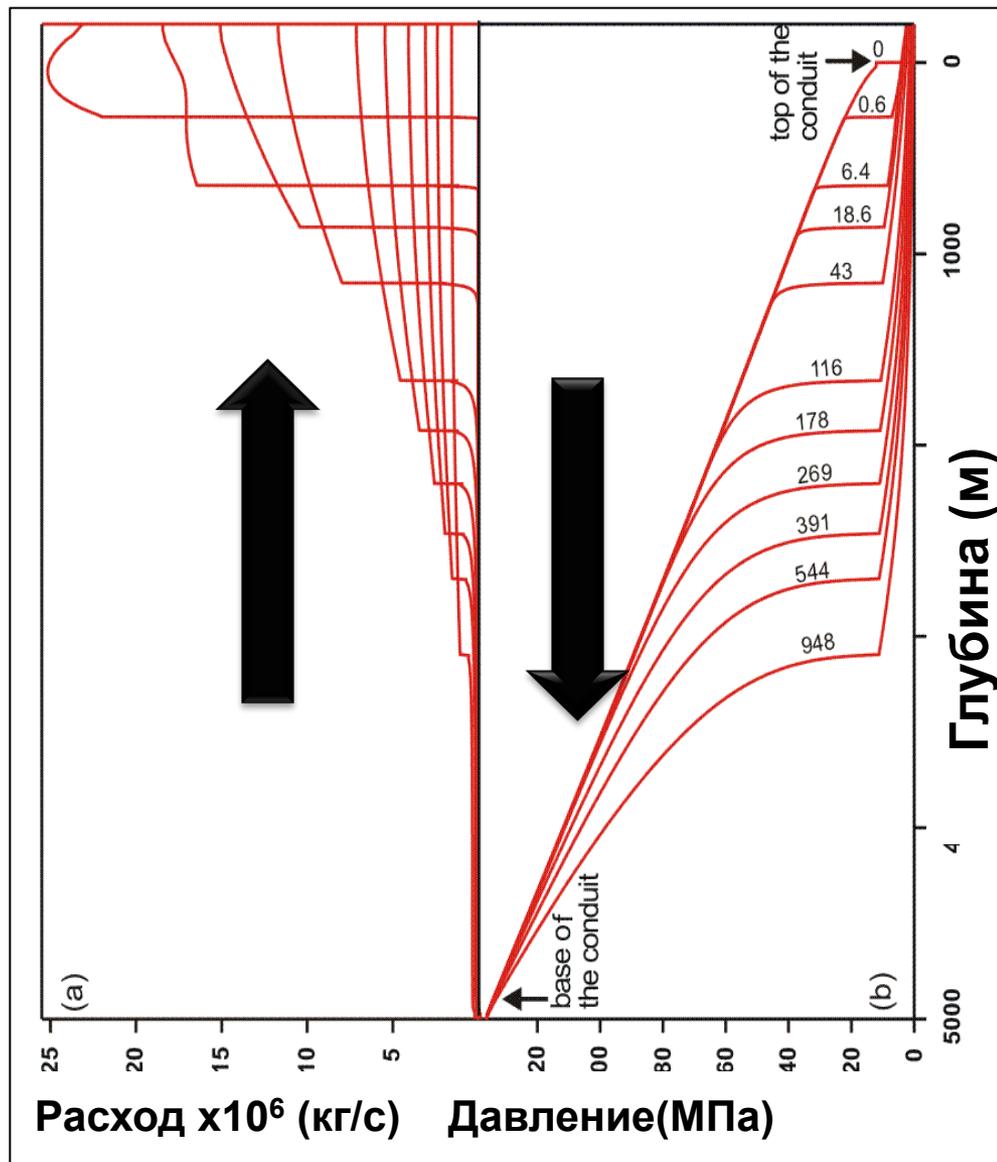
$$\frac{\partial a}{\partial t} + V \frac{\partial a}{\partial x} = \frac{a}{4\mu_m} (p_g - p_l)$$

