

Модели взрывного 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 взрывными 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

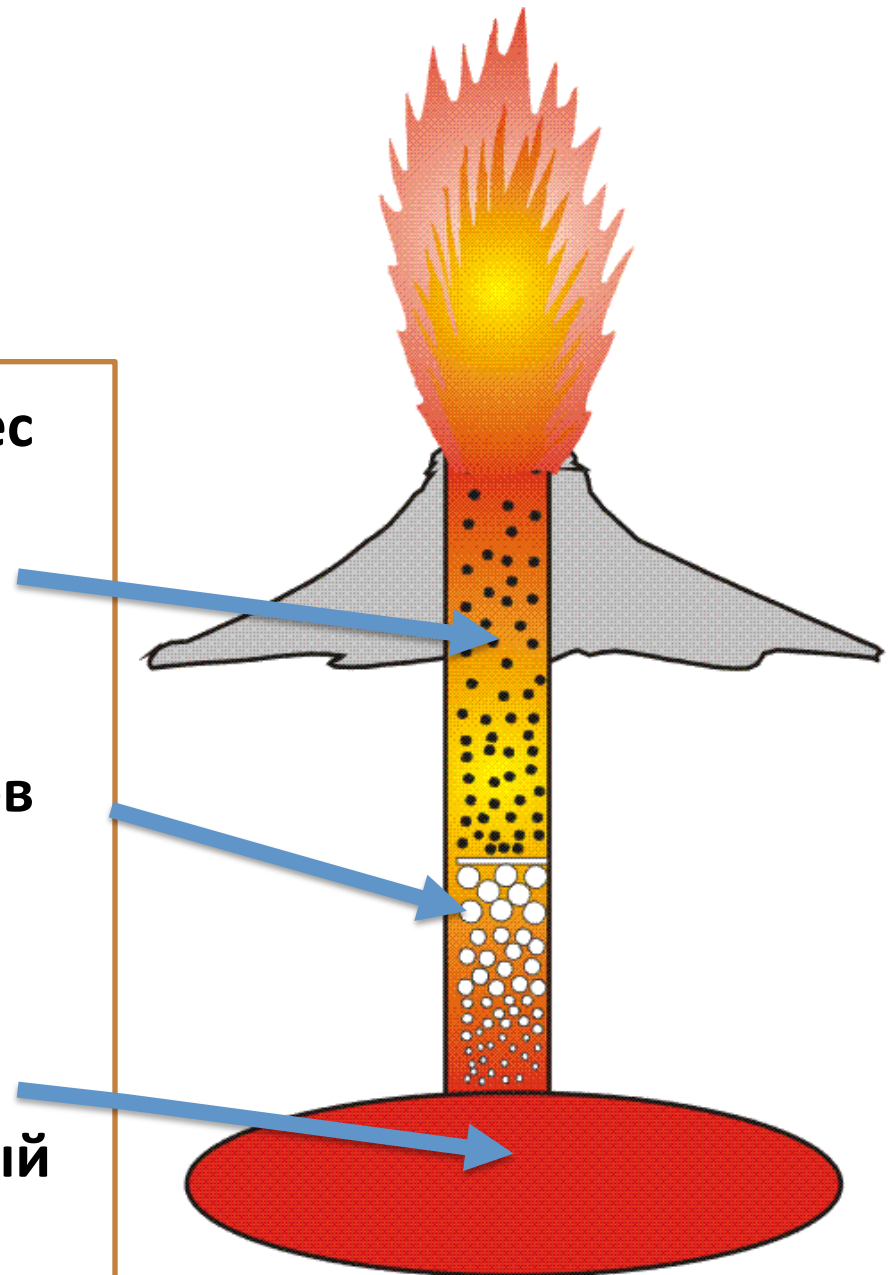
Вулкан Виарика, Чили

Эксплозивный режим

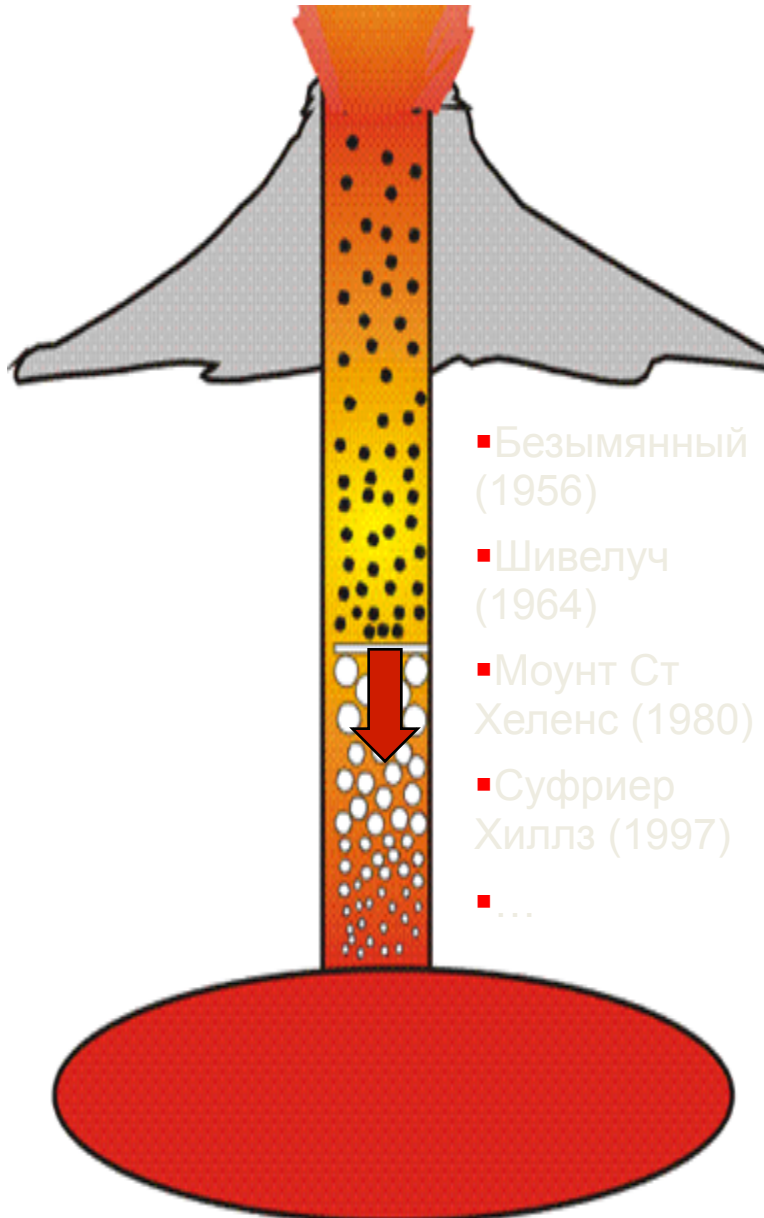
Газовзвесь: сопротивление и вес малы, до и сверх-звуковые скорости.

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

Очаг: Резервуар содержащий расплав, кристаллы, растворенный газ.



Моделирование взрывного извержения

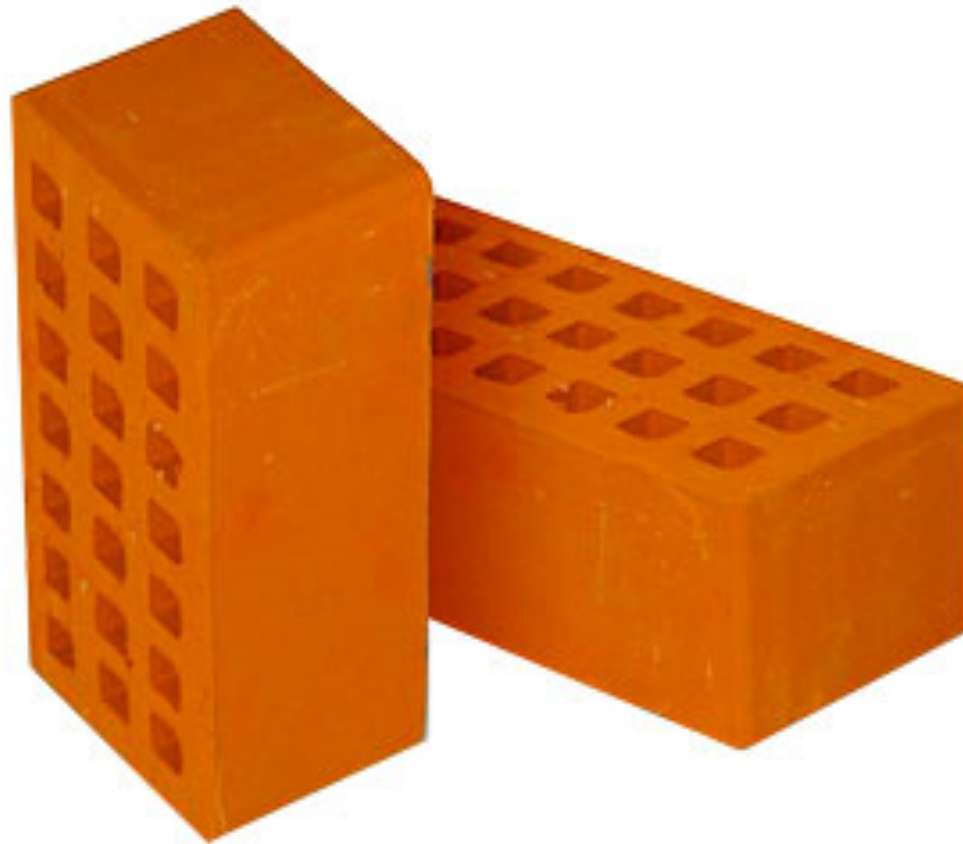


Течение газозвеси

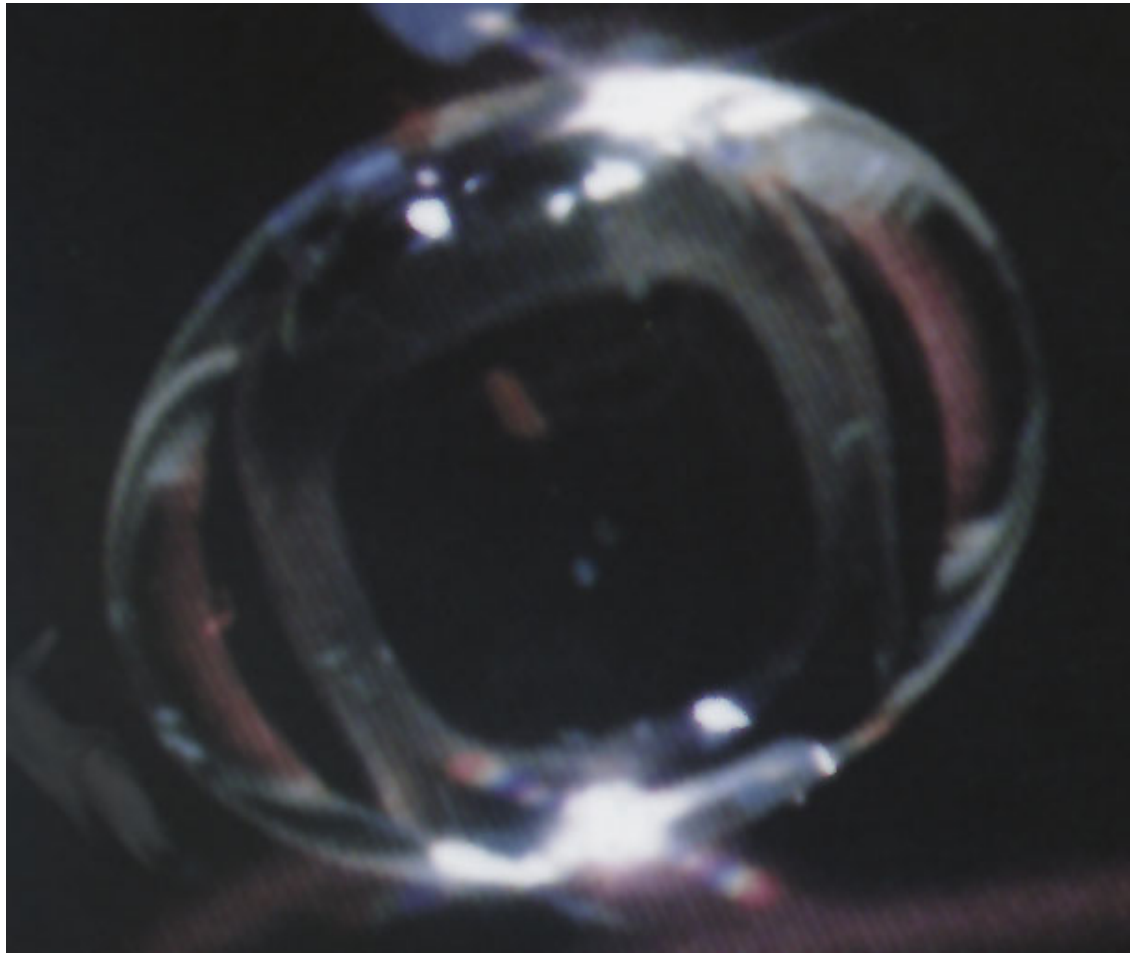
Условия фрагментации

Течение пузырьковой жидкости

Кирпичики модели

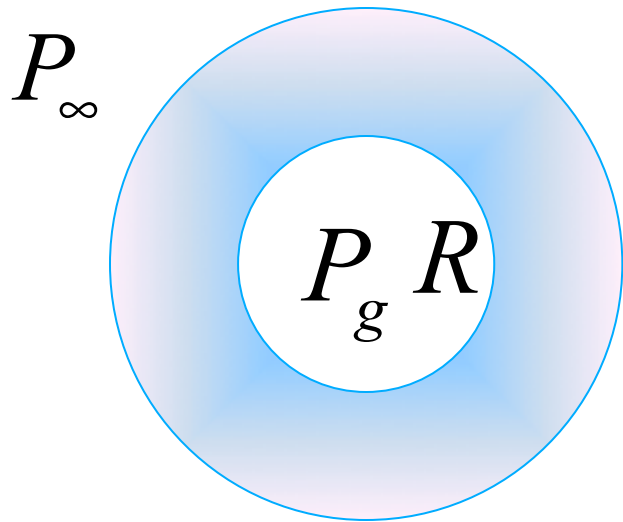


От пузырька к фрагментации



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

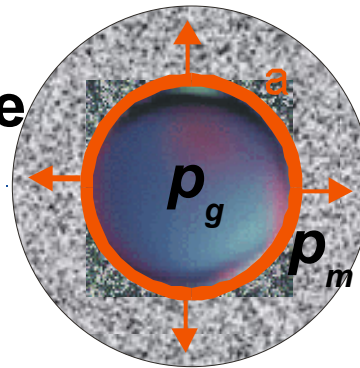


Rayleigh, John William
Strutt (1842-1919)

Модели фрагментации магмы

- ▶ Фиксированная объемная доля пузырьков (Спаркс 1978).

