

Модели экструзивных извержений.

- Циклические режимы роста лавовых куполов.
- Кинетика кристаллизации магмы, вызванная дегазацией.
- Модель с кусочно-постоянной вязкостью. Стационарное решение. Неустойчивость. Выход на стационар и циклический процесс.
- Учет нелинейной реологии магмы и кинетики кристаллизации.
- Распределения кристаллов по размерам

МЕЛЬНИК ОЛЕГ ЭДУАРДОВИЧ

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

Страница курса в Интернете:

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

Soufrière Hills volcano, 1995-2014(?)



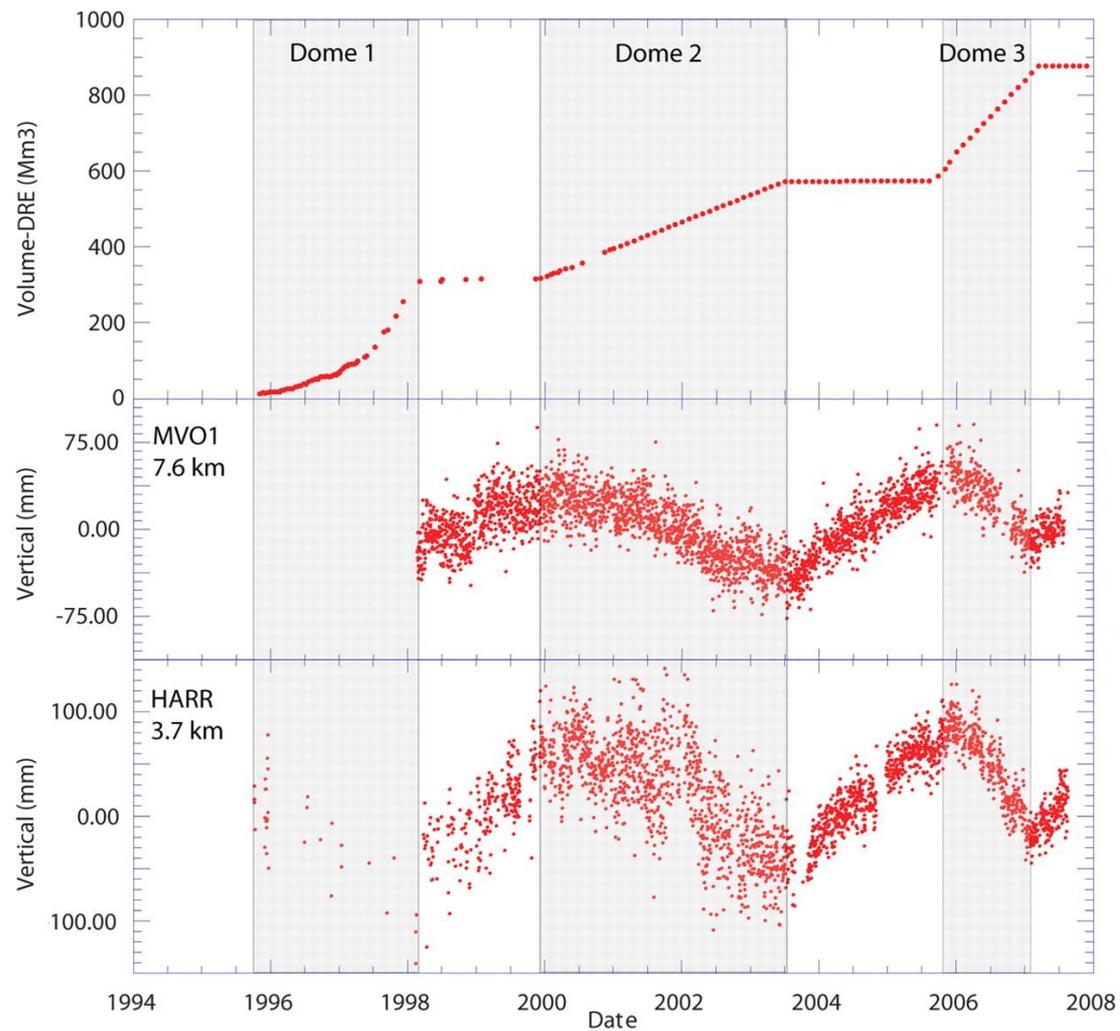


Циклические режимы (SHV)

- Короткопериодные (часы, дни)
 - Угломерные измерения
 - Сейсмические данные
- Длиннопериодные (2-3 года)
 - Рост купола
 - Паузы в извержениях
 - Деформации поверхности (опускание во время роста, поднятие при паузах)
- Промежуточные (5-7 недель)
 - Быстрое изменение скорости роста купола
 - Сейсмические события и пирокластические потоки
 - Угловые измерения



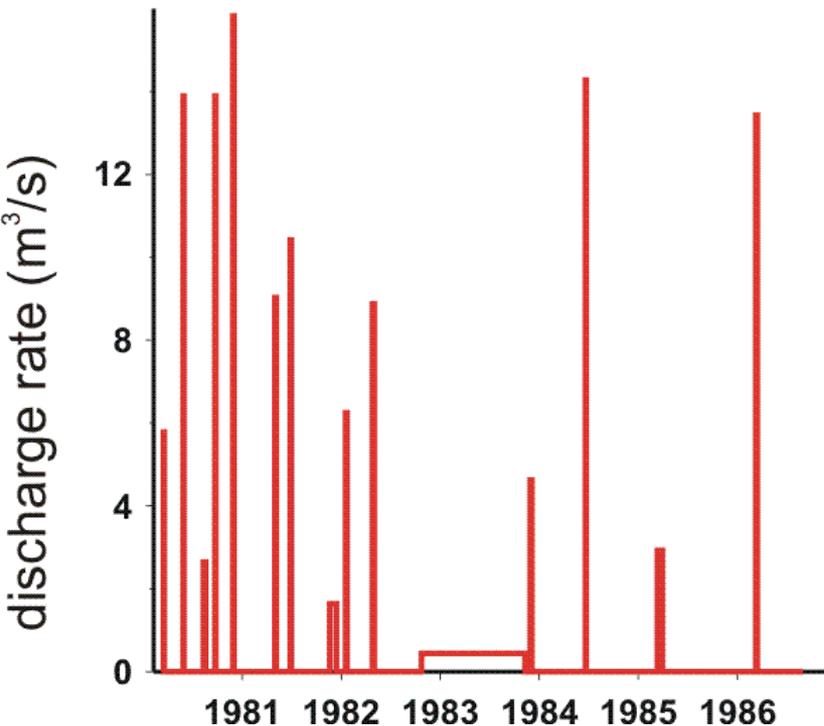
Объем купола и деформации поверхности на SHV



Mount St Helens, 2004-2005



Mount St. Helens (1980-1987)

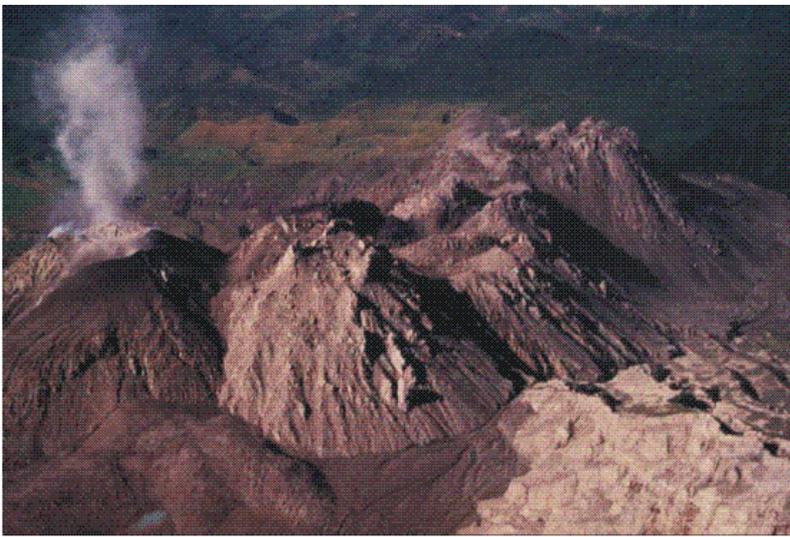


3 периода роста купола;

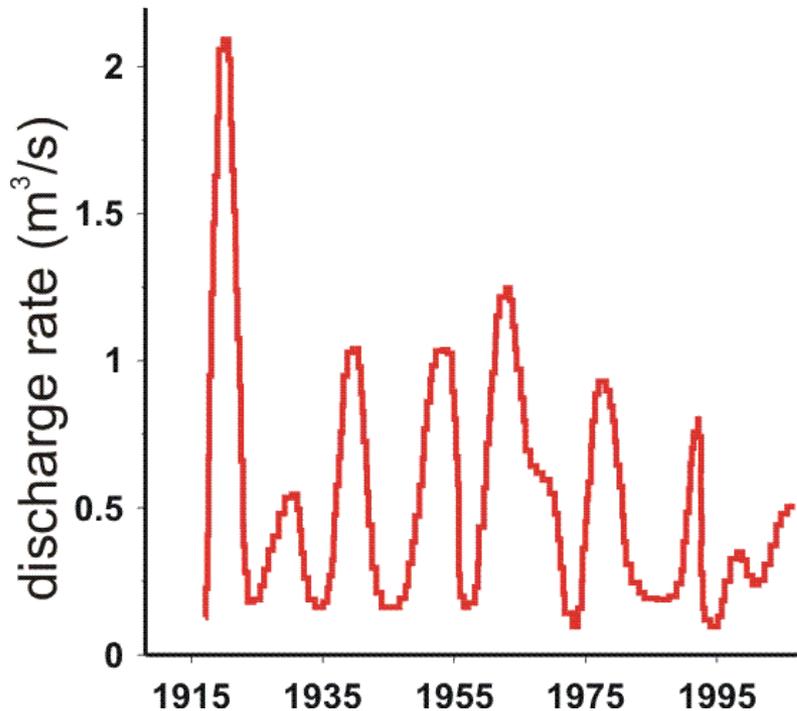
I - 8 всплесков $5-15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_{\text{av}}=0.67 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

II - постоянный, $Q_{\text{av}}=0.48 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

III- 4 всплеска $5-15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_{\text{av}}=0.23 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$



Santiaguito (1922-2015-?)