Критерий фрагментации

$$p_g - p_l = \Delta p_*$$

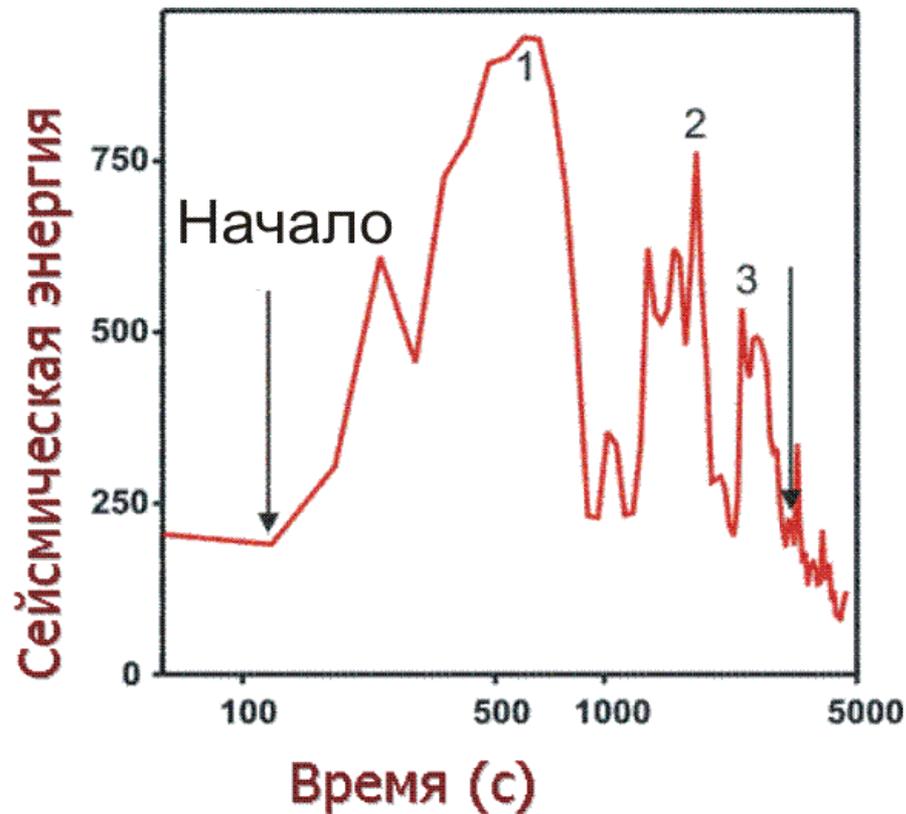
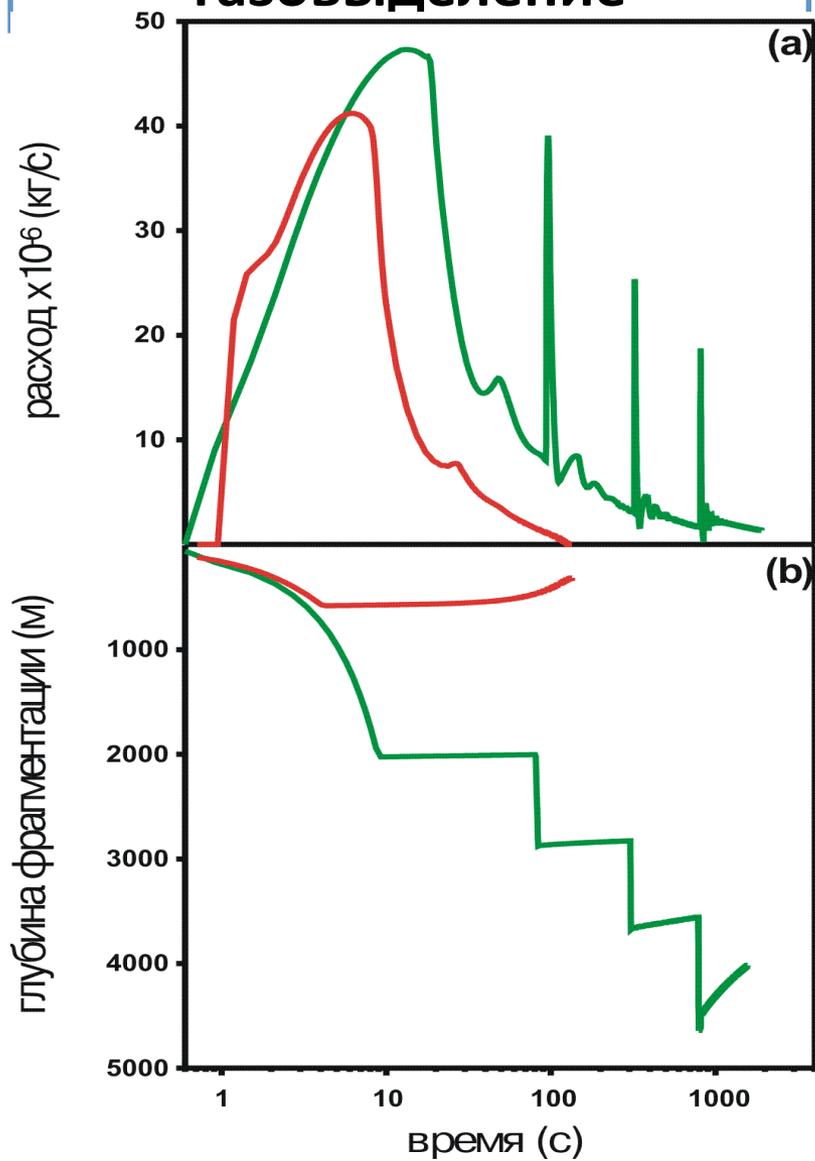