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



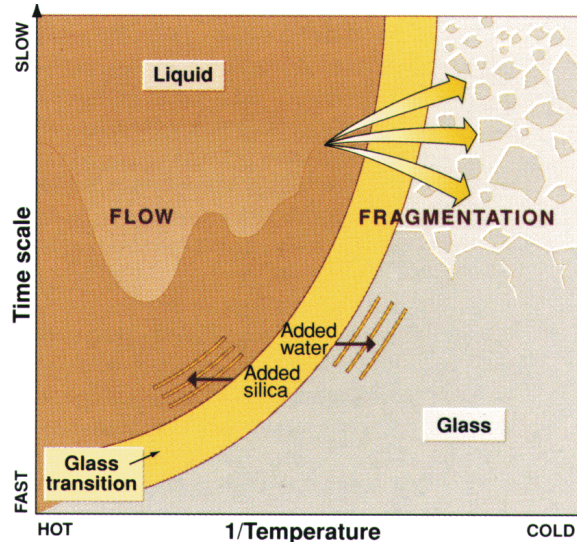
$$p_g - p_m = \frac{4\mu_m}{R} \frac{dR}{dt} +$$

малые члены

Критическая скорость

- ▶ растяжения Parale P, 1999

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



$$V(z + \delta z)$$

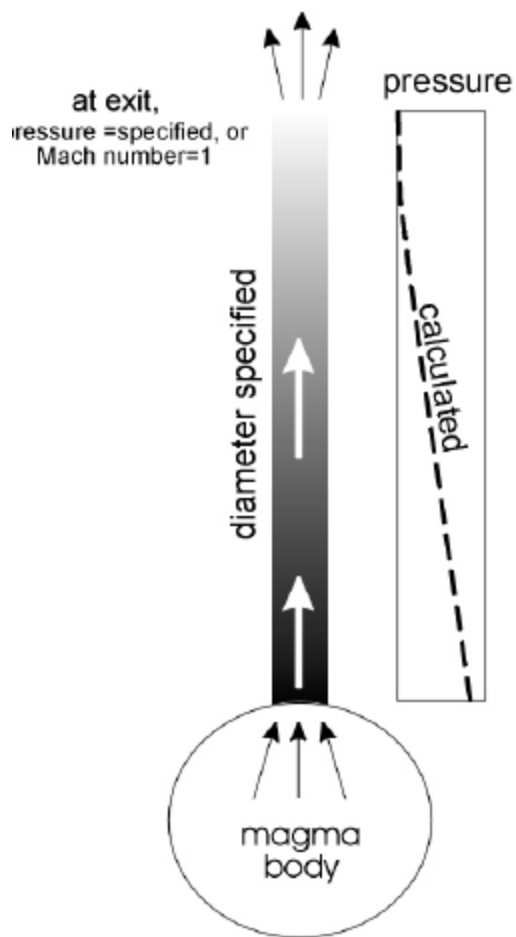
$$V(z)$$

$$\frac{dV}{dz} = \frac{V(z + \delta z) - V(z)}{\delta z}$$

Гидростатический или литостатический градиент давления?

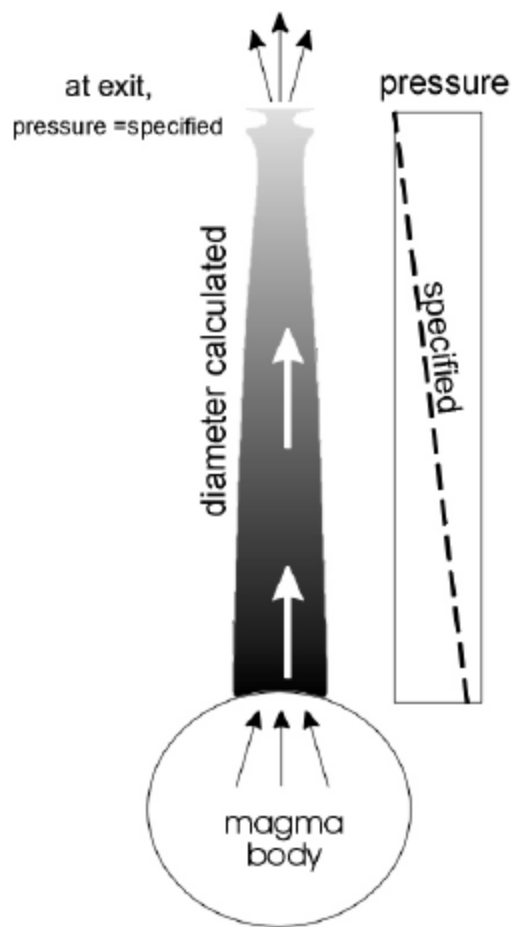
Option 1

specified conduit diameter
program calculates pressure profile

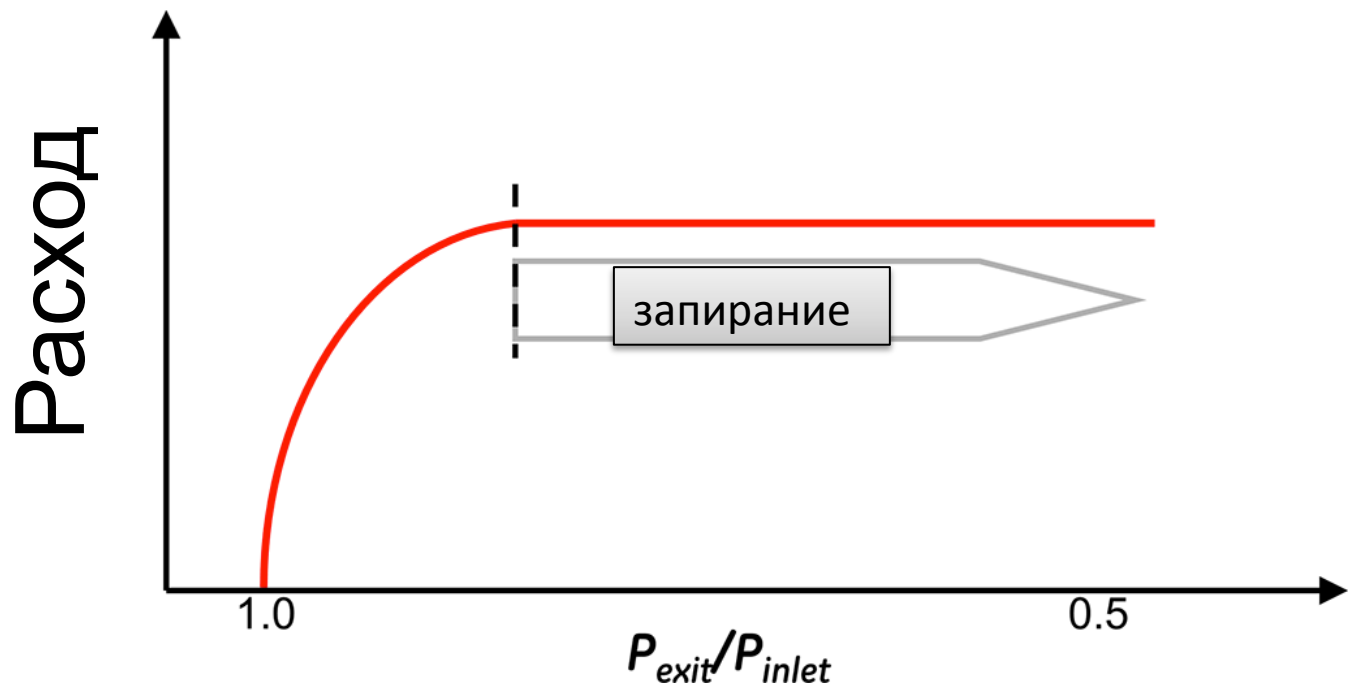
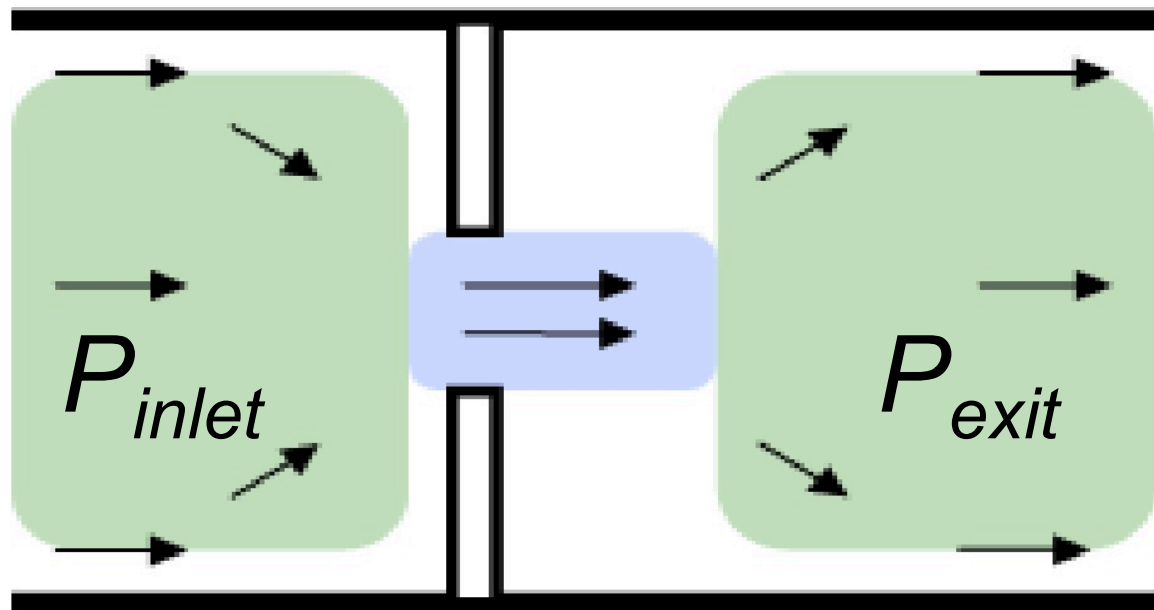