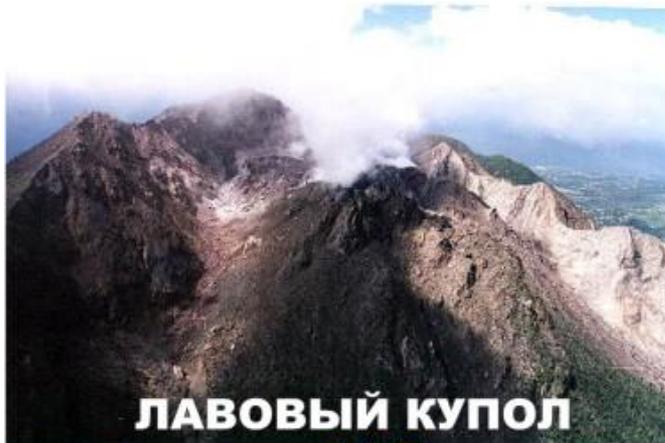
Циклы: 8 с 1922 г.

Интенс. ($0.5-2.1\text{m}^3\text{ s}^{-1}$): 3-6-лет

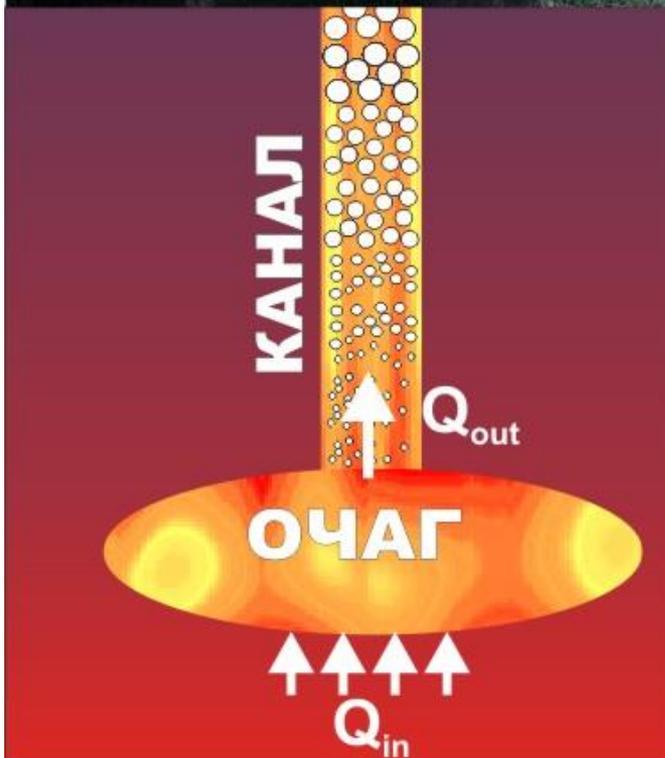
Слабый ($\sim 0.2\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$): 3-11-лет

Средний расход: $\sim 0.44\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$

Экструзивный режим извержения



ЛАВОВЫЙ КУПОЛ



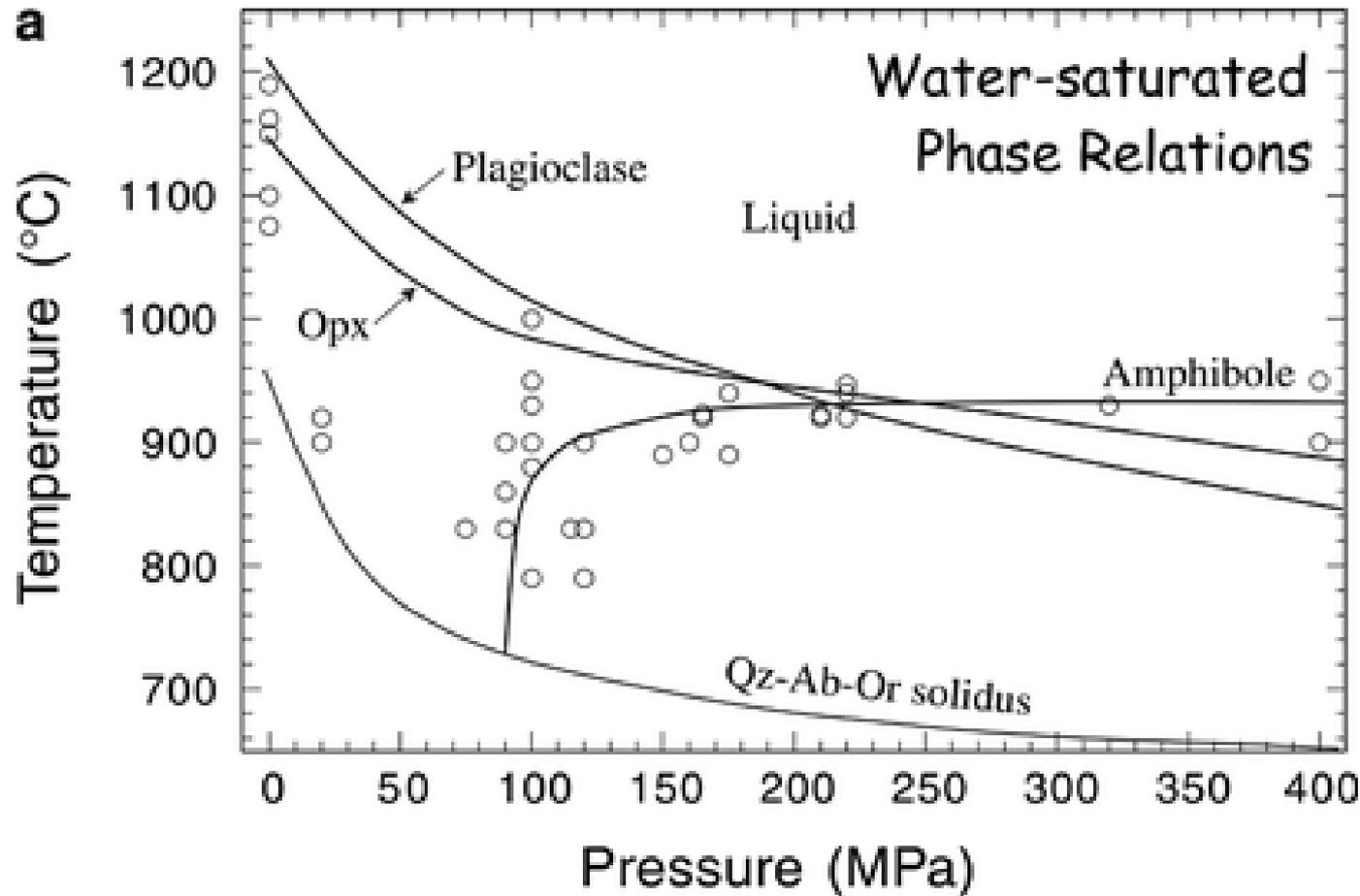
Медленный подъем
(0.1-30 мм/с)



- ❖ Кристаллизация магмы при подъеме приводит к росту вязкости
- ❖ Слияние пузырьков и фильтрация газа через них
- ❖ Подпитка очага в процессе извержения свежей магмой

КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАГМЫ

Пример фазовой диаграммы вулкана Маунт Сент Хеленс

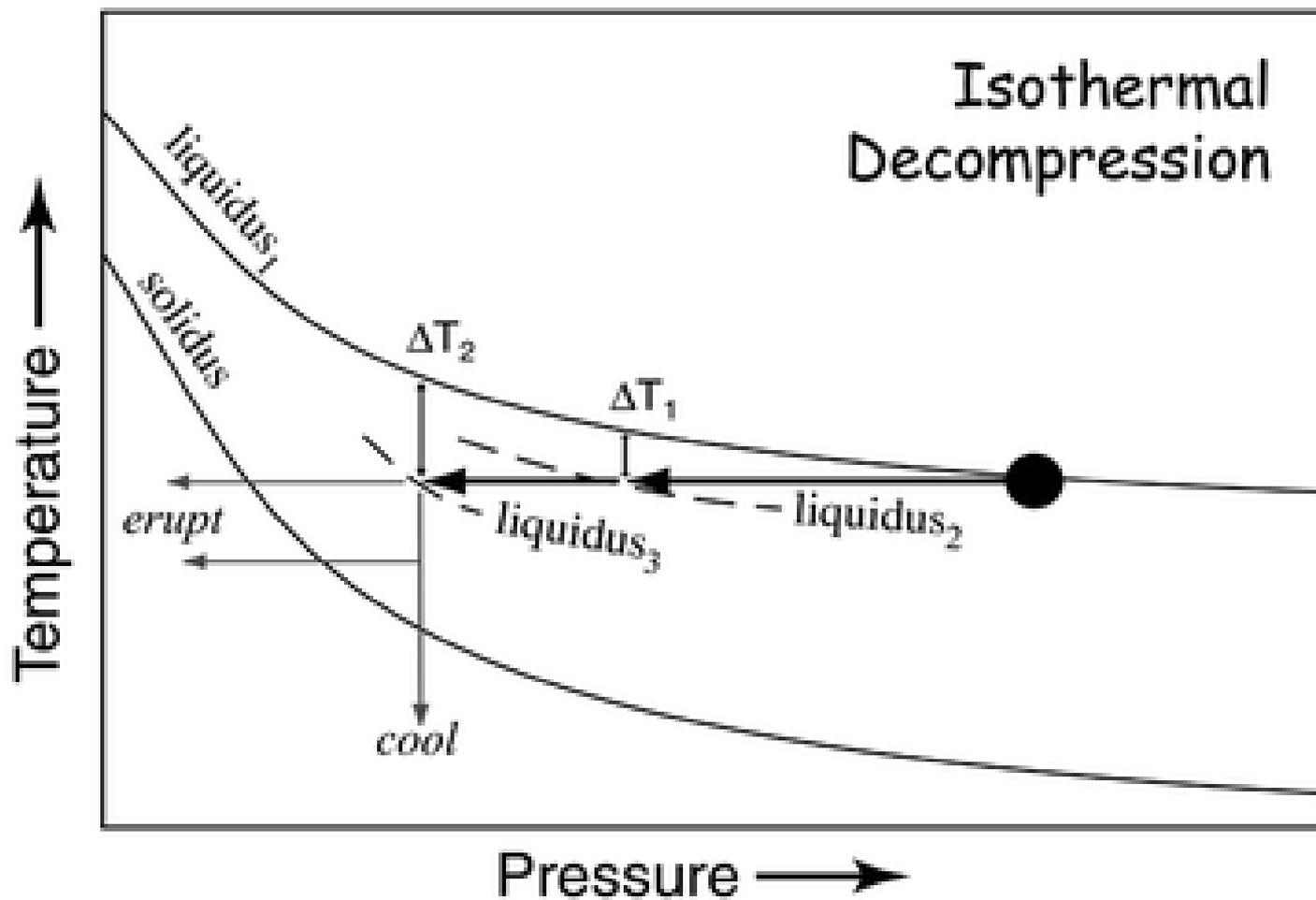


Jon Blundy, Kathy Cashman (2001) Ascent-driven crystallisation of dacite magmas at Mount St Helens, 1980-1986. Contrib Mineral and Petrol V 140(6)