Развитие взрывного извержения



Изменение расхода магмы и глубины фрагментации

слабое и **интенсивное**
газовыделение

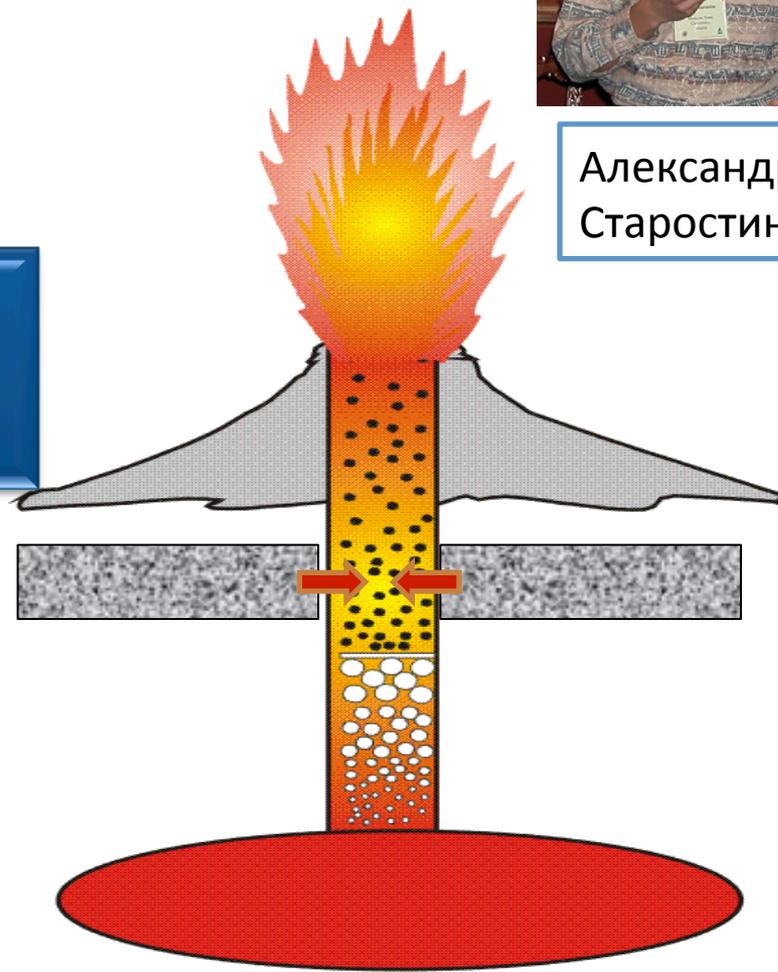


Фреатомагматические извержения

Условия
на границе

Течение в
канале

Течение в
пласте



Александр
Старостин



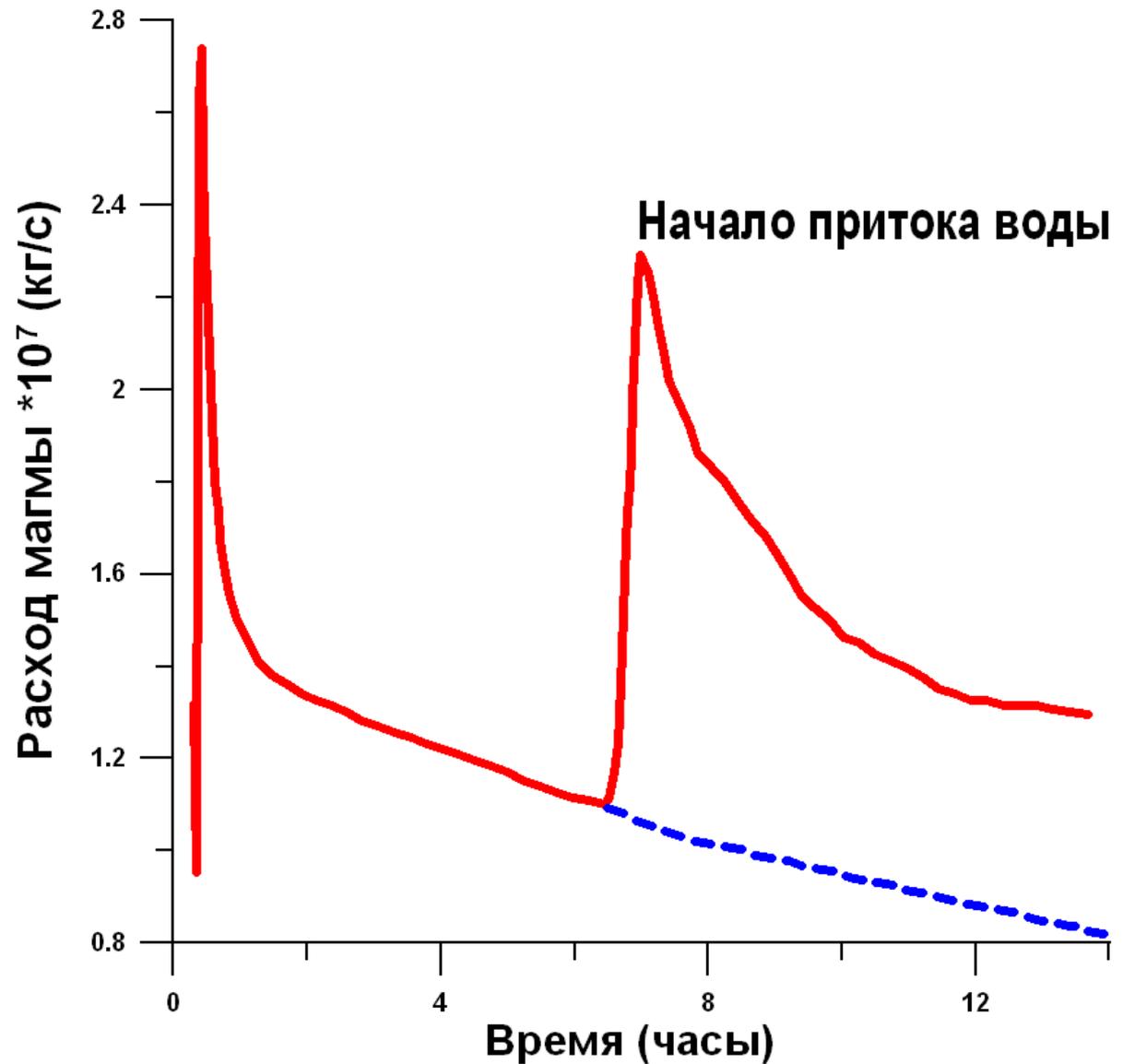
Важность моделирования и мониторинга



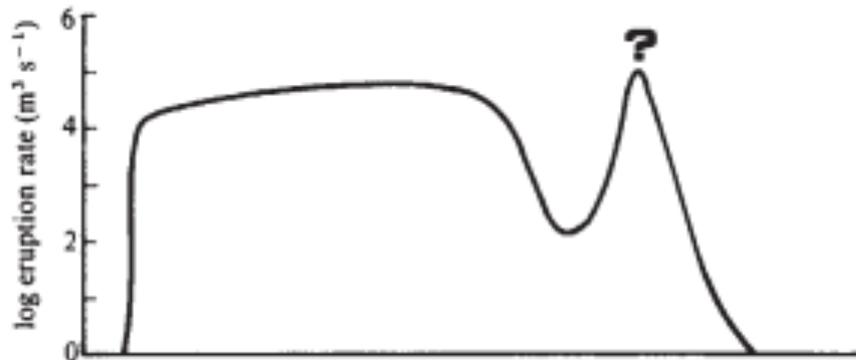
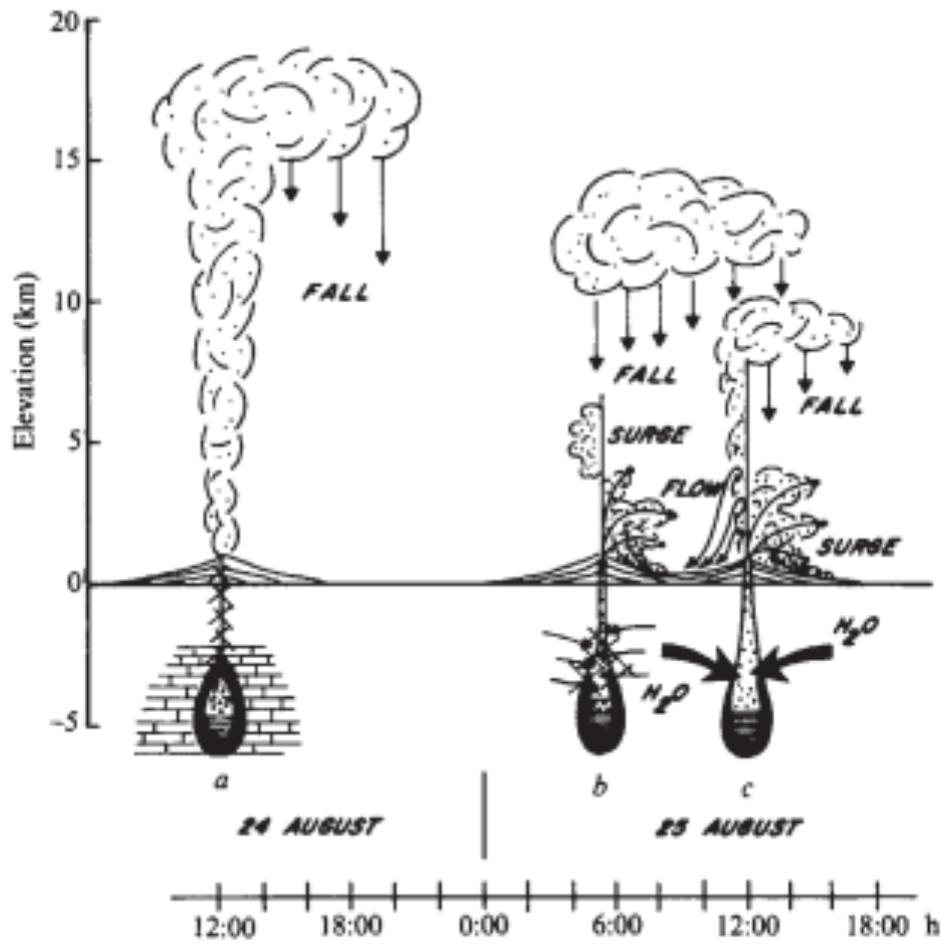
<http://www.islam.ru/lib/forpeople/4/>

- ✓ ...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.

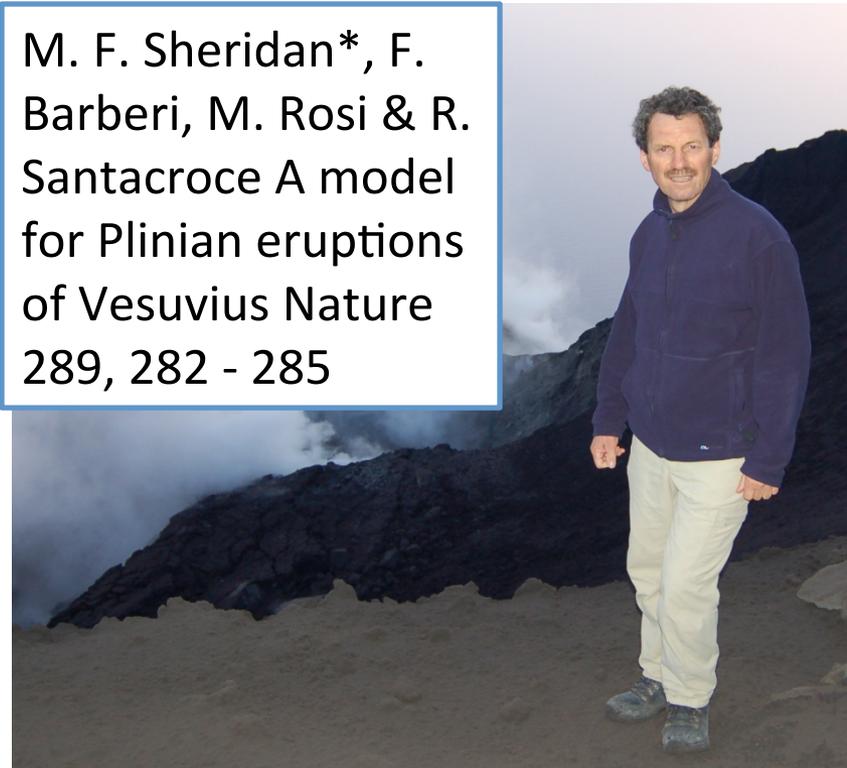
Усиление извержения Везувия, 79 г. н.э.



Геологическая интерпретация



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





СУПЕРВУЛКАНЫ

Volcanic Explosivity Index or VEI

http://volcano.oregonstate.edu/education/eruption_scale.html

VEI	Description	Plume Height	Volume	Classification	How often	Example
0	non-explosive	< 100 m	1000s m ³	Hawaiian	daily	Kilauea
1	gentle	100-1000 m	10,000s m ³	Haw/Strombolian	daily	Stromboli
2	explosive	1-5 km	1,000,000s m ³	Strom/Vulcanian	weekly	Galeras, 1992
3	severe	3-15 km	10,000,000 s m ³	Vulcanian	yearly	Ruiz, 1985
4	cataclysmic	10-25 km	100,000,000s m ³	Vulc/Plinian	10's of years	Galunggung, 1982
5	paroxysmal	>25 km	1 km ³	Plinian	100's of years	St. Helens, 1980
6	colossal	>25 km	10s km ³	Plin/Ultra-Plinian	100's of years	Krakatau, 1883
7	super-colossal	>25 km	100s km ³	Ultra-Plinian	1000's of years	Tambora, 1815
8	mega-colossal	>25 km	1,000s km³	Ultra-Plinian	10,000's of years	Yellowstone, 2 Ma