Option 2

specified pressure gradient
program calculates conduit geometry

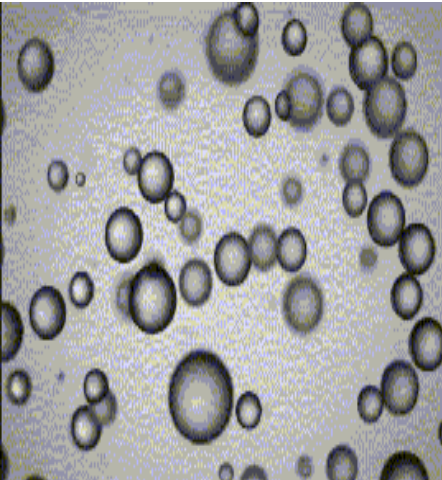


Условие
запирания

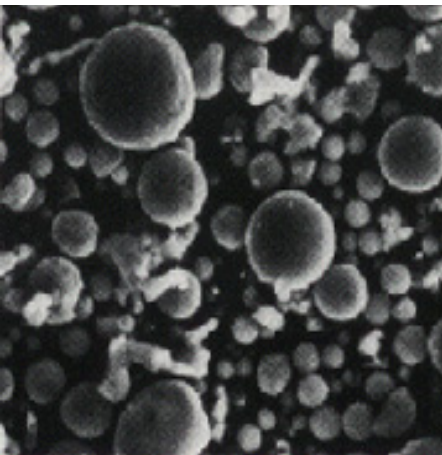


Описание дисперсных систем

пузырьки



частицы



Параметры многофазных сред

$$\text{Приведенная плотность} = \frac{m_i}{\Omega_{mixture}} = \rho_i$$

$$\text{Истинная плотность} = \frac{m_i}{\Omega_i} = \rho_i^0$$

$$\text{Объемная доля} = \frac{\Omega_i}{\Omega_{mixture}} = \alpha_i$$

$$\text{Массовая доля} = \frac{m_i}{m_{mixture}} = X_i$$

$$\Omega_{mixture} = \sum \Omega_i; \quad m_{mixture} = \sum m_i$$

Параметры смеси

$$\frac{\sum m_{ij} V_{ij}}{m_i} = V_i$$

Скорость отдельной фазы

$$\frac{\sum \rho_i V_i}{\rho_{mixture}} = V$$

Среднемассовая скорость смеси

$$\rho_{mixture} = \sum \rho_i$$

Уравнения неразрывности

+ Потoki массы

Уравнения импульса

+ Силовое взаимодействие

Плотность двухфазной среды

$$\rho = (1 - \alpha) \rho_l^0 + \alpha \rho_g^0$$

Через объемную долю газа

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x_g}{\rho_g} + \frac{1 - x_g}{\rho_l}$$

Через массовую долю газа



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}

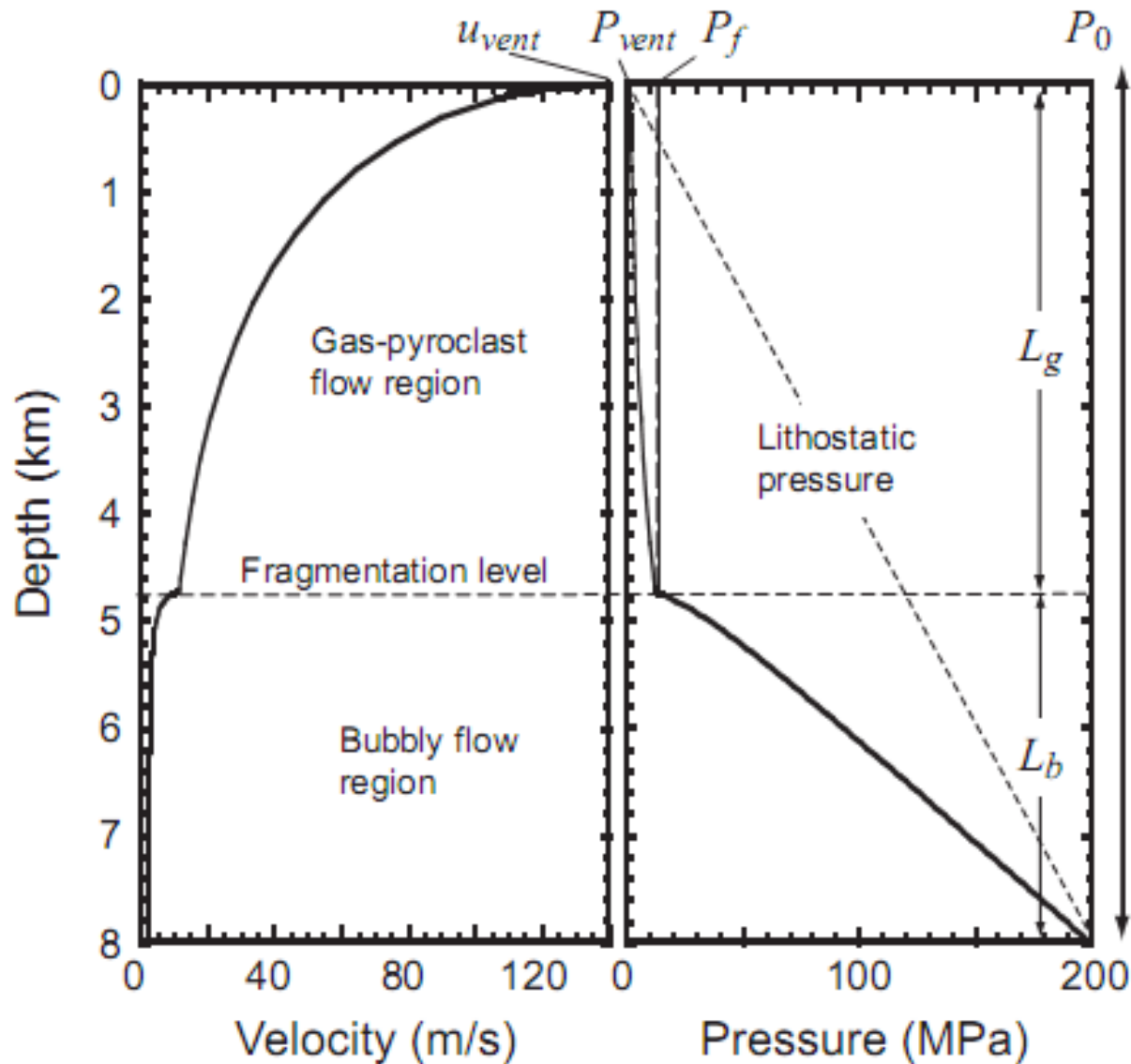
Z=L (атм.) : Условие
запирания или
атмосферное давление

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	2.3	2283	0.83	3.4
Bubbledrive	particle: 201 150 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

Эксплозивные/экструзивные

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



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

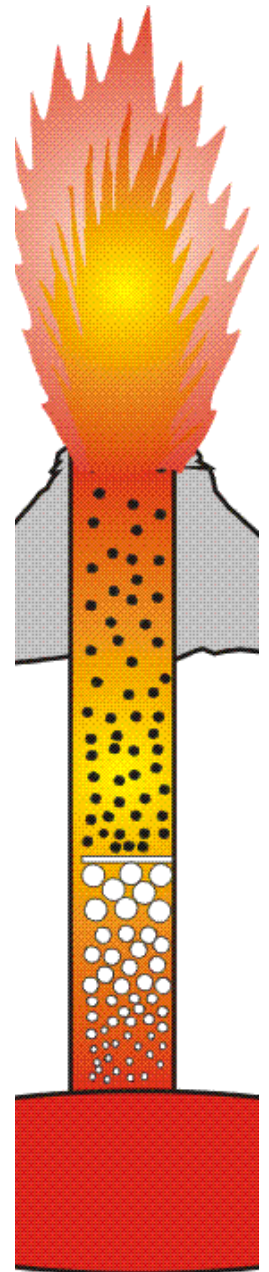


$$P_{ch} - P_a = -\int_{ch}^a \left(\rho V \frac{dV}{dz} + \rho g + f_c \right) dz$$

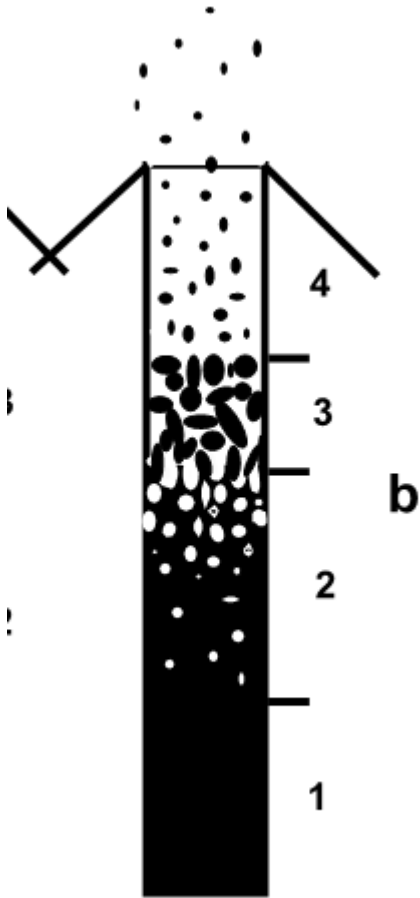
Инерция

вес

сопротивление

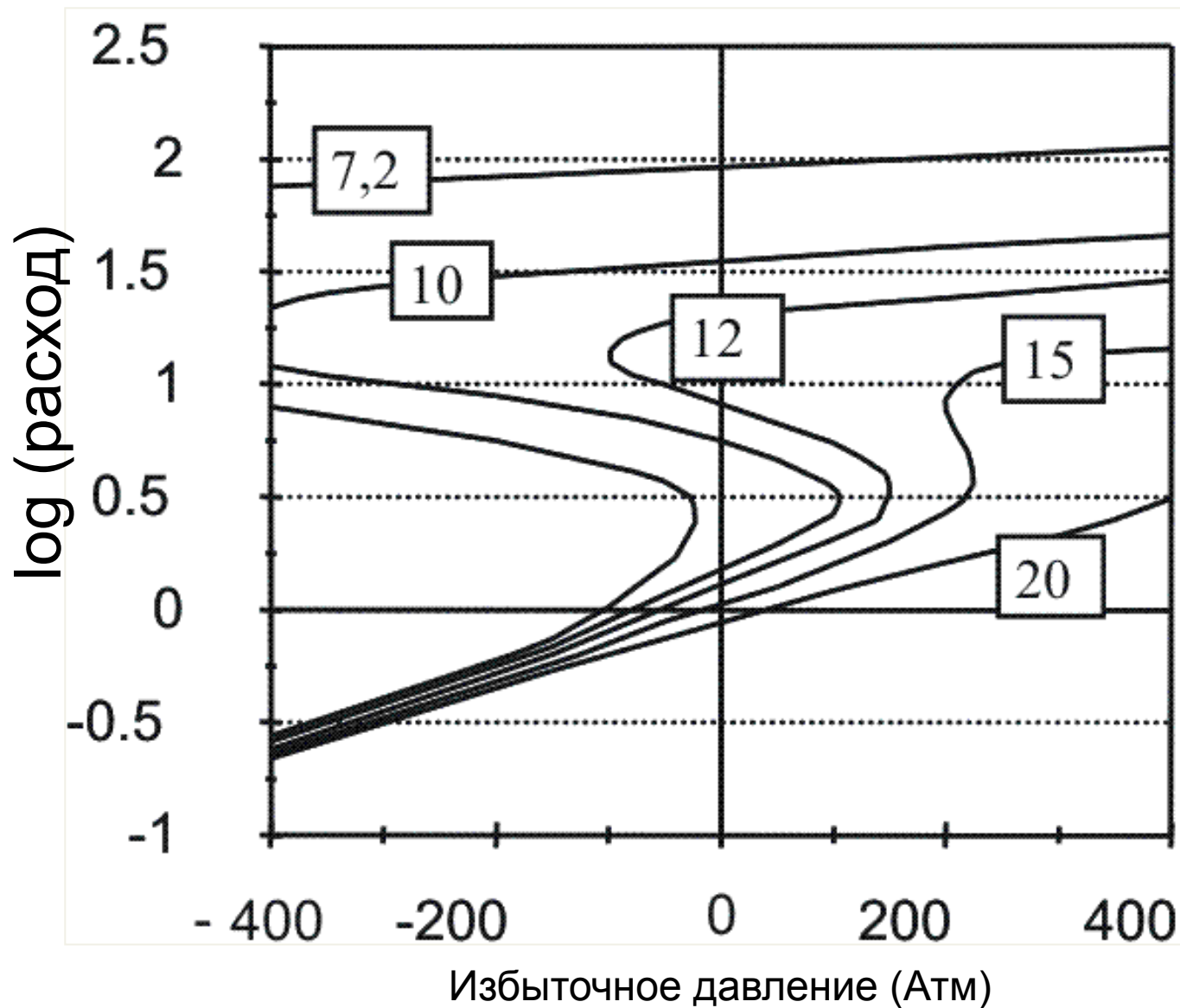


Учет газоотделения (Слезин, 1983)



- 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

Зависимость расхода от давления



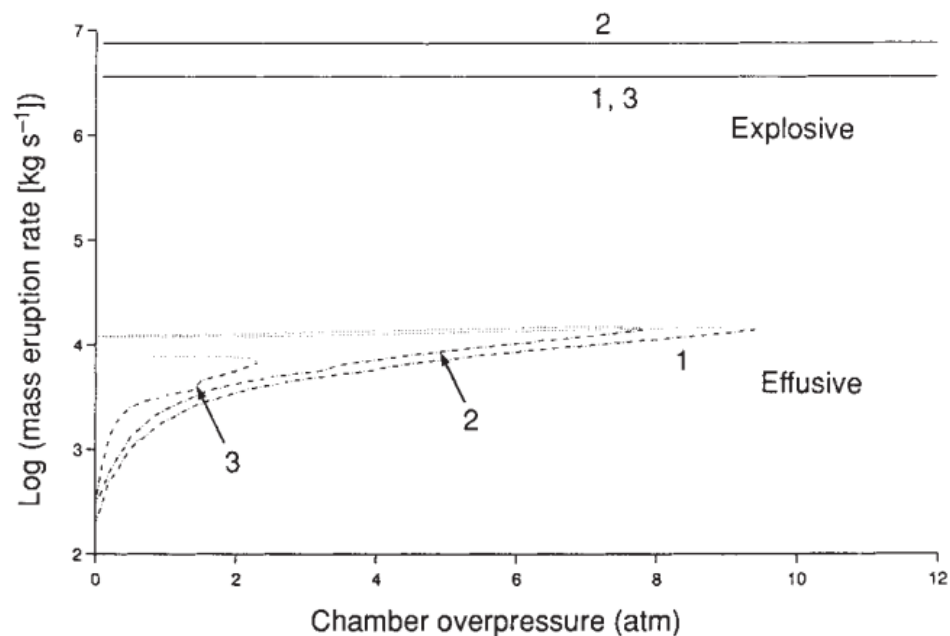
Слезин (1983)



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!