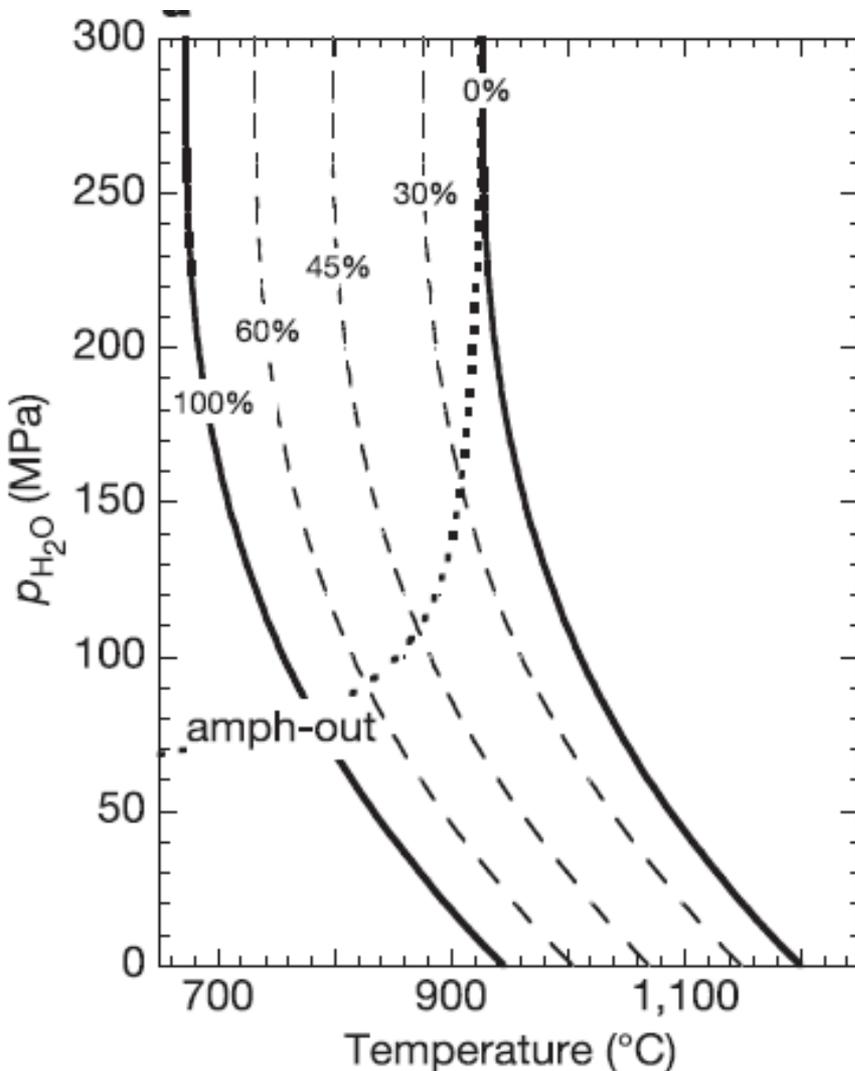
При подъеме магмы за счет падения давления происходит эффективное переохлаждение расплава и его кристаллизация.

Температура может оставаться постоянной!

Или даже расти



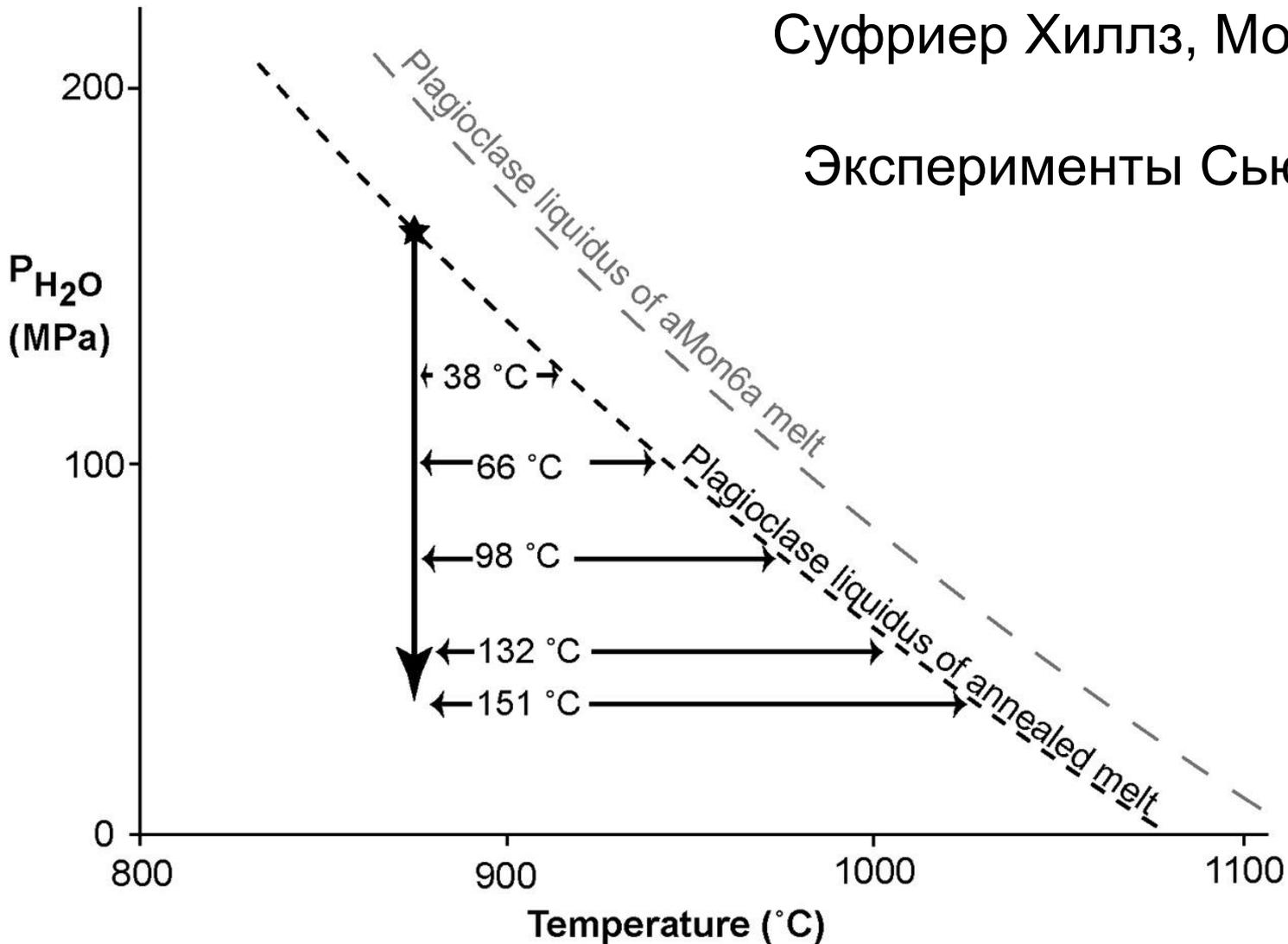
Равновесная кристаллизация



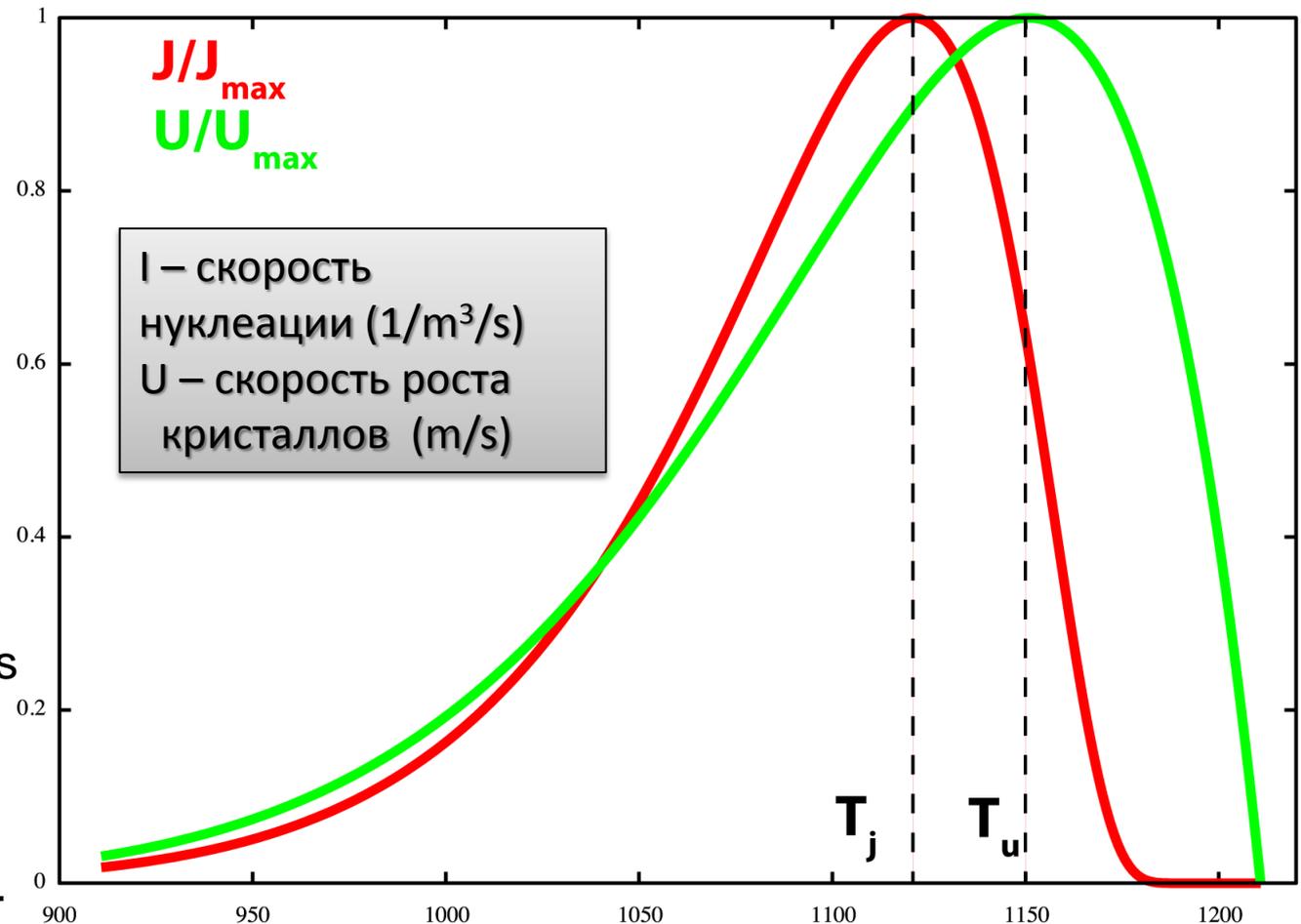
Построить графики
зависимости
концентрации
кристаллов от давления
при подъеме магмы от
давления 300 МПа до
атмосферного при
температуре 950 и 1100 С