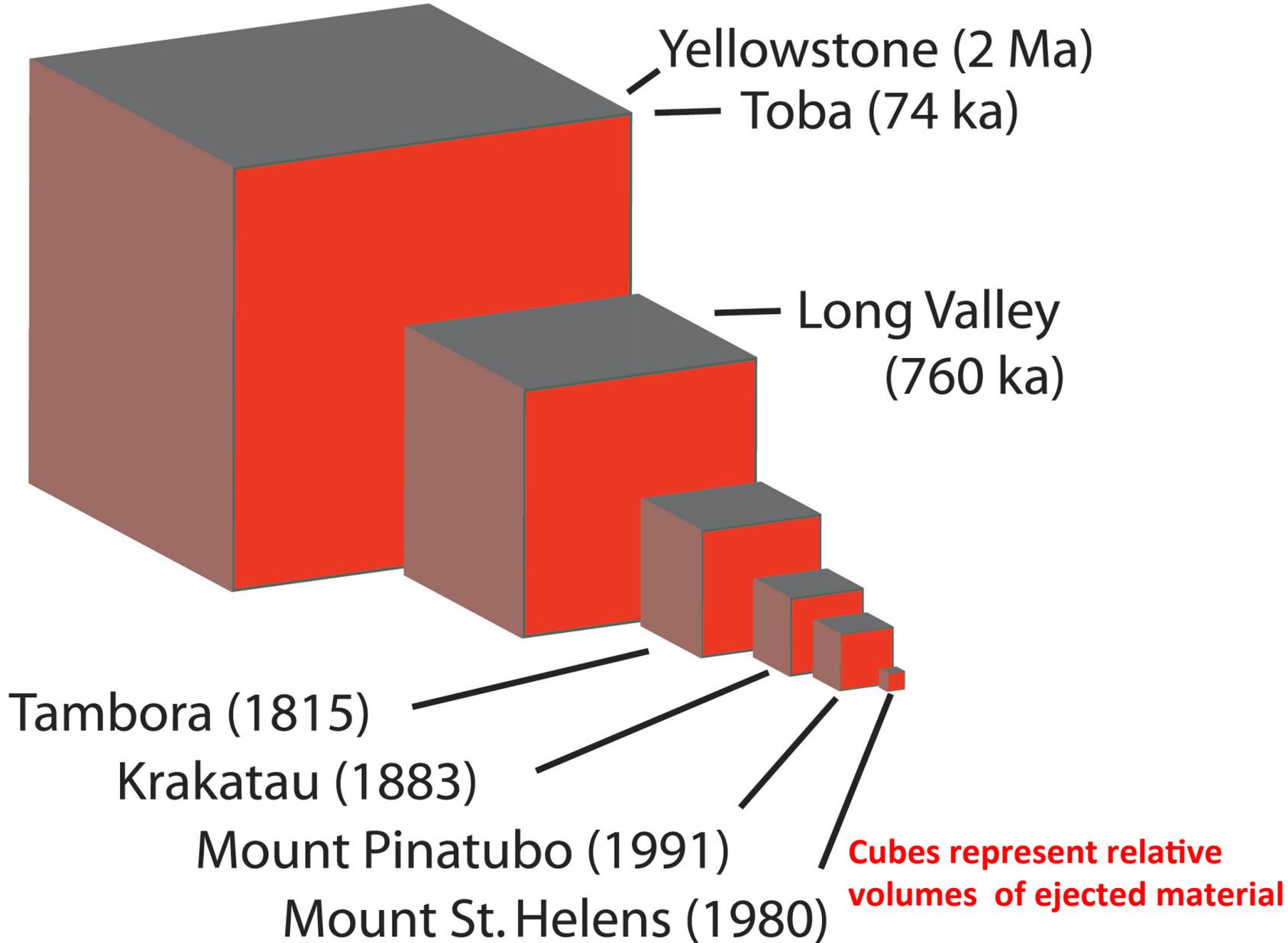


Figure modified from Miller and Wark, 2008. Elements, Vol 4, Issue 1, page 12

Тоба 74,000 лет назад

Toba caldera, Sumatra:
100 Km long, 40 Km wide