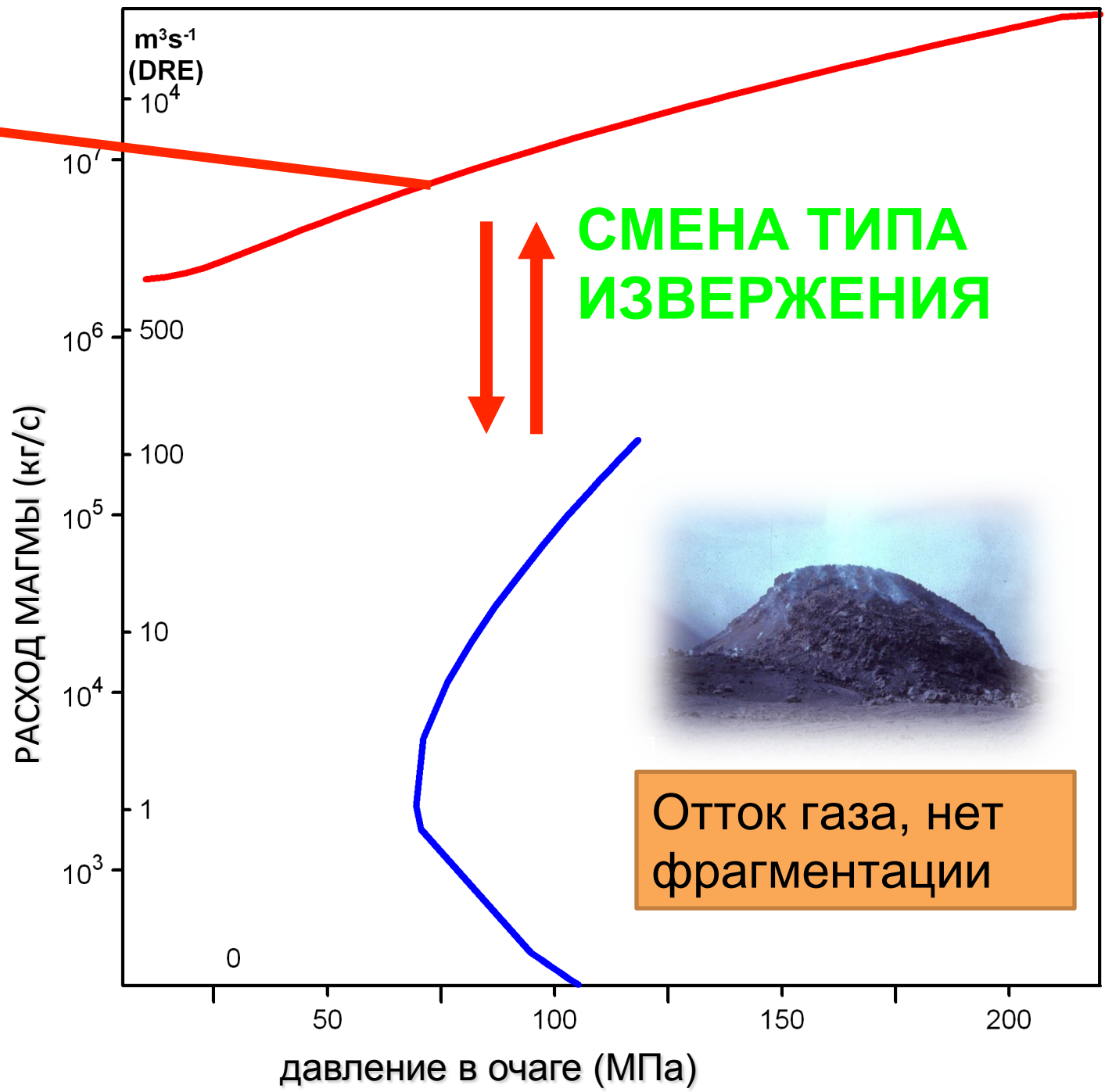
Учет фильтрации и избыточного давления

- 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

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

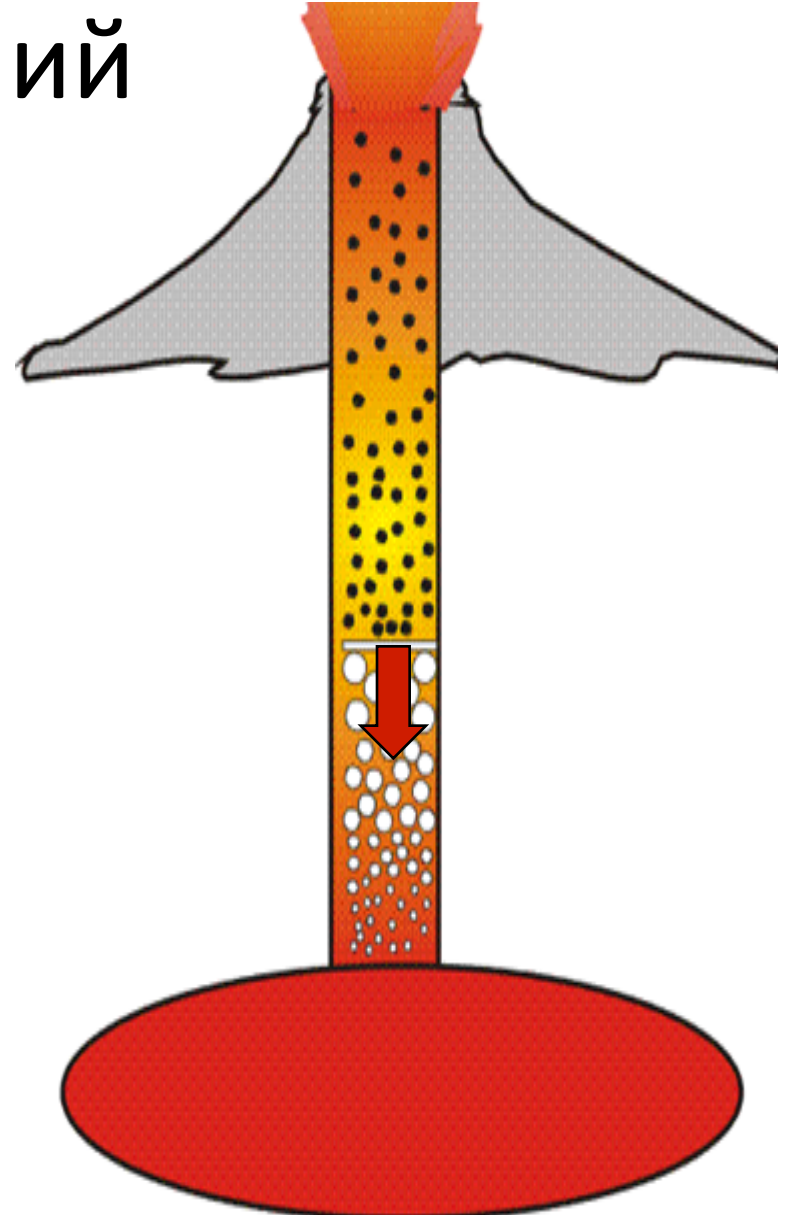
$$p_m = (1 - \alpha) p_l + \alpha p_g$$

Роста пузырька

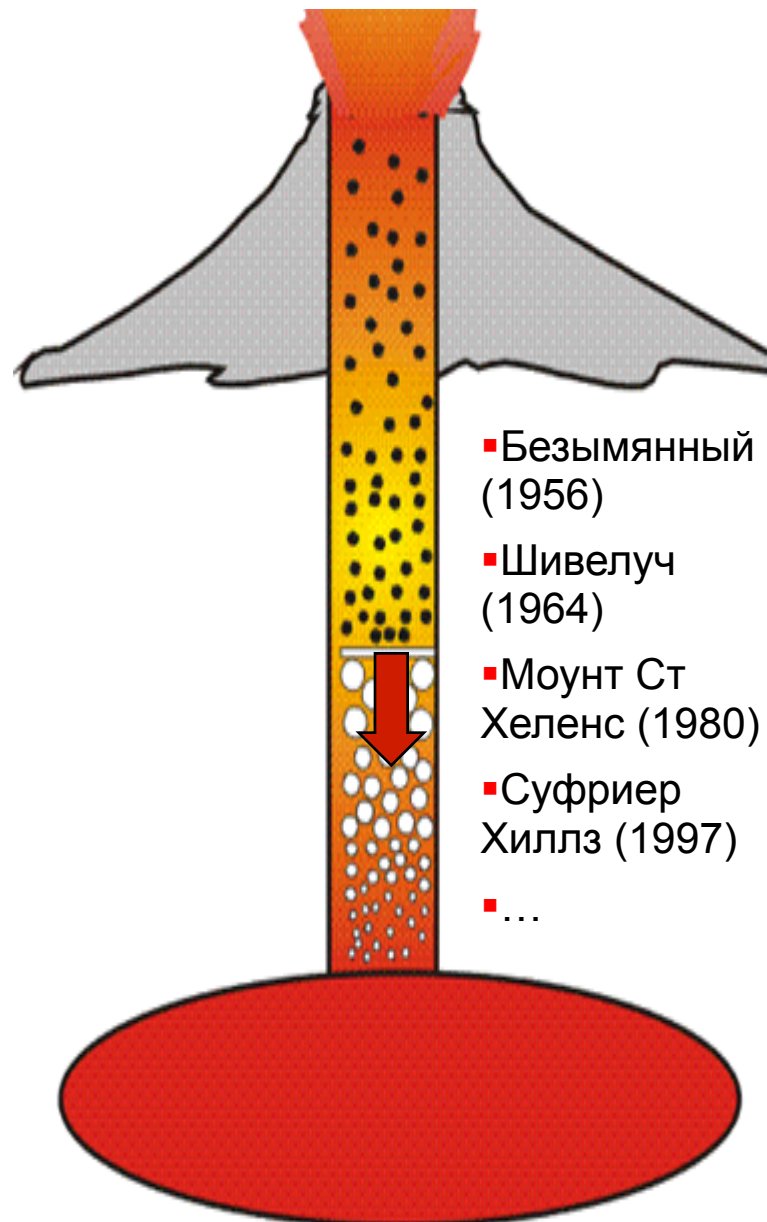
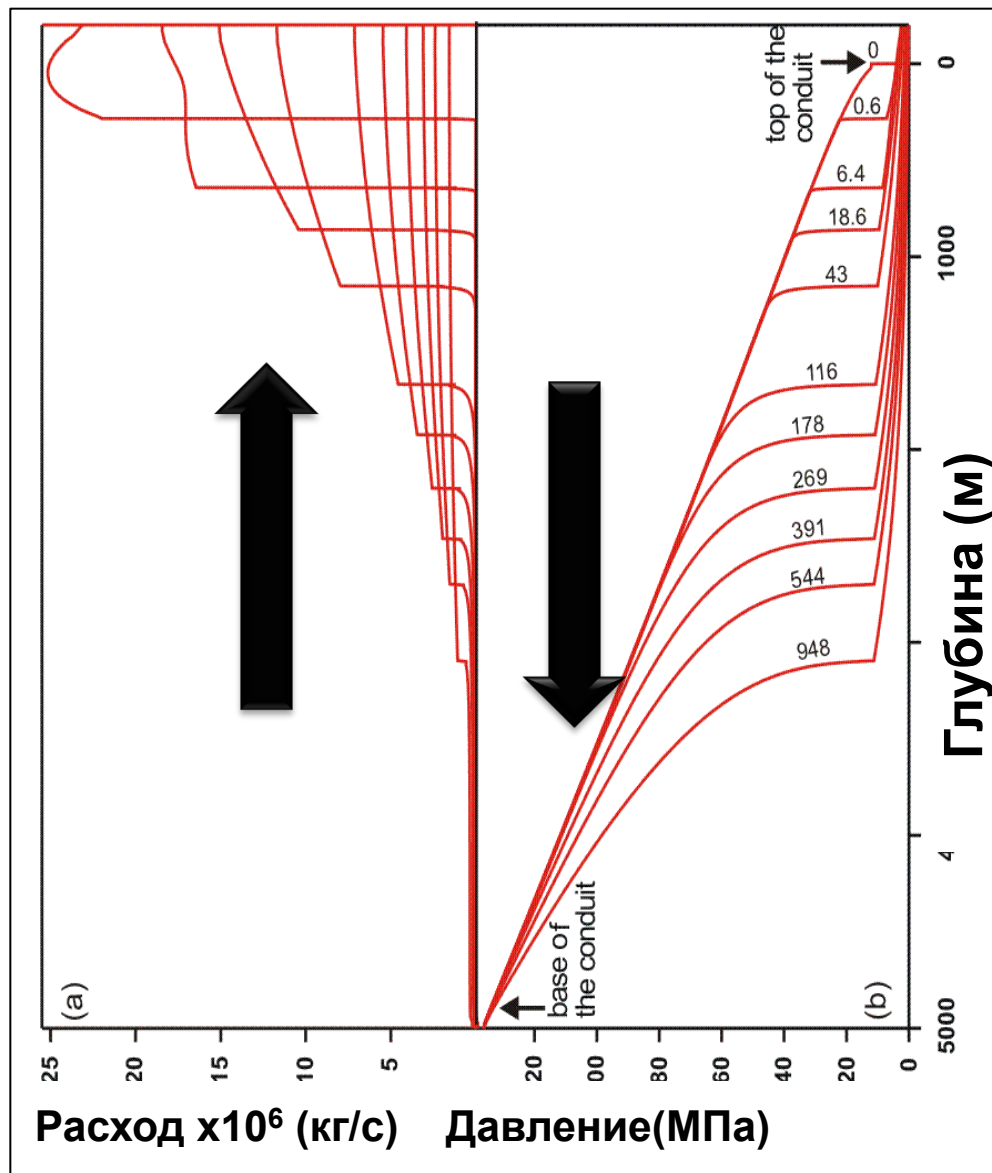
$$\frac{\partial a}{\partial t} + V \frac{\partial a}{\partial x} = \frac{a}{4\mu_m} (p_g - p_l)$$