Magma heating by decompression-driven crystallization beneath andesite volcanoes
Jon Blundy, Kathy Cashman and Madeleine Humphreys, Nature 443, 76-80

Кристаллизация магмы на вулкане
Суфриер Хиллз, Монтсеррат,
Эксперименты Сюзан Коуч



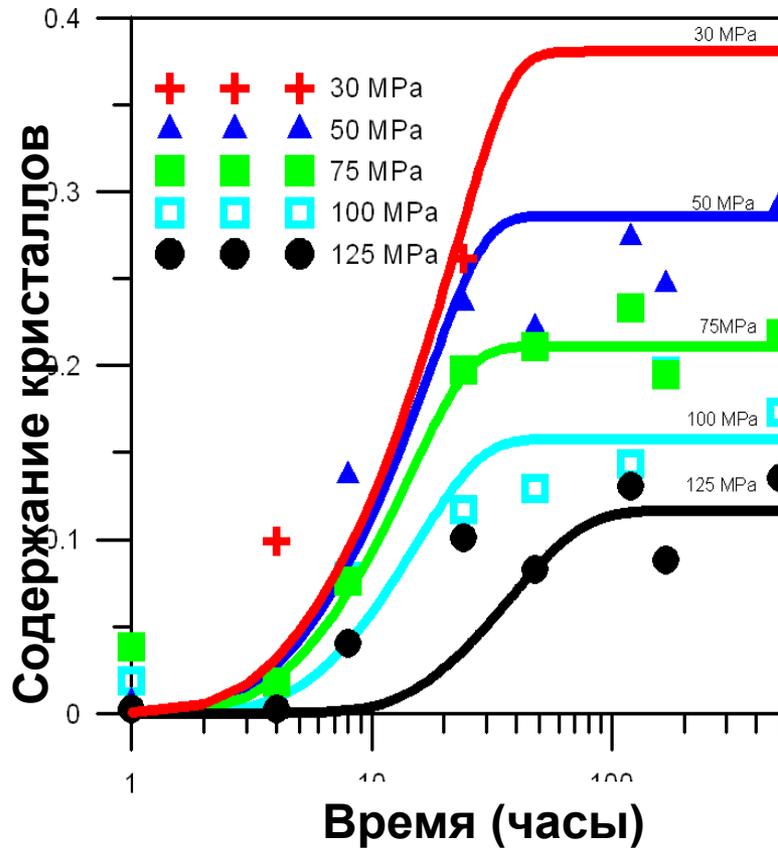
Скорости роста и нуклеации как функции переохлаждения



Hort, M., 1998. Abrupt change in magma liquidus temperature because of volatile loss or magma mixing: effects on nucleation, crystal growth and thermal history of the magma, *J. Petrol.*, 39, 1063–1076.

Моделирование кристаллизации

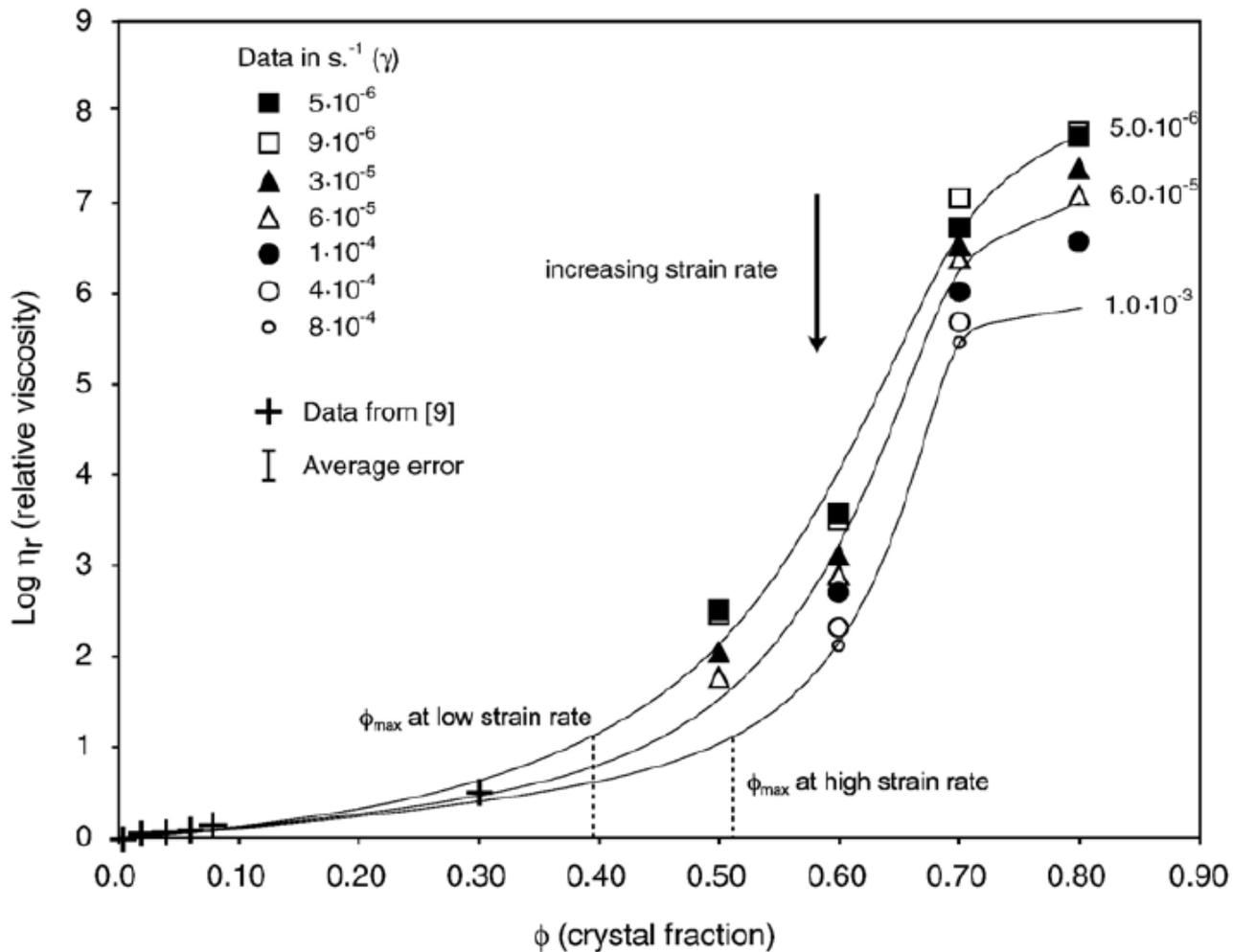
$$\rho_c^0 \frac{d\beta}{dt} = G = 3\sigma\rho_m^0 U(t) \int_0^t I(\omega) \left(\int_{\omega}^t U(\eta) d\eta \right)^2 d\omega$$



Площадь поверхности всех кристаллов, зародившихся от $t = 0$ до t

Melnik, OE & Sparks, RSJ. 'Controls on conduit magma flow dynamics during lava dome building', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **110 (2) B02209**, (pp. 1-21), 2005.

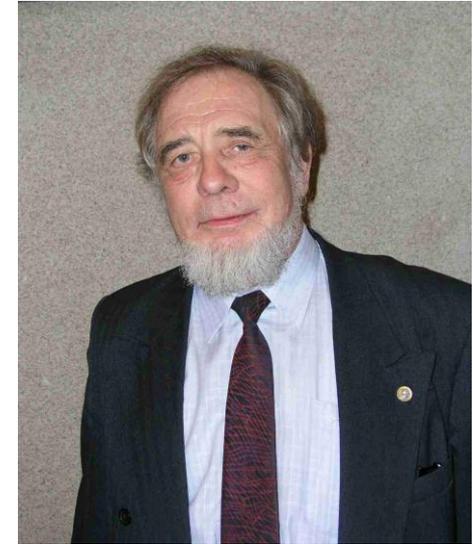
Зависимость вязкости от концентрации кристаллов



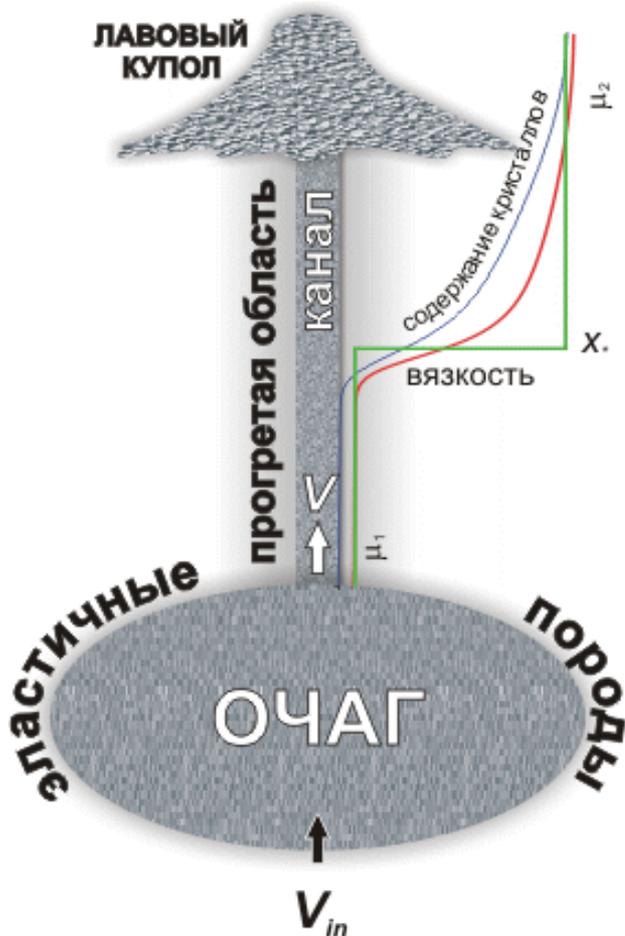
**Забудем о сложностях.
На время**

Простейшая модель подъема
магмы с кристаллизацией.