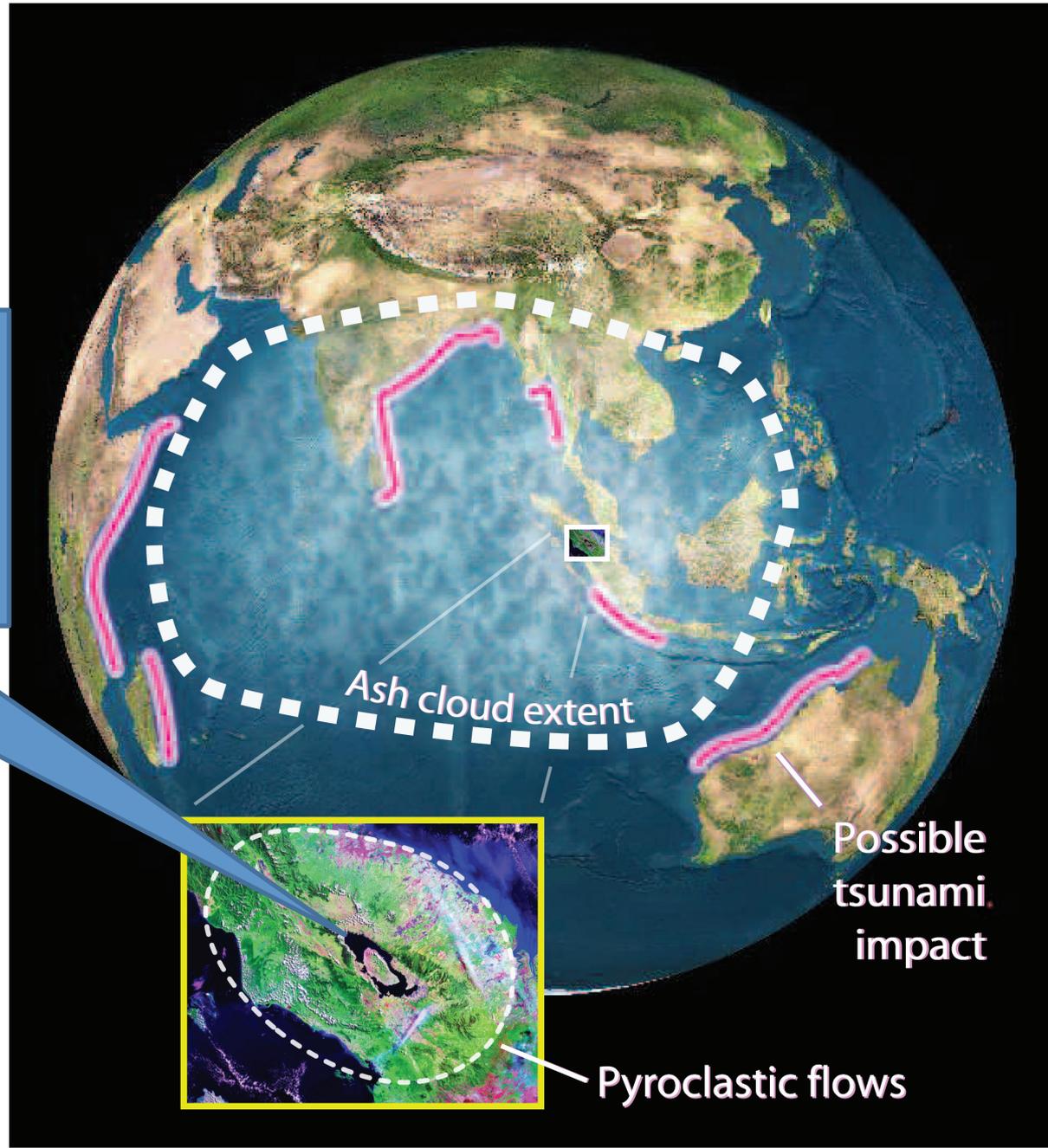
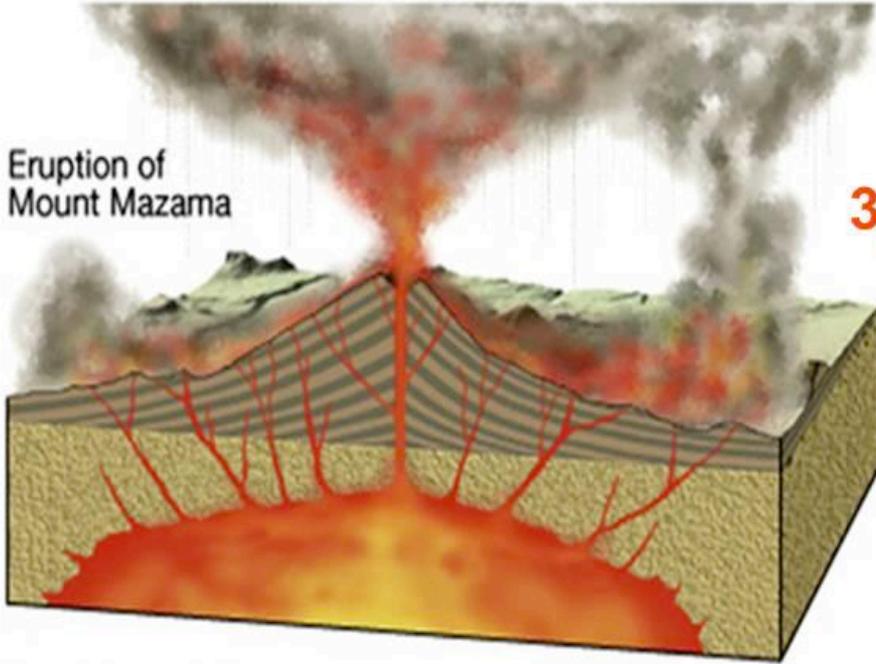


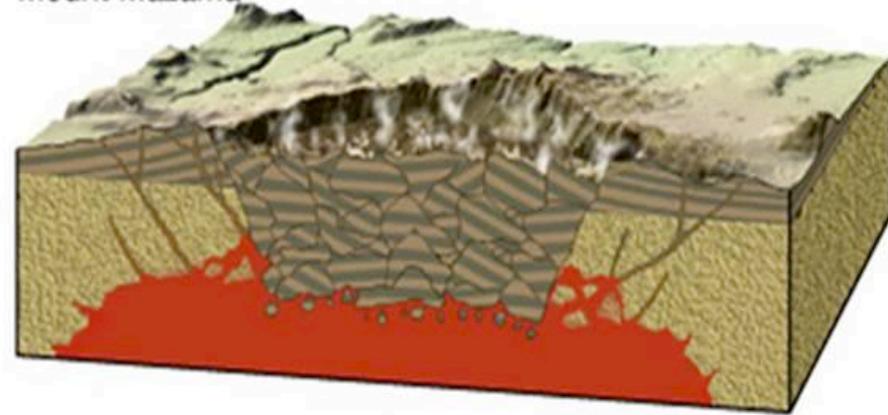
Figure modified from Miller and Wark, 2008. Elements, Vol 4, Issue 1, page 13