Критерий фрагментации

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

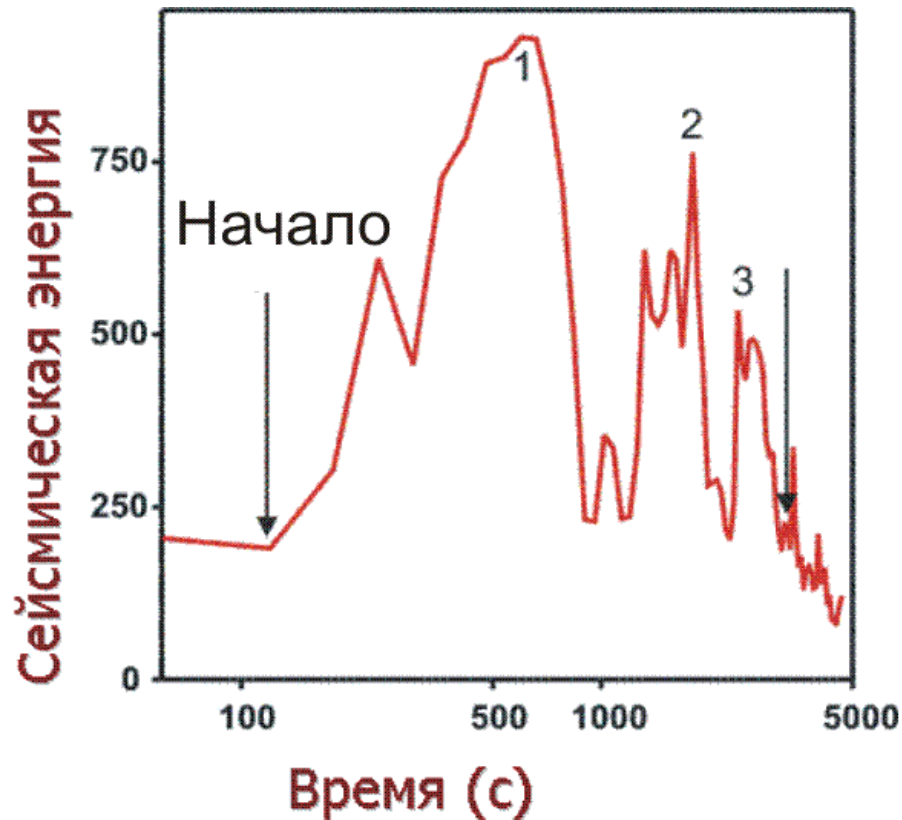
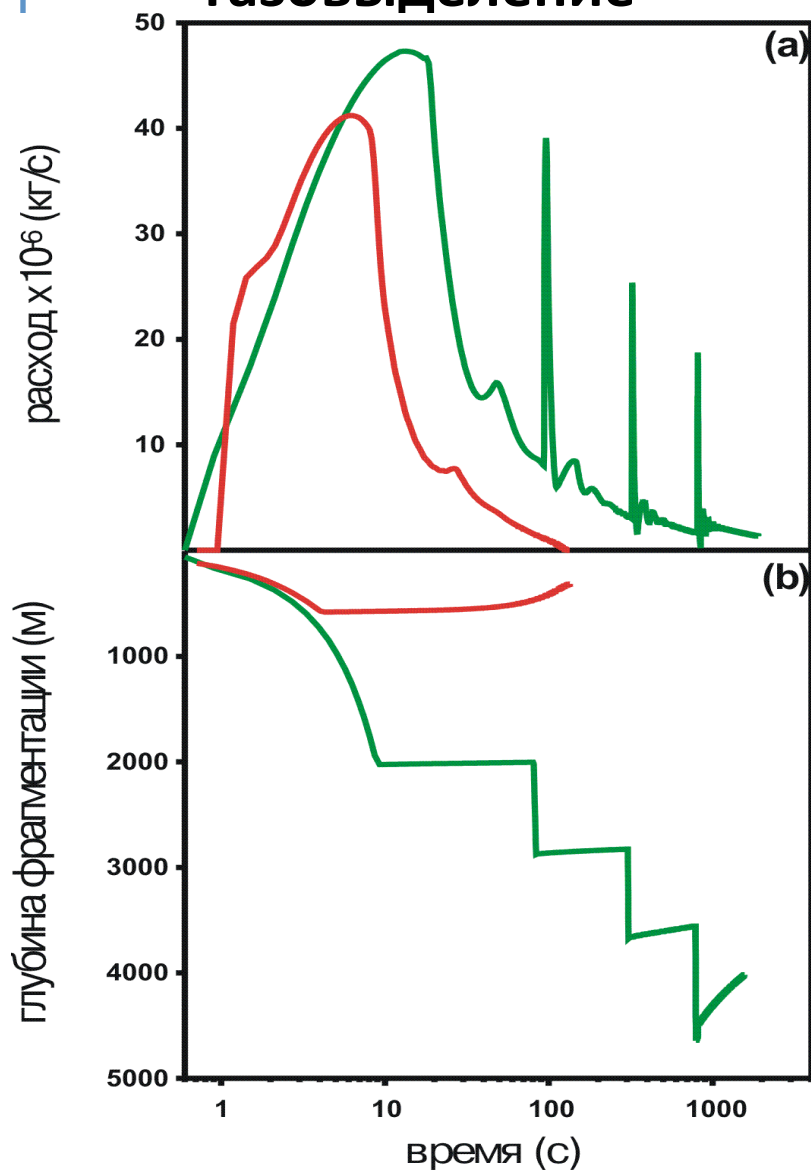