Простейшая модель

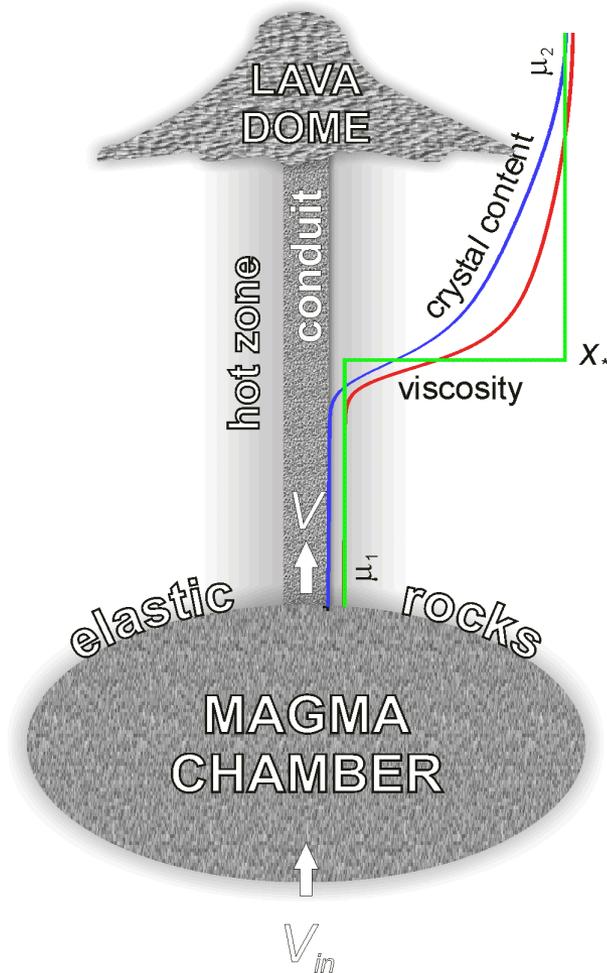


Barmin, A, Melnik, OE & Sparks, RSJ. 'Periodic behavior in lava dome eruptions', *Earth and Planetary Science Letters*, 199 (1-2), (pp. 173-184), 2002.



- ✓ Магма - вязкая жидкость.
- ✓ Вязкость ступенчатая функция концентрации кристаллов.
- ✓ Плотность магмы постоянна
- ✓ Канал цилиндрический.
- ✓ Очаг извержения находится в упругих породах и подпитывается с постоянным расходом.

Система уравнений



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho V = 0; \quad \rho = \rho_0 \Rightarrow \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho g - \frac{32\mu V}{D^2}; \quad \mu = \begin{cases} \mu_1, & \beta < \beta_* \\ \mu_2, & \beta \geq \beta_* \end{cases}$$

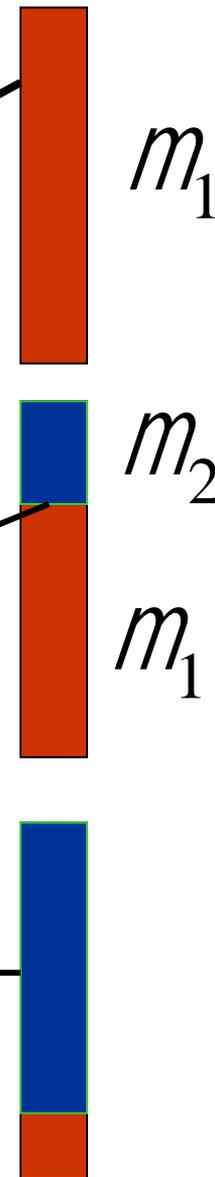
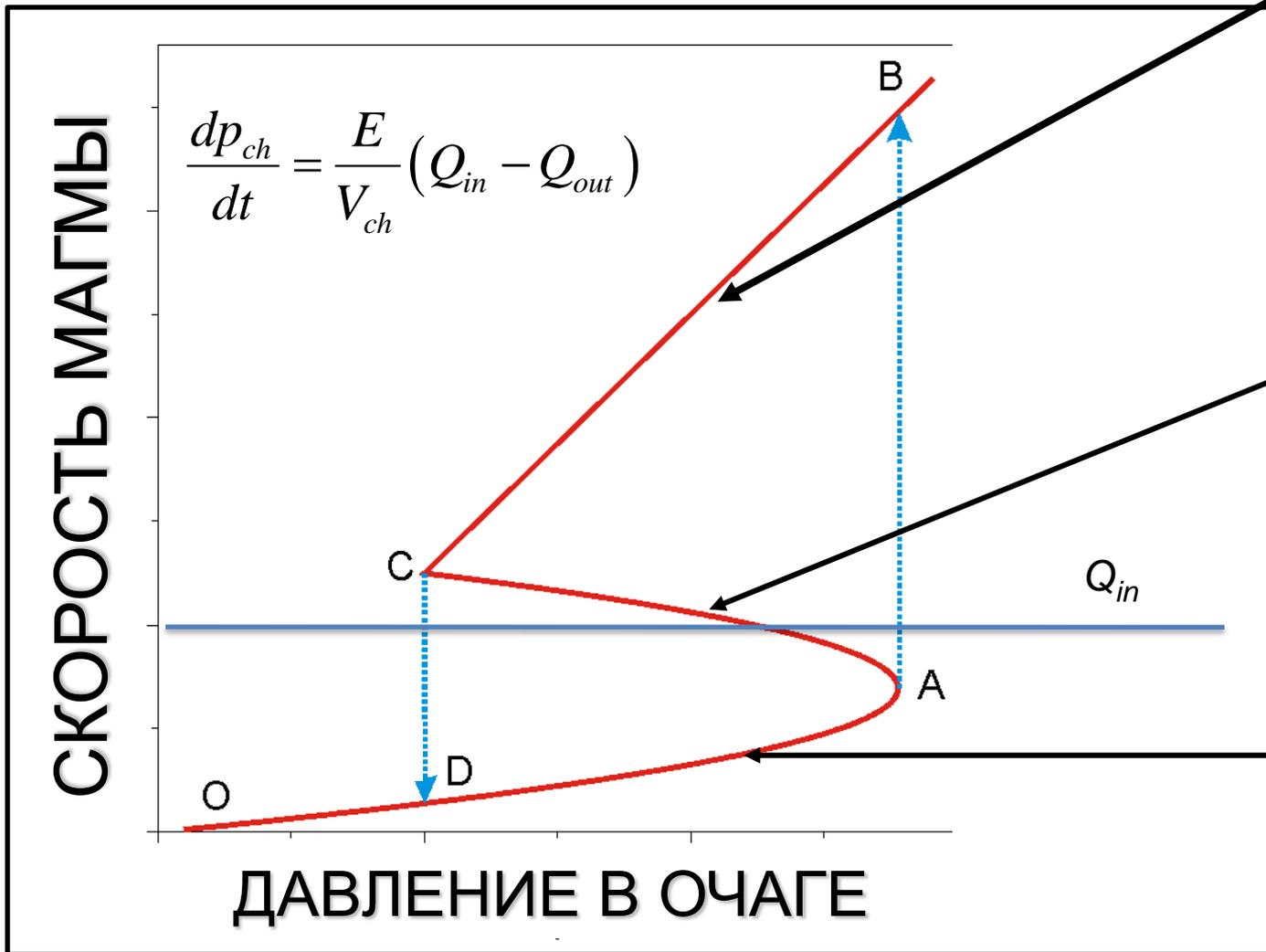
$$\frac{\partial}{\partial t} \beta + V \frac{\partial \beta}{\partial x} = U$$

Граничные условия

$$x = 0: \frac{dp_{ch}}{dt} = \frac{E}{V_{ch}} (Q_{in} - Q_{out}); \quad \beta = \beta_{ch}$$