Кальдерообразующие извержения

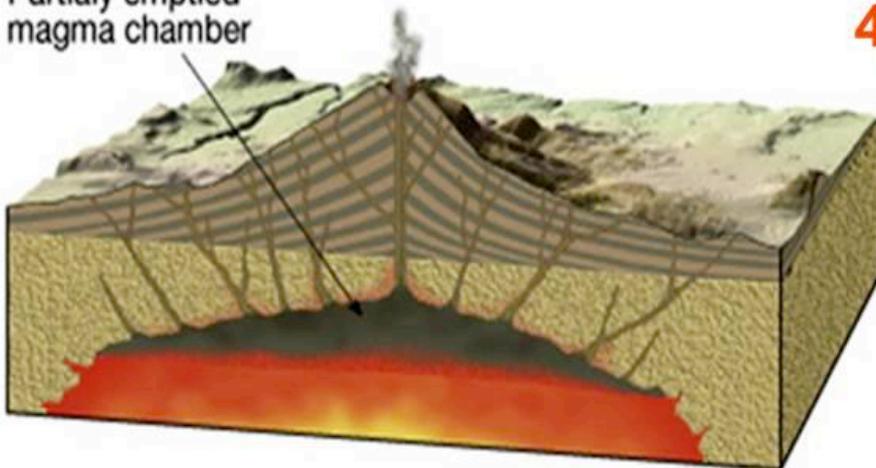
1) Eruption of Mount Mazama



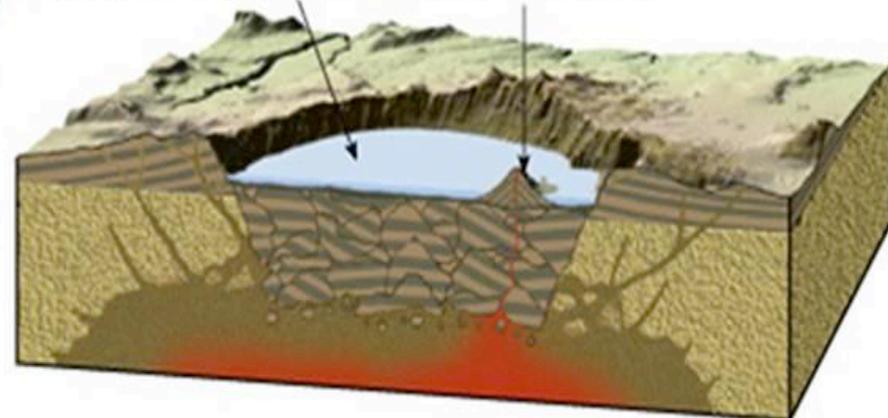
3) Collapse of Mount Mazama

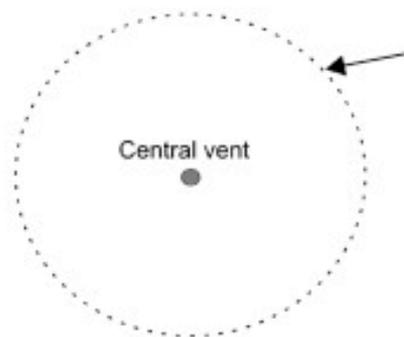
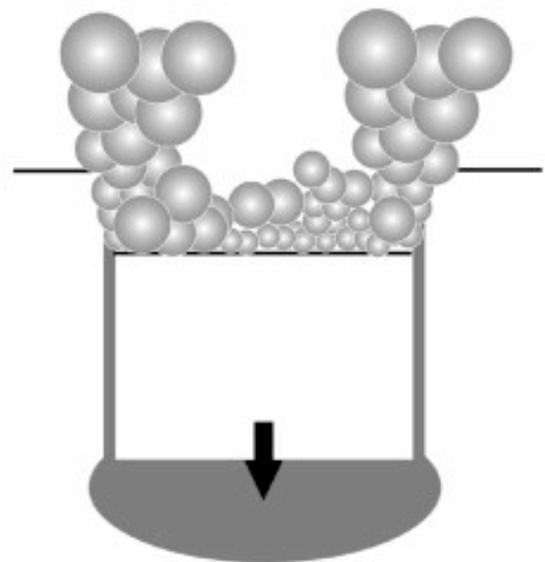
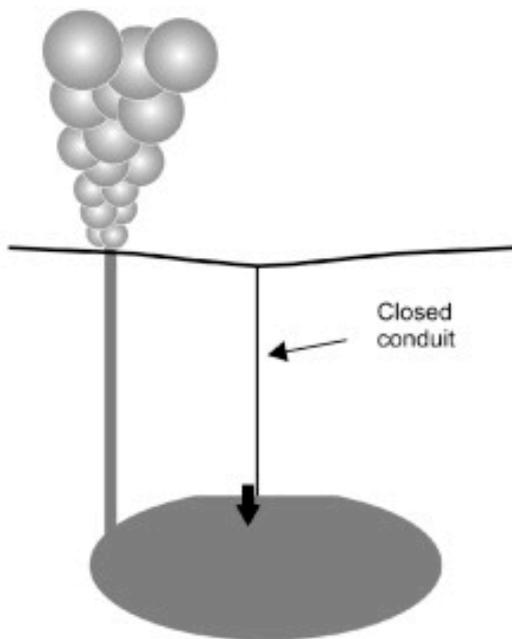
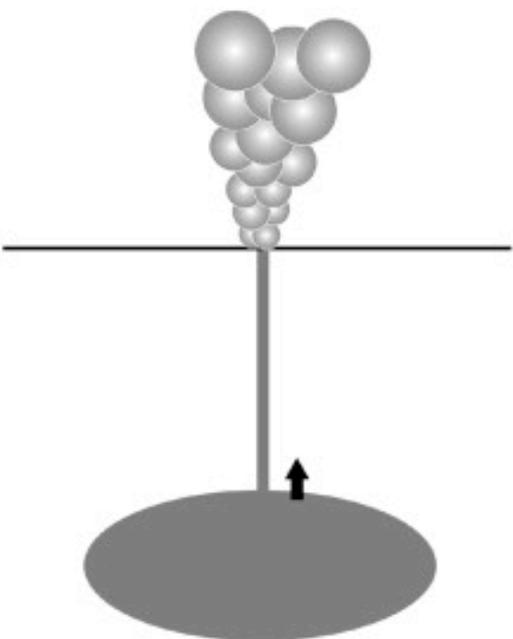


2) Partially emptied magma chamber



4) Formation of Crater Lake and Wizard Island

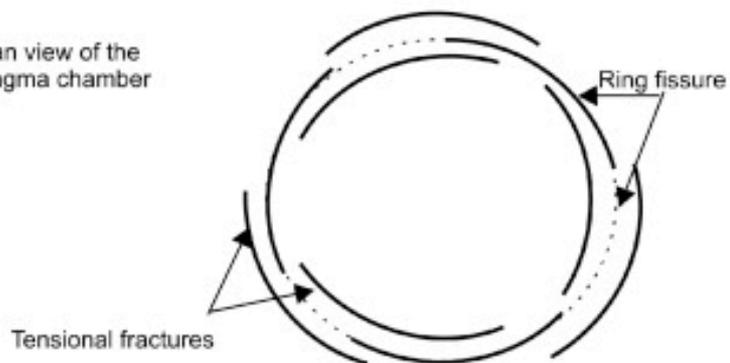




Plan view of the magma chamber

Central vent

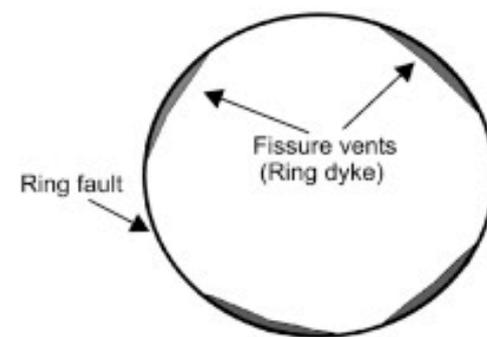
a)