Развитие взрывного извержения



Изменение расхода магмы и глубины фрагментации

слабое и **интенсивное**
газовыделение

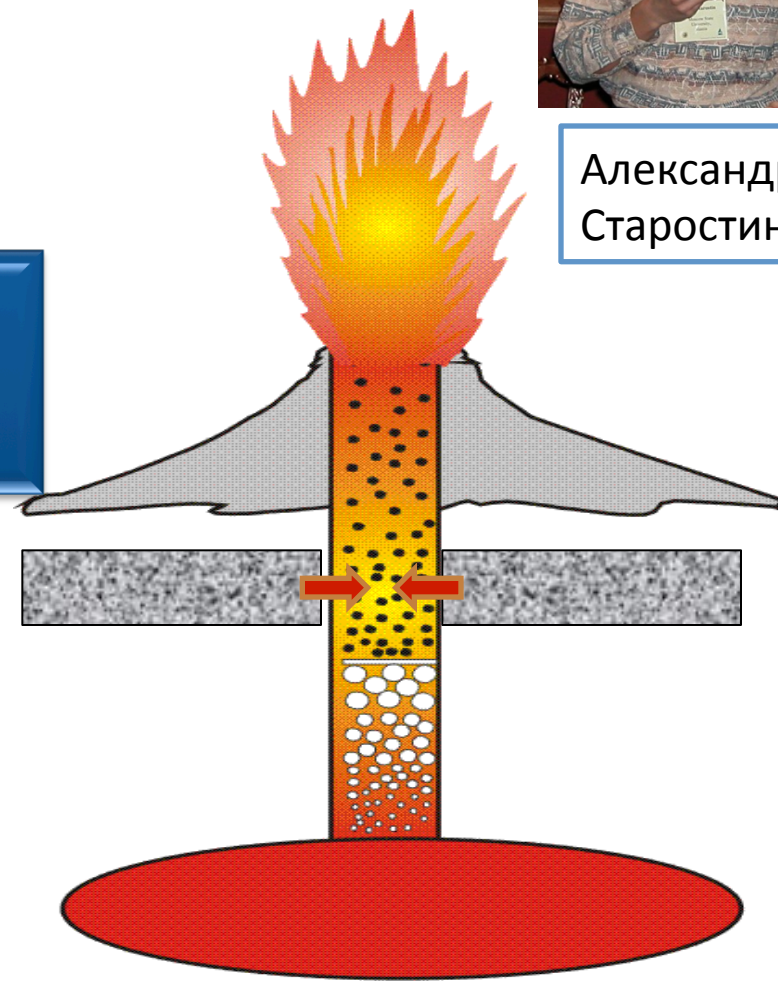


Фреатомагматические извержения

Условия
на границе

Течение в
канале

Течение в
пласте

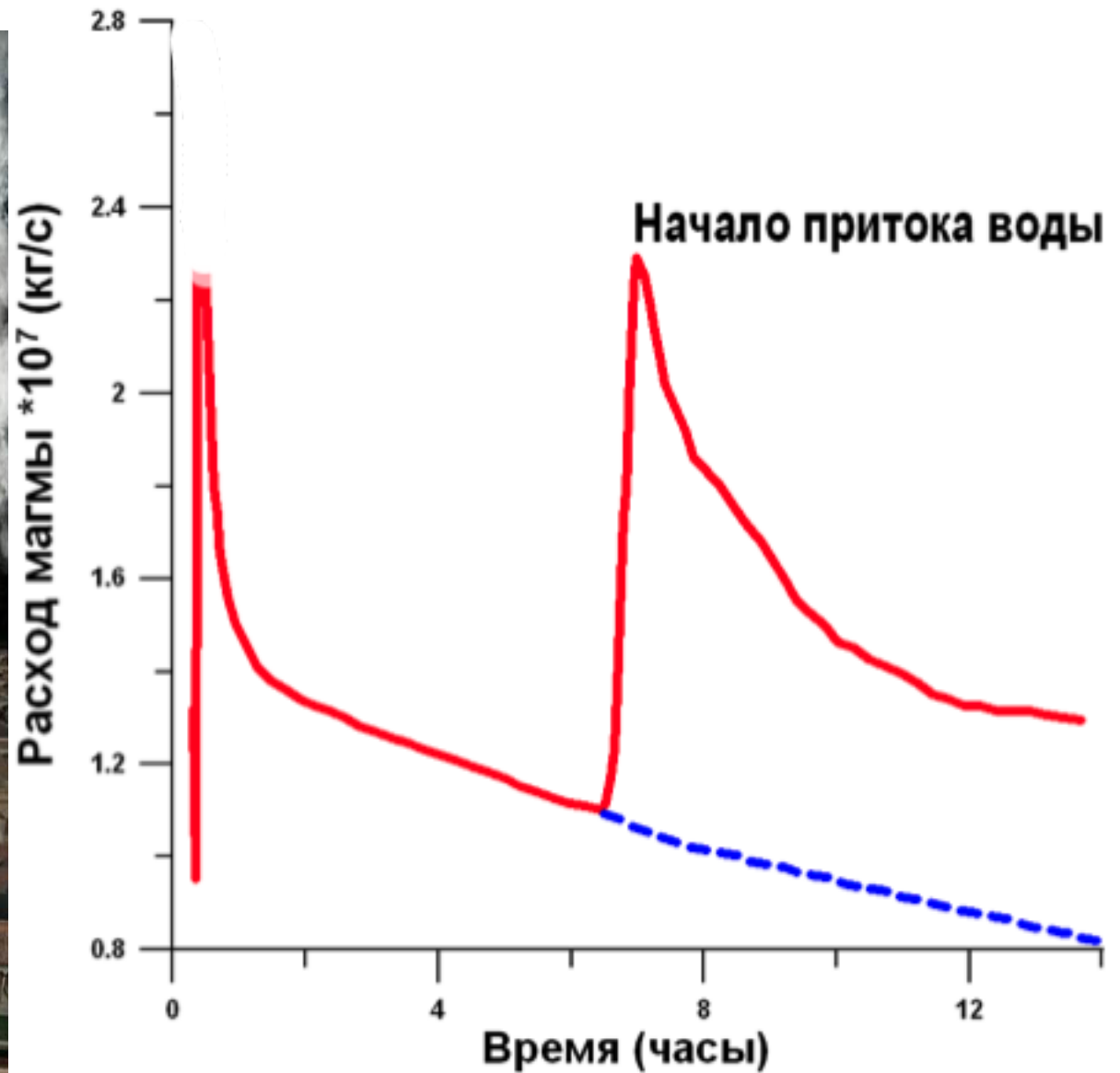


Александр
Старостин

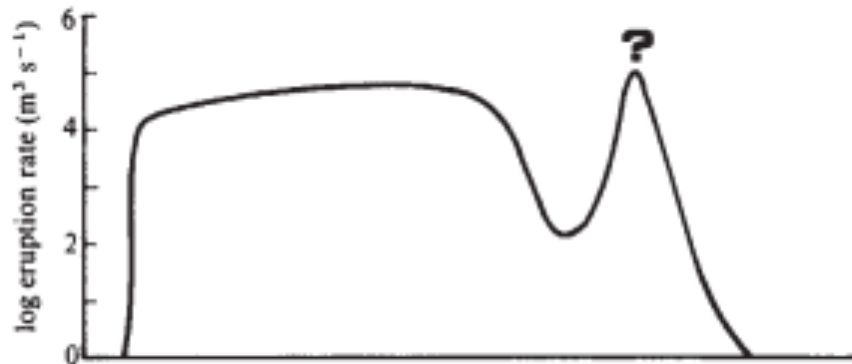
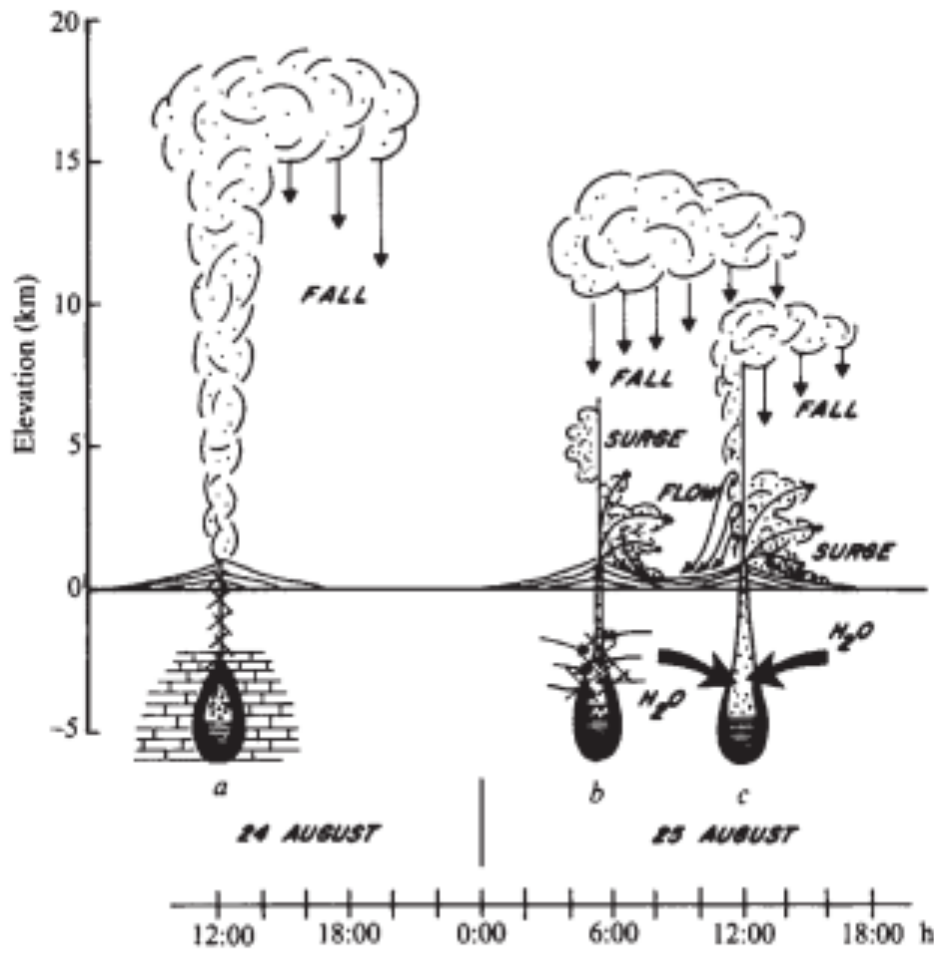
Важность моделирования и мониторинга



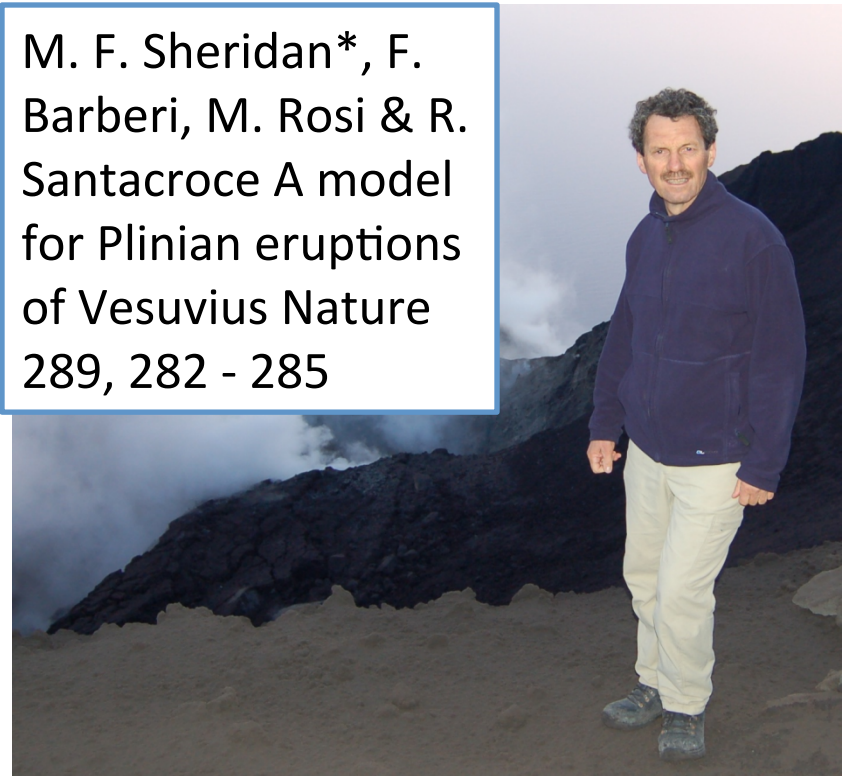
Усиление извержения Везувия, 79 г. н.э.



Геологическая интерпретация



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



ConFlow: conduit flow

Magma composition

Specify Melt Composition or Click on a Magma Type

Weight Percent Oxides (anhydrous)

50.045	SiO ₂
13.638	Al ₂ O ₃
10.102	Fe ₂ O ₃
1.247	FeO
7.268	MgO
11.7	CaO
2.83	TiO ₂
2.207	Na ₂ O
0.511	K ₂ O
0.17	MnO
0.282	P ₂ O ₅
100	Total

Kilauean basalt

St. Helens Dacite

Location of your melt on a Silica-Alkali plot

Crystal phases

Si content (vol. % of melt): 3

Density (kg/m³): 3185.9

Specific Heat (J/kg K): 1702.5

Main crystal phase:

- olivine
- clinopyroxene
- plagioclase
- hornblende
- orthopyroxene
- quartz
- sanidine

gas solubility | viscosity

Thermodynamic properties

Conduit properties

Exit program

Input Properties

Model Input

conduit diameter at top (m): 10

final pressure: 3.1013

Execution options:

- Specified gross-sectional area
- Specified pressure gradient

Iteration control:

- Satisfy upper boundary conditions
- Ignore upper boundary conditions

Temperature control:

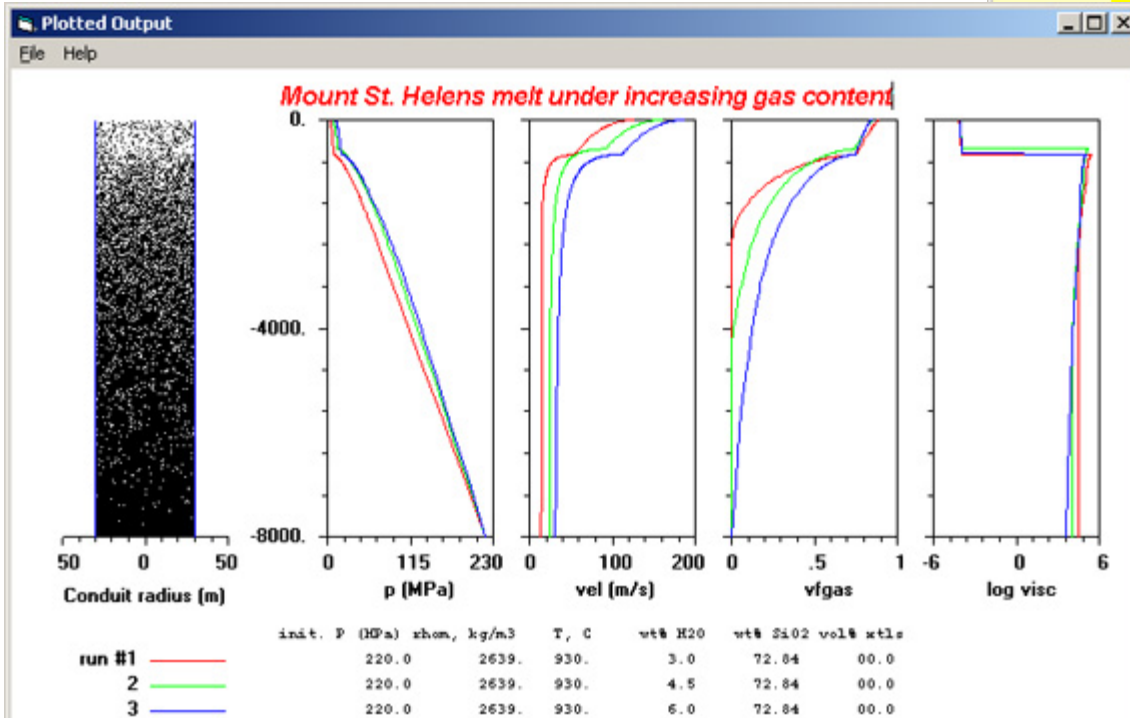
- Constant temperature
- Variable temperature