$$x = L: p = 0$$

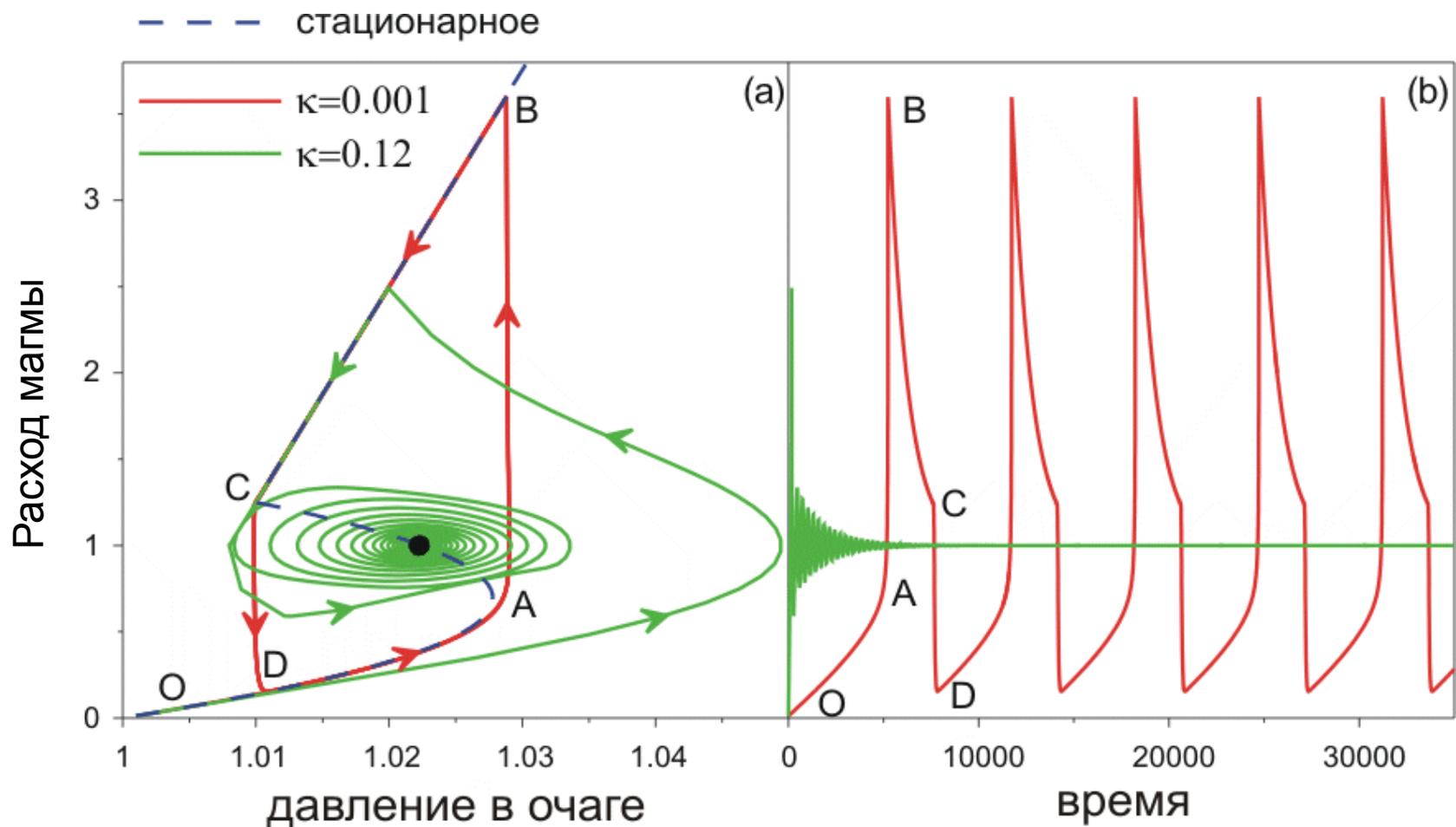
Стационарное решение



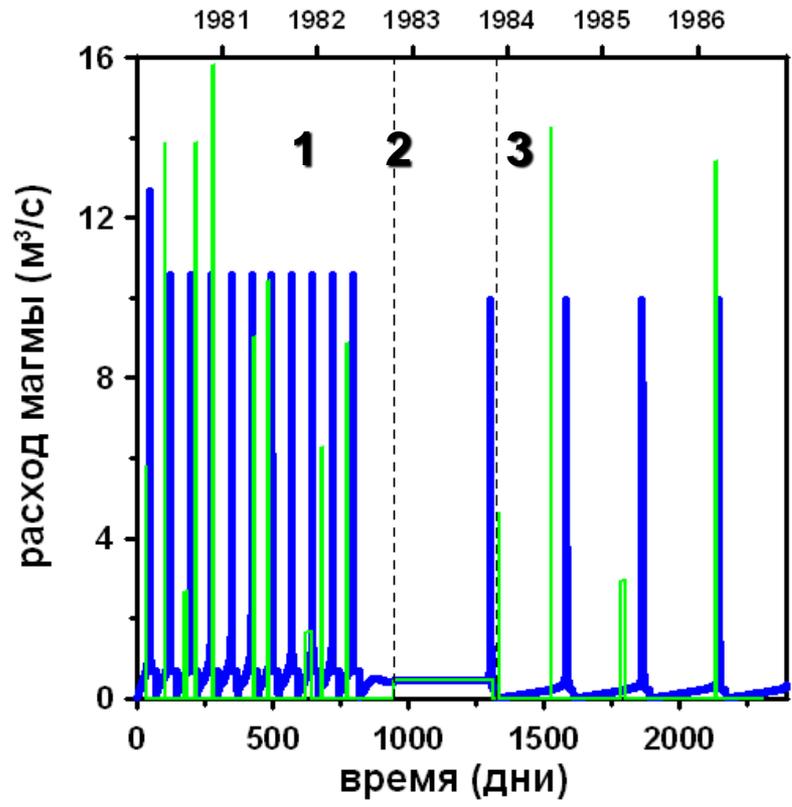
$$p_{ch} - p_a - \rho gL \sim \mu V$$

Результаты расчетов по нестационарной модели

$$\frac{dP_{ch}}{dt} = \kappa (Q_{in} - Q_{out})$$



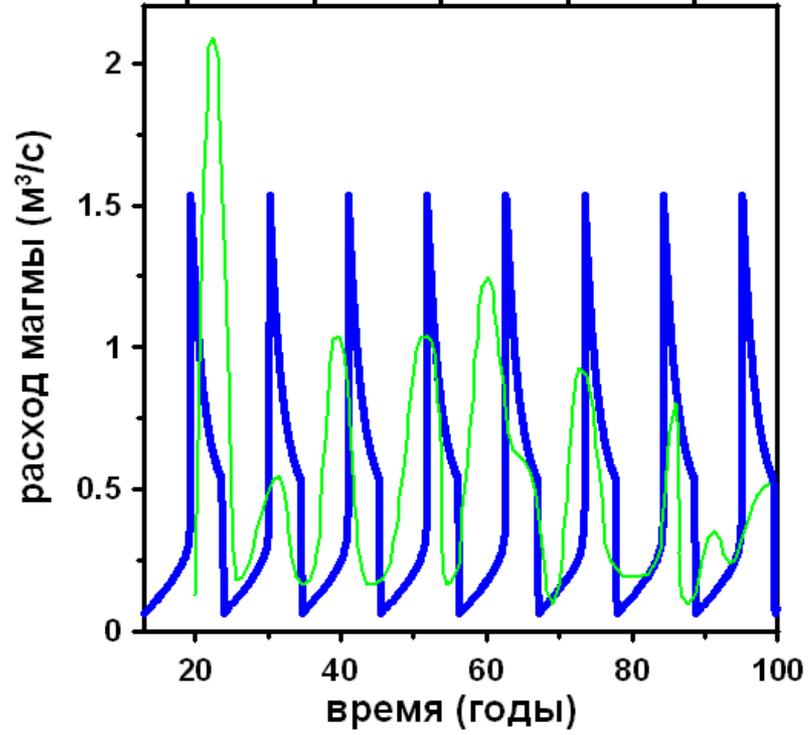
Ст Хеленс



Расчет

Наблюдения

Сантьяго



Период колебаний расхода магмы

$$T = \tau \left(\frac{\mu - 2}{\kappa} \left(\ln(\sqrt{3}) + 1 \right) + \frac{\ln(\mu - 1)}{\kappa} \right)$$

$$\tau = \frac{32\mu_1 L}{\rho g D^2}; \quad \mu = \frac{\mu_2}{\mu_1}; \quad \kappa = \frac{\pi D^2 E}{4V_{ch} \rho g};$$



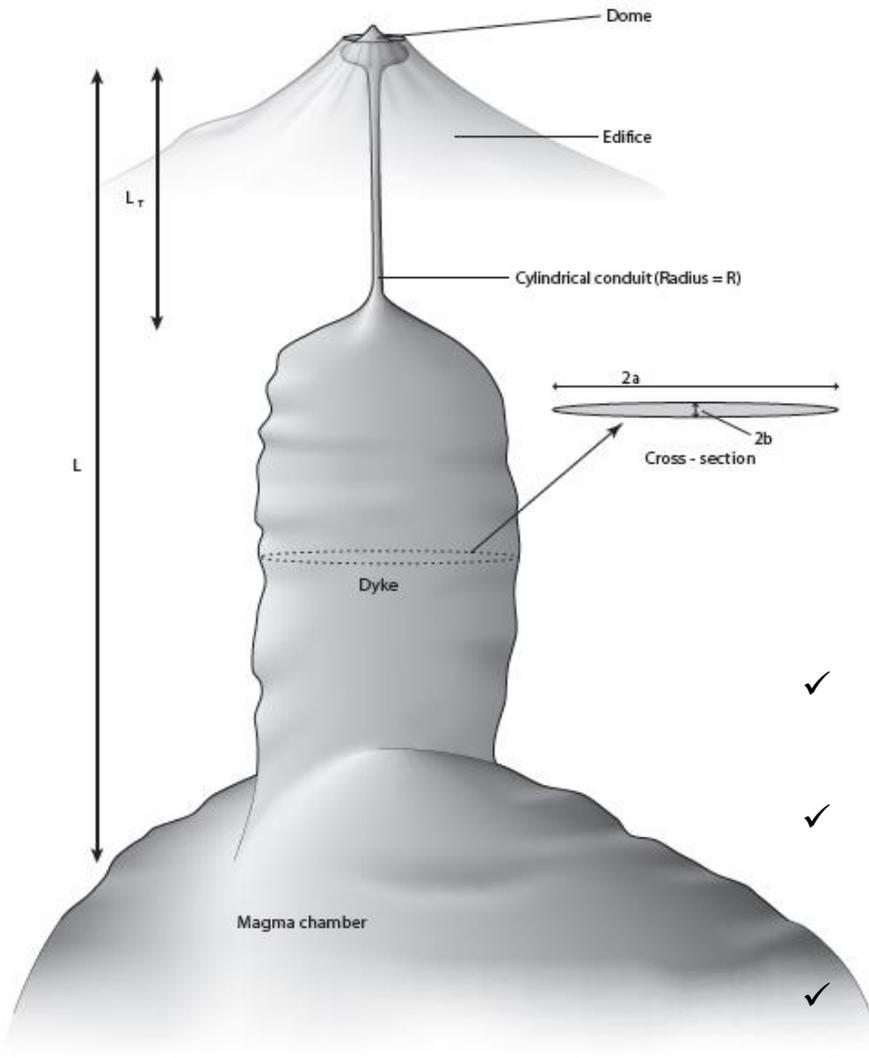
Построить график зависимости размера очага V_{ch} от периода колебаний T .

$$L = 5 \text{ km}, \quad \rho = 2500 \text{ kg / m}^3, \quad D = 50 \text{ m}, \quad \mu_1 = 10^6 \text{ Pa s}, \quad \mu_2 = 10^8 \text{ Pa s}$$

$$E = 1 \text{ GPa}$$

Какой размер очага нужен для колебаний с периодом 1 мес, 1 год, 10 лет?

Развитие модели



- ✓ Реальная кинетика кристаллизации и дегазации
- ✓ Нелинейная реология
- ✓ Фильтрация газа сквозь магму
- ✓ Переменное поперечное сечение
- ✓ Упругие деформации пород

- ✓ Melnik, OE & Sparks, RSJ. 'Controls on conduit magma flow dynamics during lava dome building', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **110 (2)**, 1-21, 2005.
- ✓ Costa A., O. Melnik and R.S.J. Sparks. Controls of conduit geometry and wallrock elasticity on lava dome eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 260, Issues 1-2, 2007, Pages 137-151.
- ✓ Melnik, OE & Sparks, RSJ. 'Nonlinear dynamics of lava dome extrusion', *Nature*, 402, (pp. 37-41), 1999.