Ring fissure

Tensional fractures

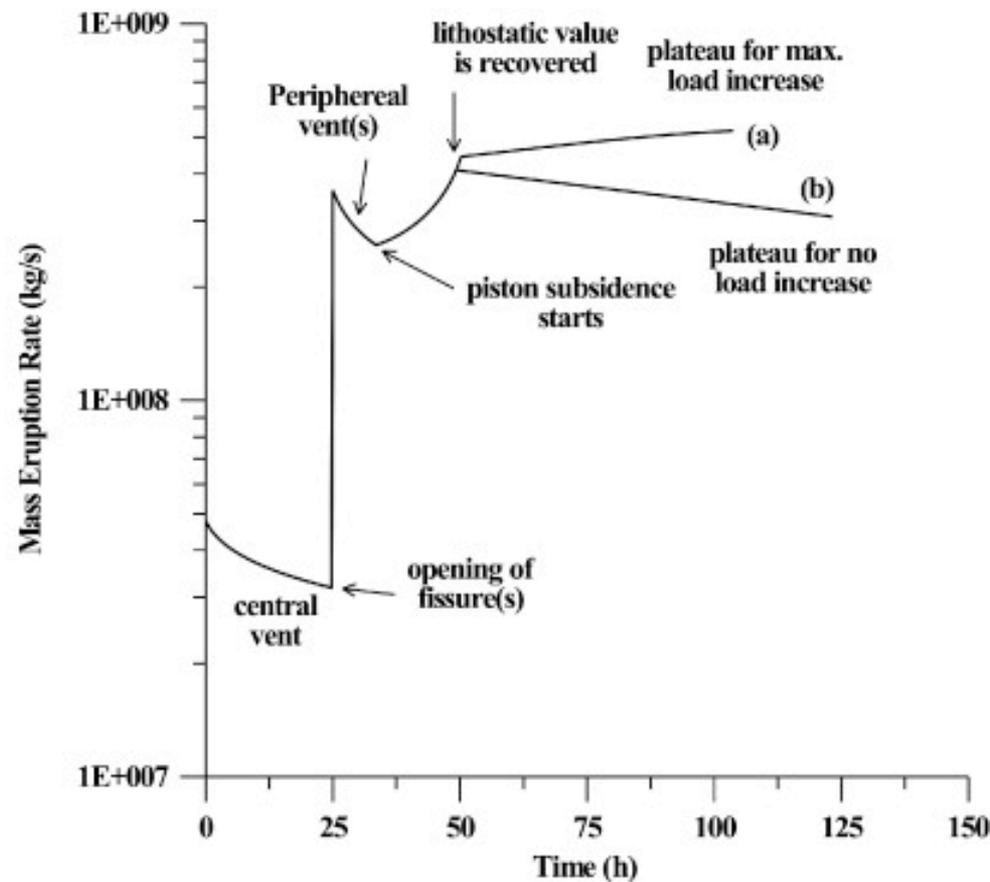
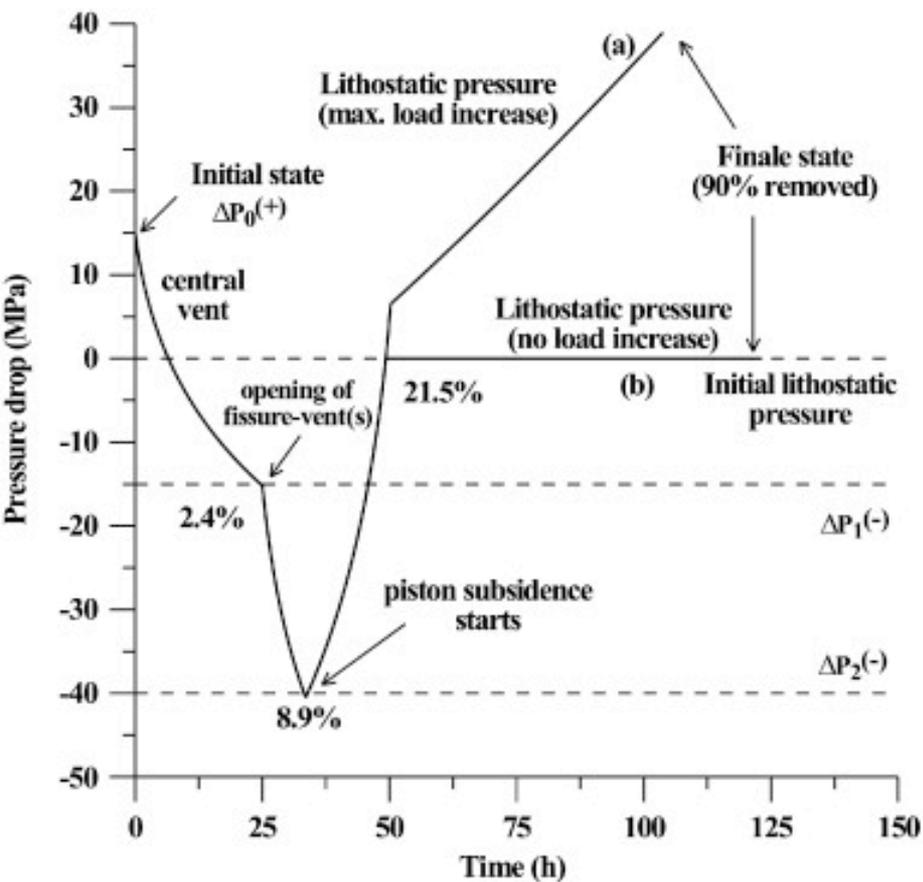
b)



Ring fault

Fissure vents (Ring dyke)

c)



Итак:

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