Name of output file: run/out.txt

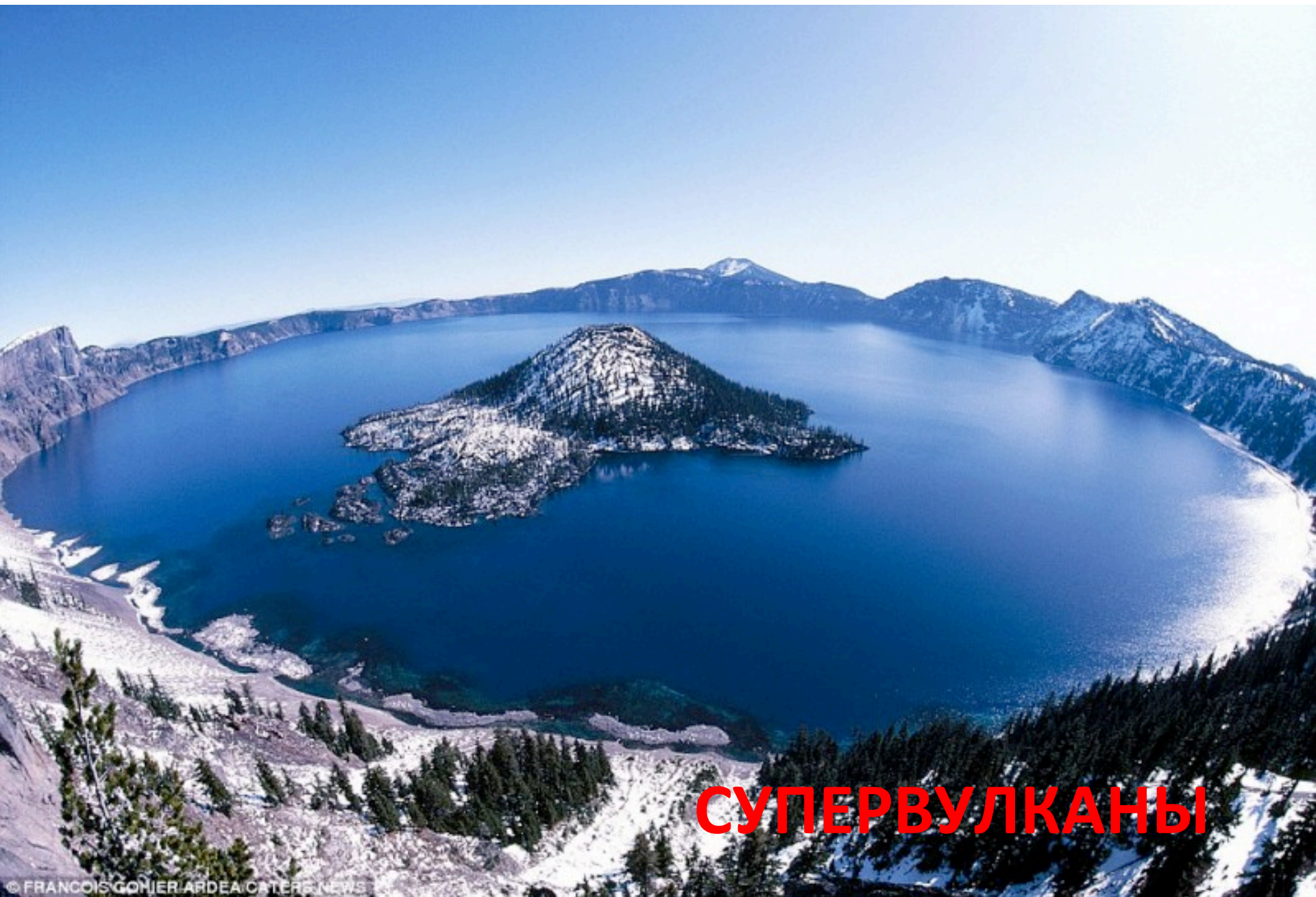
input pressure (MPa): 27

gravitational acceleration (m/s²): 9.81

Run model | view output | View input data | close



Jerry Mastin



СУПЕРВУЛКАНЫ

Йеллоустон



- Геологическое общество США ожидало пробуждения дикой природы Йеллоустоуна не раньше чем через 20 000 лет. Но на основании новейших данных компьютерные программы выдали неожиданный результат — следующая катастрофа ожидается в 2075 году. Однако через малое время выяснилось и вовсе, что события развиваются с устрашающей быстротой. Результат был скорректирован ещё раз. Страшная дата извержения Йеллоустоунского вулкана приблизилась, но дабы не вызвать панику, она не разглашается.
- Недавний научный анализ расплавленной породы под Йеллоустонским национальным парком в США, показало, что извержение может произойти без какого-либо внешнего возможного влияния. Ученые ранее полагали, что многим извержениям супер-вулканов предшествуют землетрясения которые ломают земную кору и открывают путь для магмы. Но новое исследование показывает, что это может произойти спонтанно в результате увеличения давления .
- Некоторые зарубежные источники утверждают, что в кальдере вулкана наблюдается бурление потоков магмы.

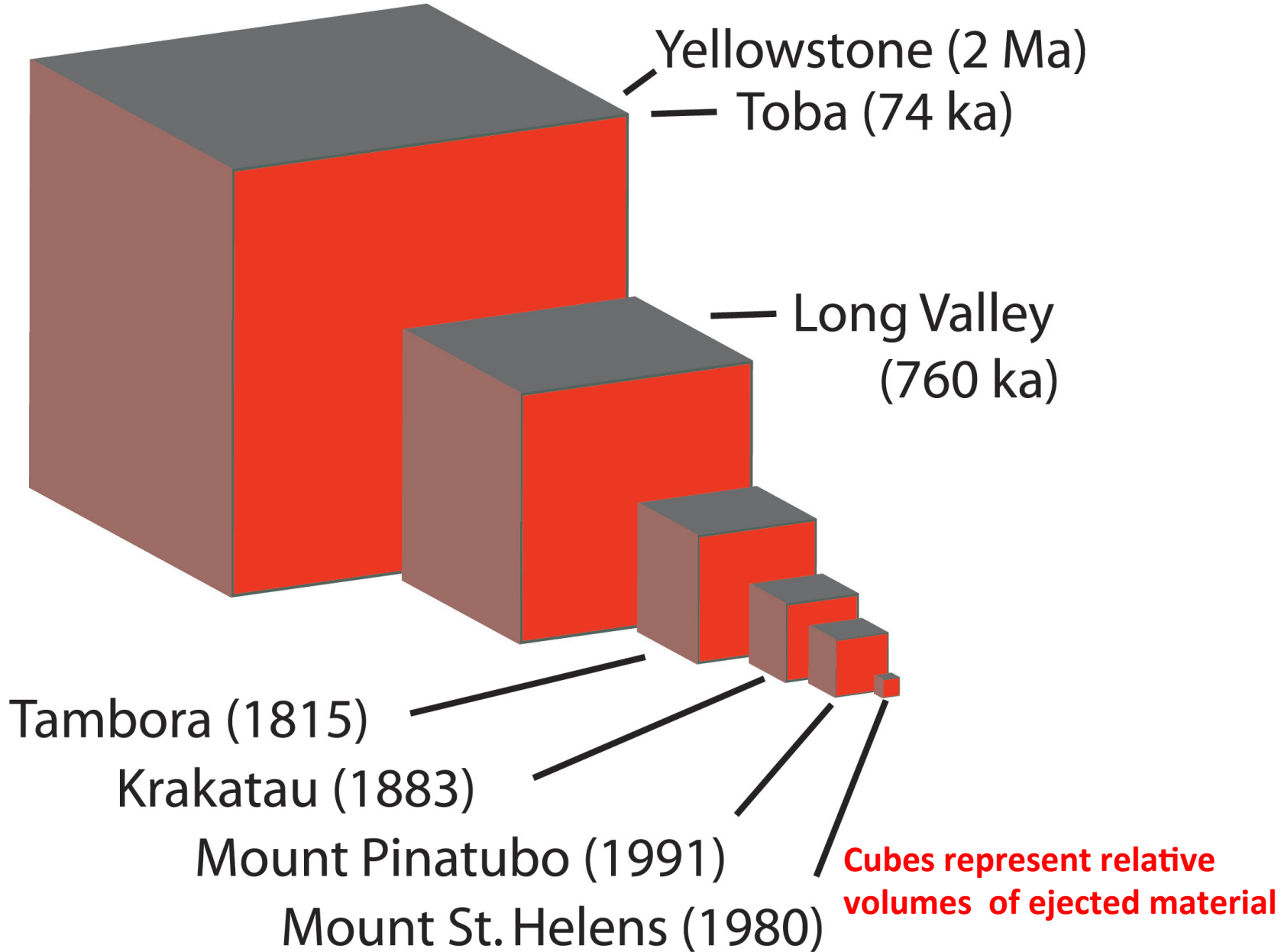


Figure modified from Miller and Wark, 2008. Elements, Vol 4, Issue 1, page 12

Тоба 74,000 лет назад

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

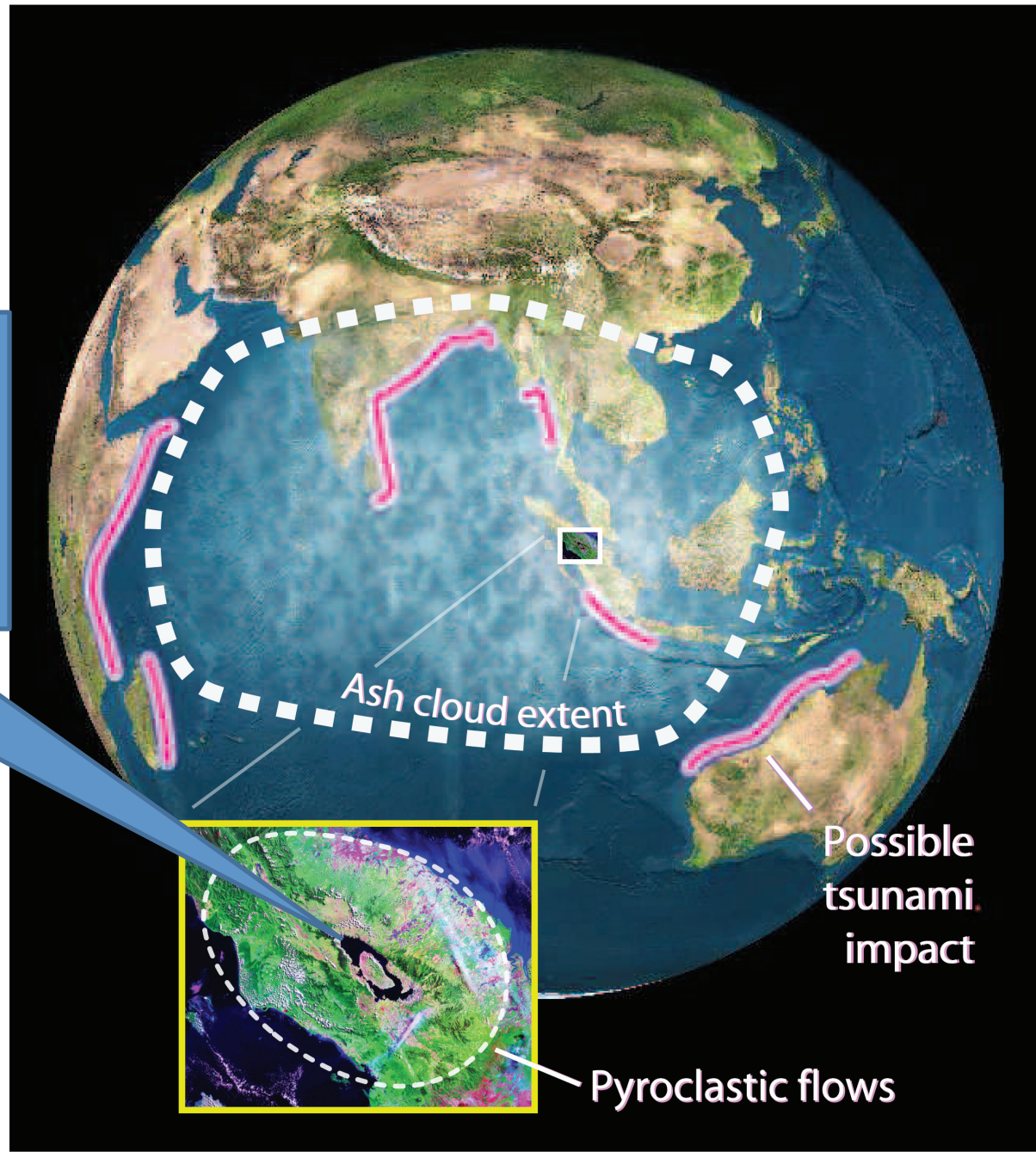
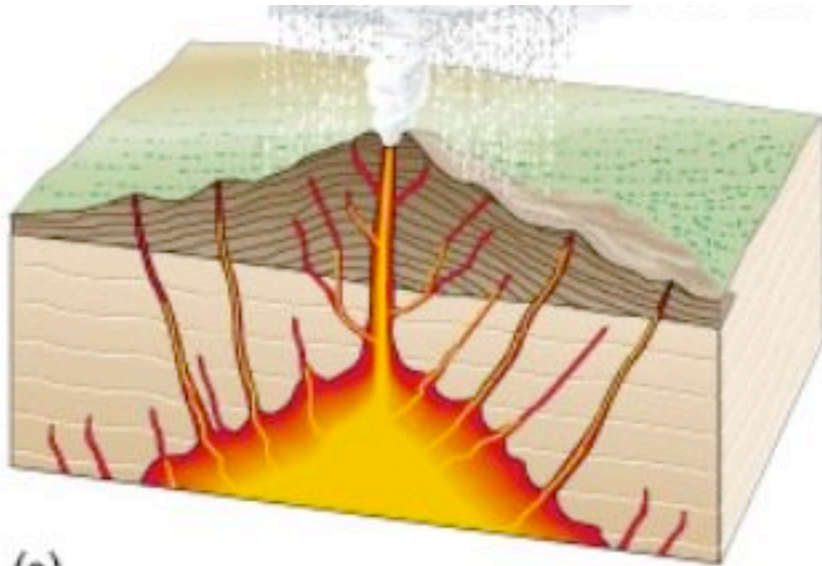
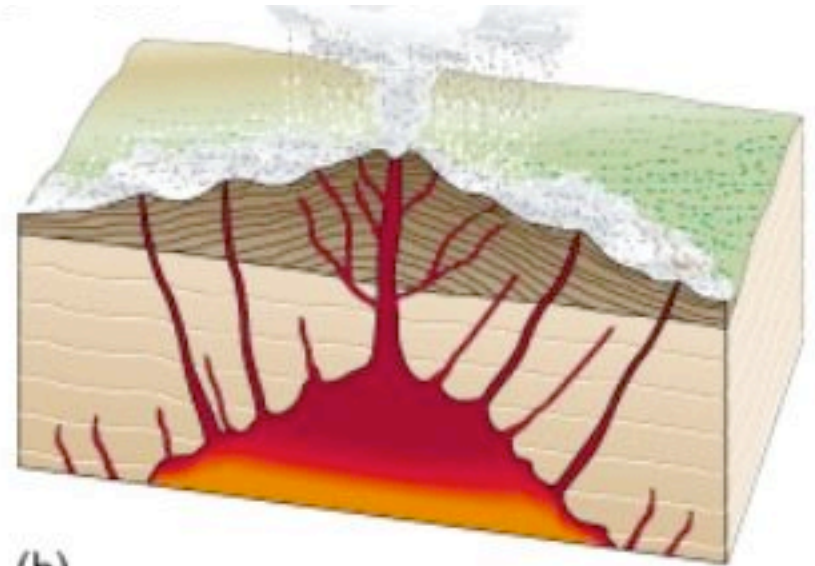