Система уравнений

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial t} (S \rho_m) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S \rho_m V) = -G_{mc} - G_{ph} \quad (1)$$

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial t} (S \rho_{mc}) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S \rho_{mc} V) = G_{mc} \quad (2)$$

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial t} (S \rho_{ph}) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S \rho_{ph} V) = G_{ph} \quad (3)$$

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial t} (S \rho_d) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S \rho_d V) = -J \quad (4)$$

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial t} (S \rho_g) + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S \rho_g V_g) = J \quad (5)$$

Сохранение
массы

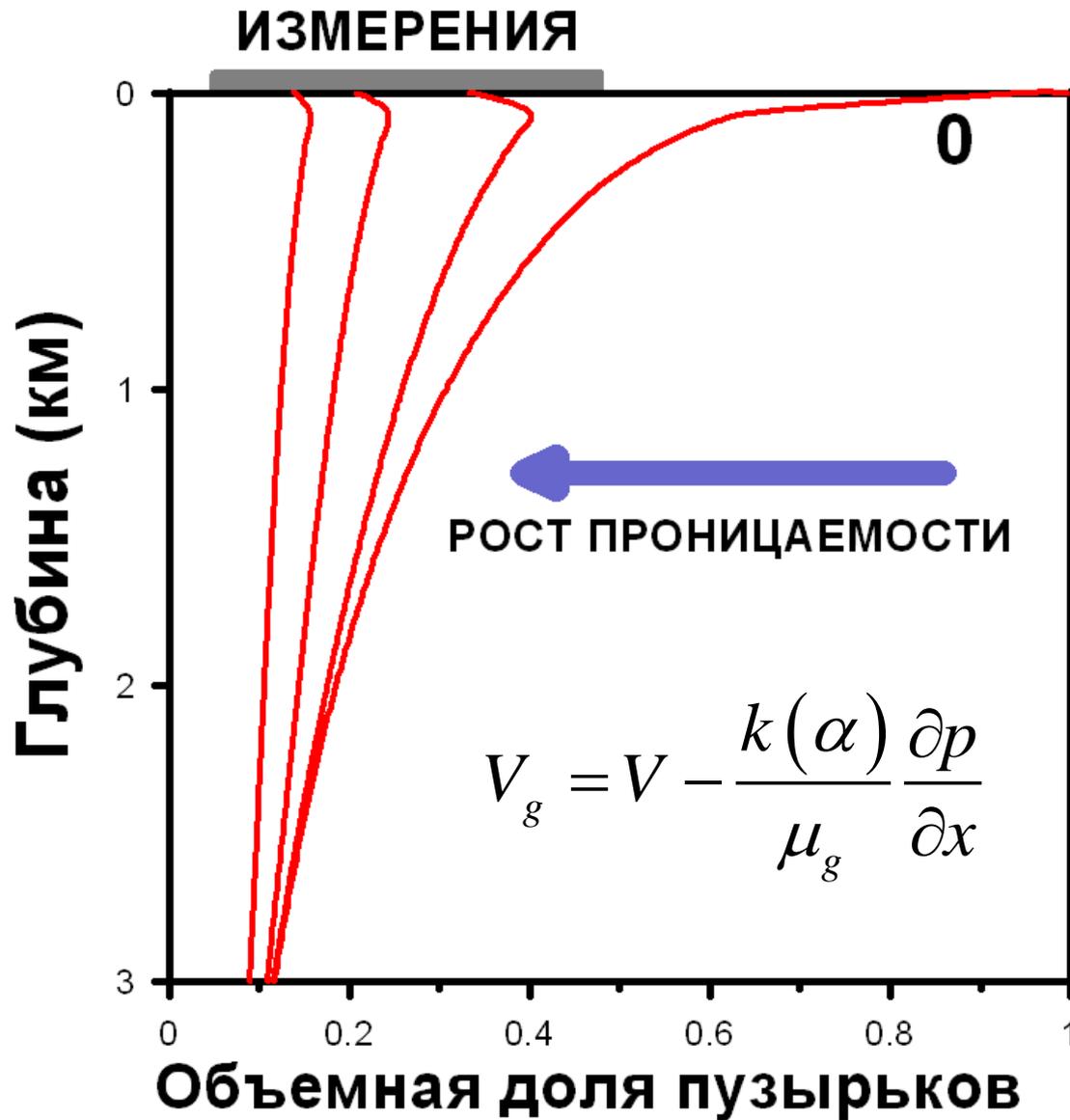
$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho g - 4\mu \frac{a^2 + b^2}{a^2 b^2} V \quad (6) \quad V_g - V = -\frac{k}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

$$\mu = \mu(c, T) \theta(\beta) \eta_r(\alpha, Ca)$$

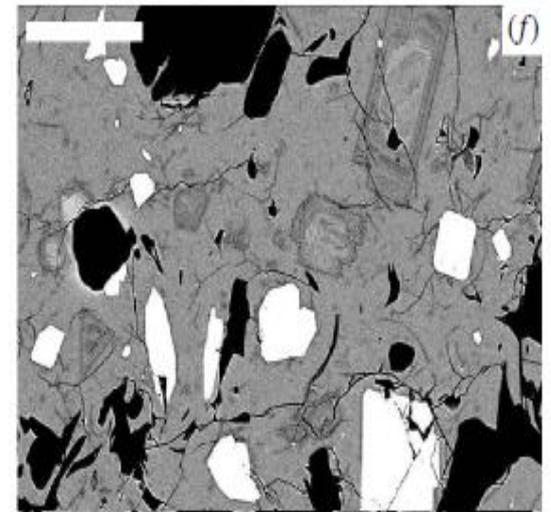
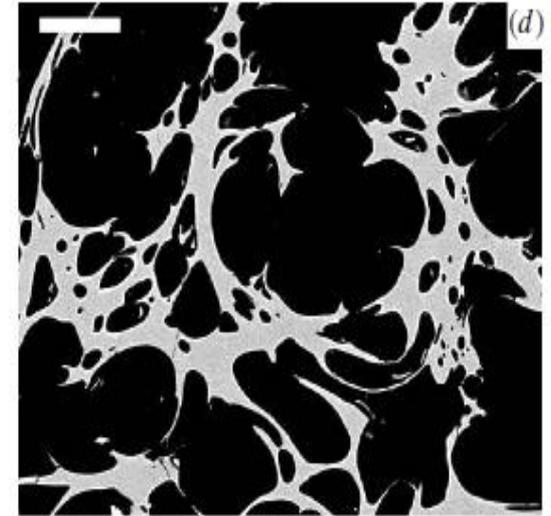
Уравнения
импульса

Низкая пористость купола

Melnik, OE & Sparks, RSJ. 'Nonlinear dynamics of lava dome extrusion', *Nature*, **402**, (pp. 37-41), 1999.