Figure modified from Miller and Wark, 2008. Elements, Vol 4, Issue 1, page 13

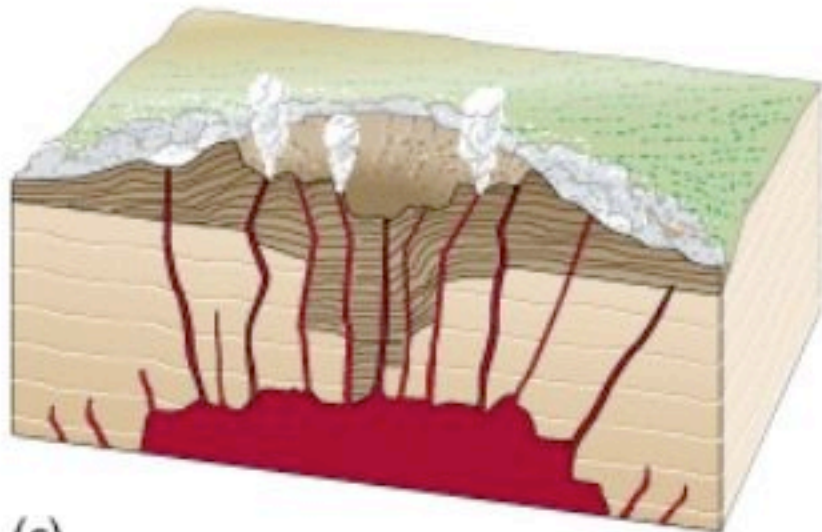
Кальдерообразующие извержения



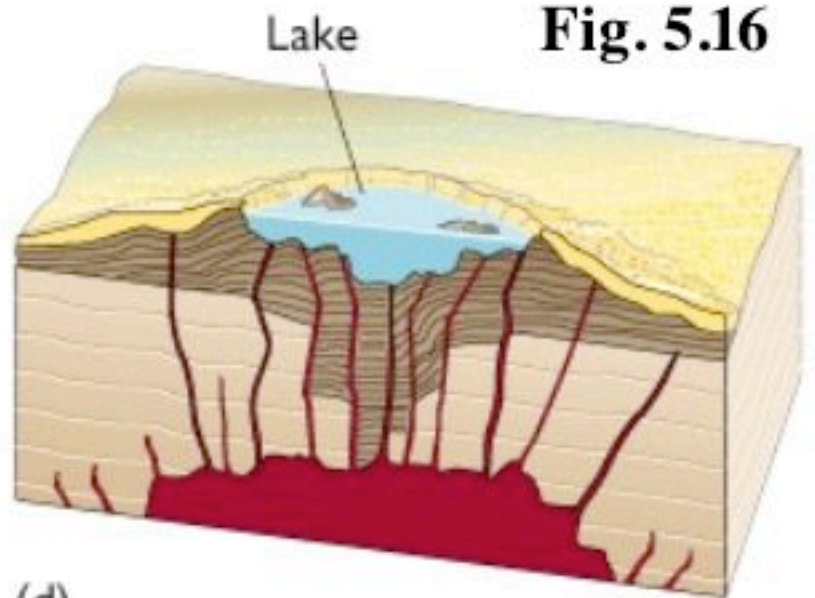
(a)



(b)

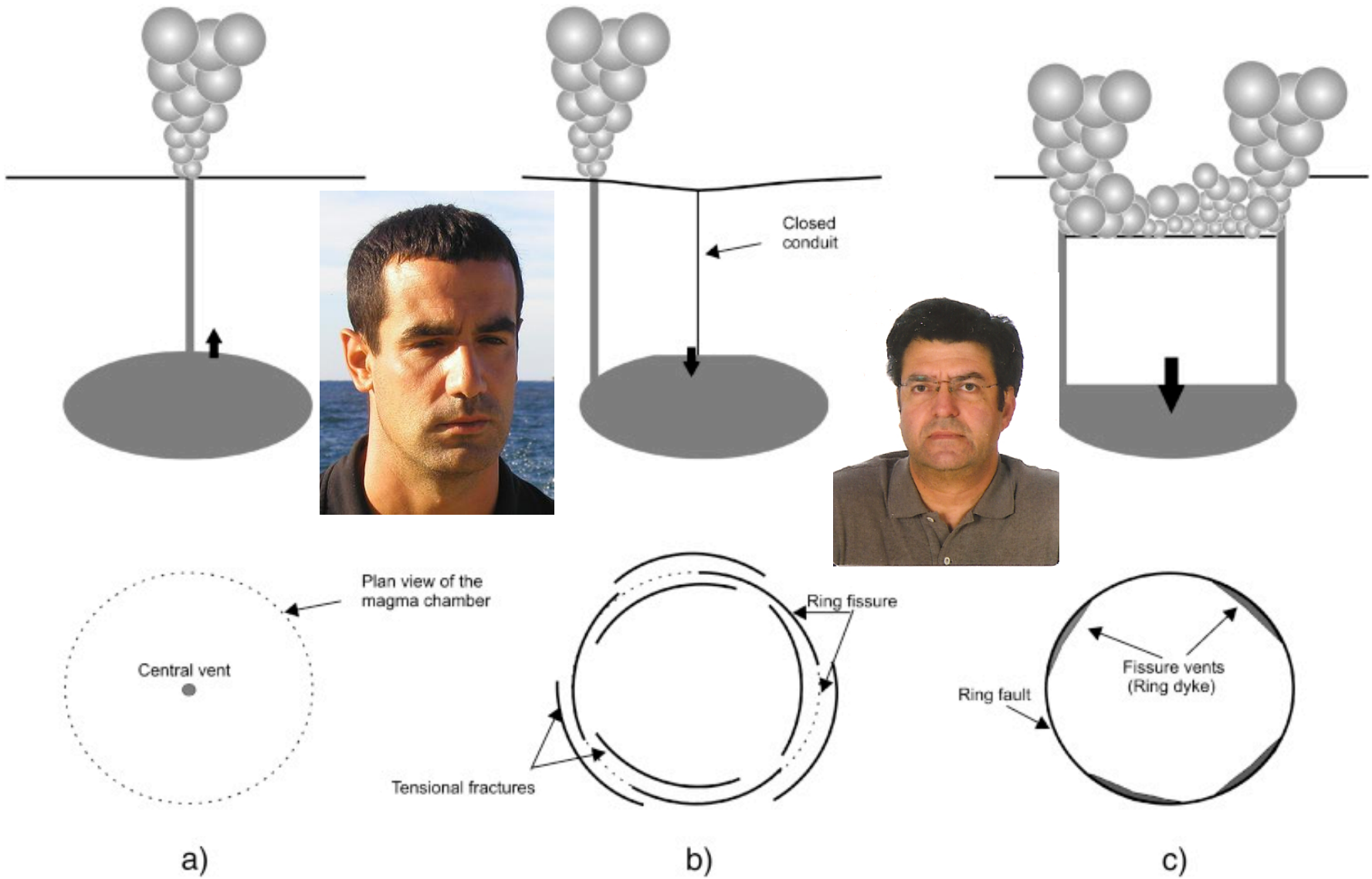


(c)

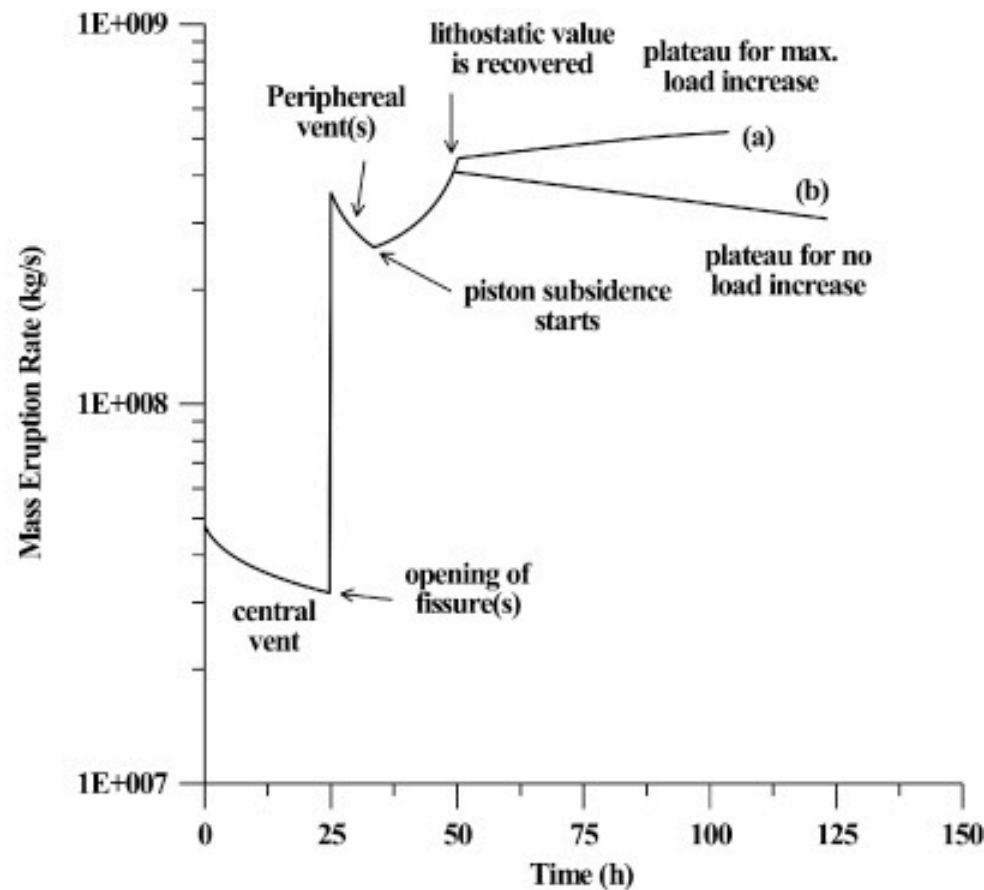
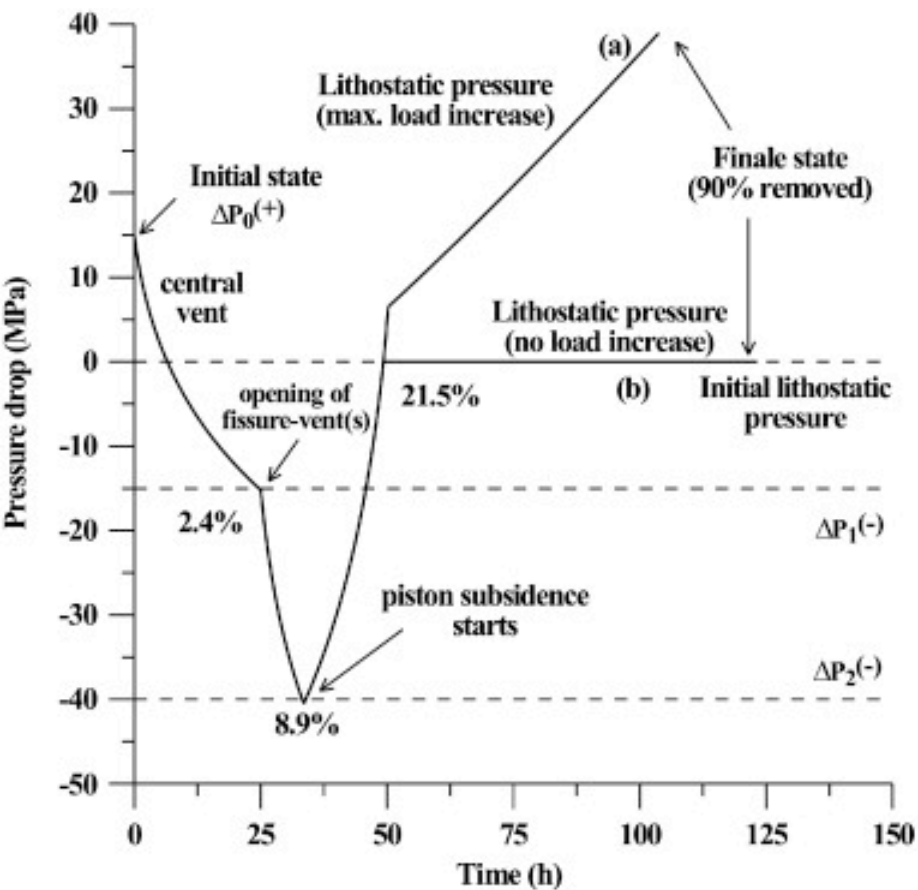


(d)

Fig. 5.16



A. Folch, J. Martí, Time-dependent chamber and vent conditions during explosive caldera-forming eruptions, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 280, Issues 1–4, 15 April 2009, Pages 246-253



Итак:

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