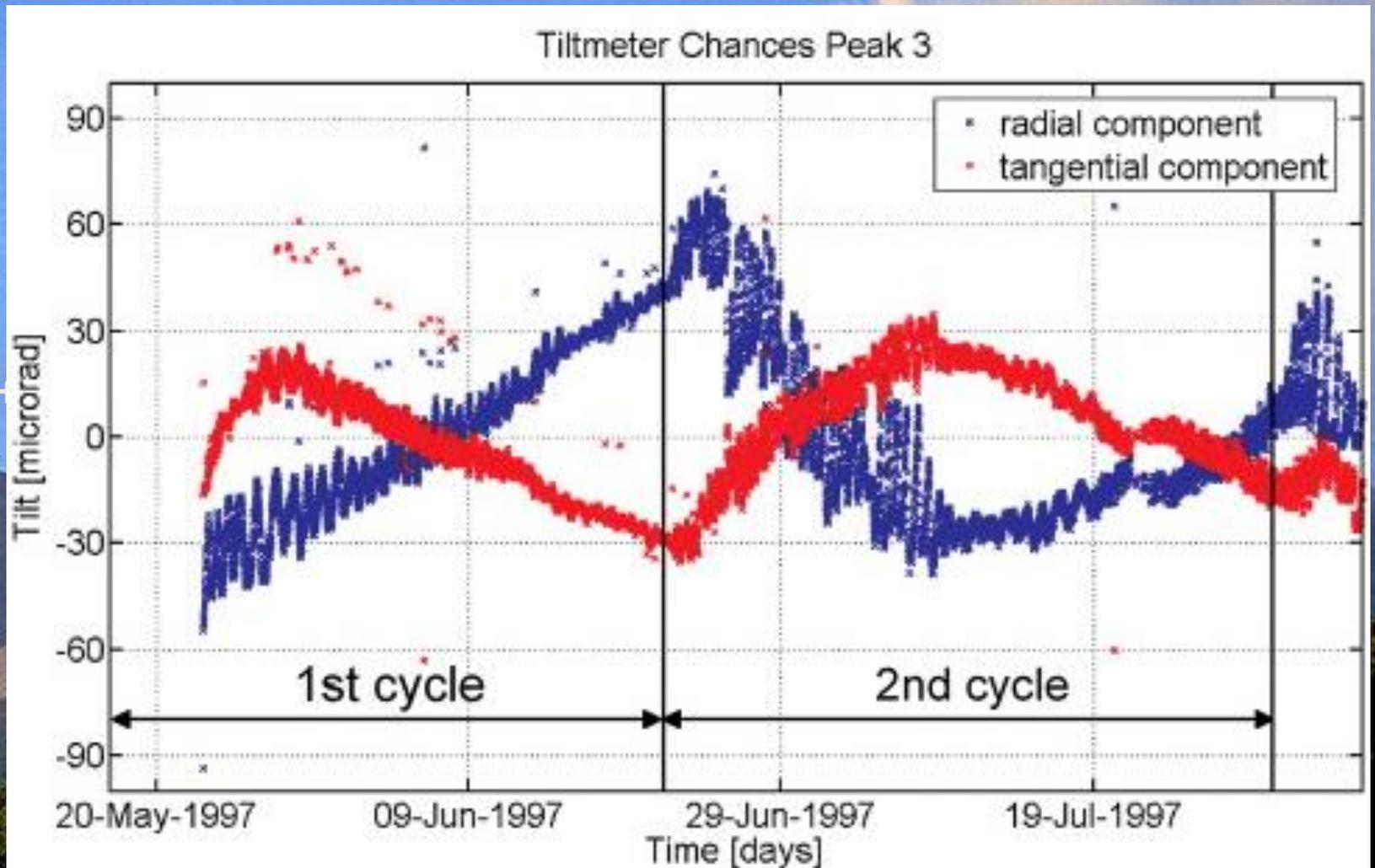
ПЕМЗА



ЛАВОВЫЙ КУПОЛ

Вулкан Суфриер Хиллз, Монтсеррат, Карибское море (1995-2007) промежуточные циклы

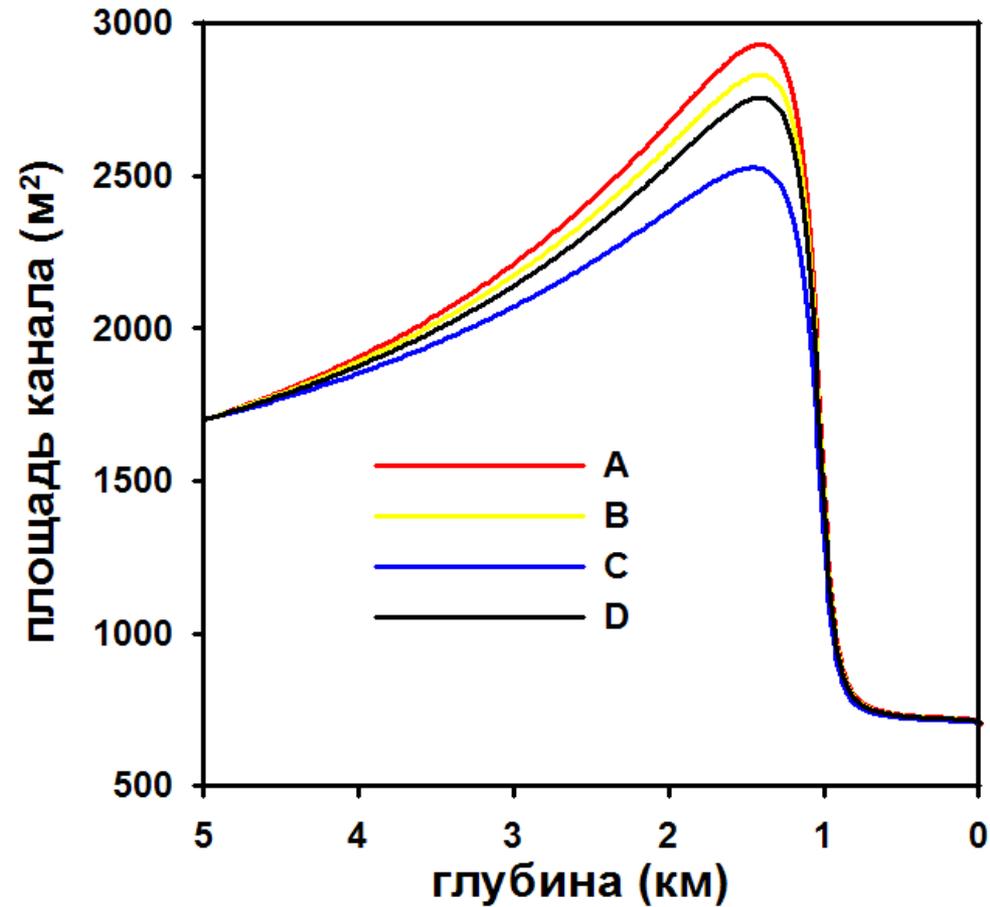
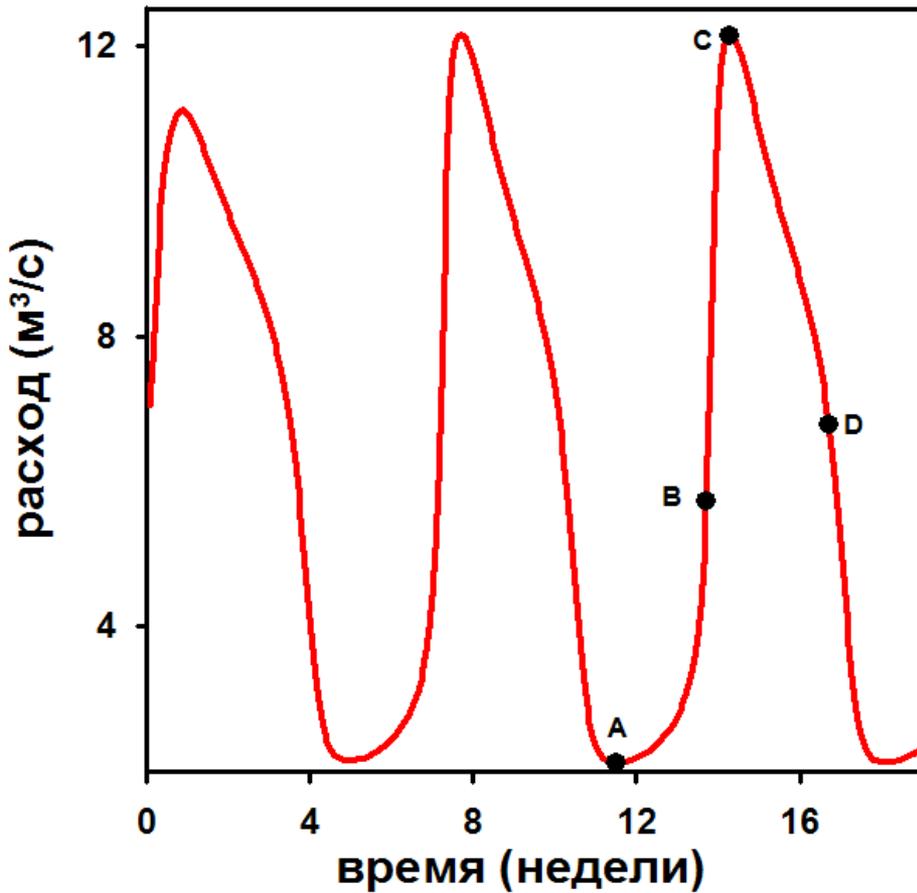
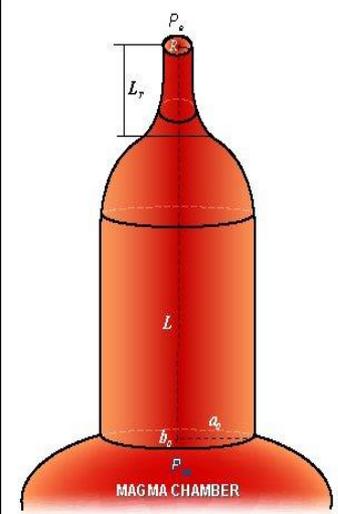
Наклон



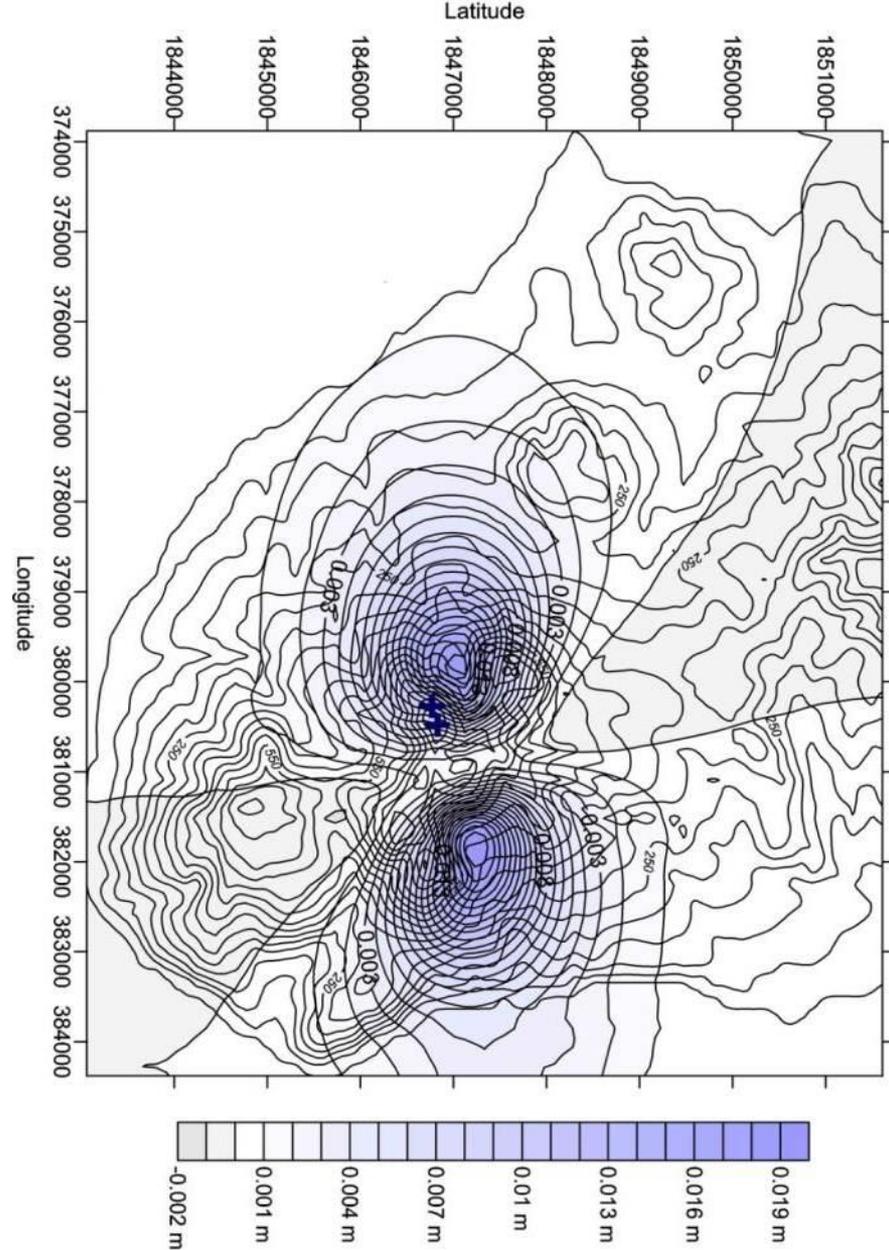
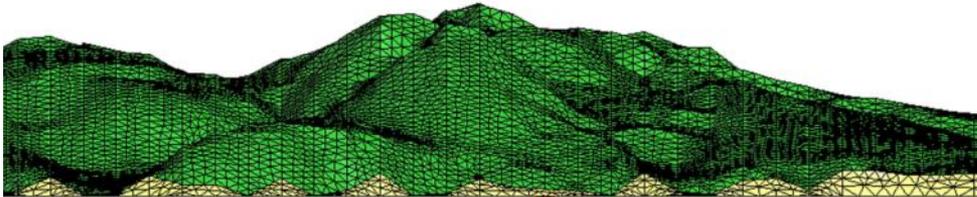
Моделирование извержения



Costa, A, Melnik, OE, Sparks, RSJ & Voight, B. 'Control of magma flow in dykes on cyclic lava dome extrusion', Geophysical Research Letters, 34, pp. 1-5, 2007



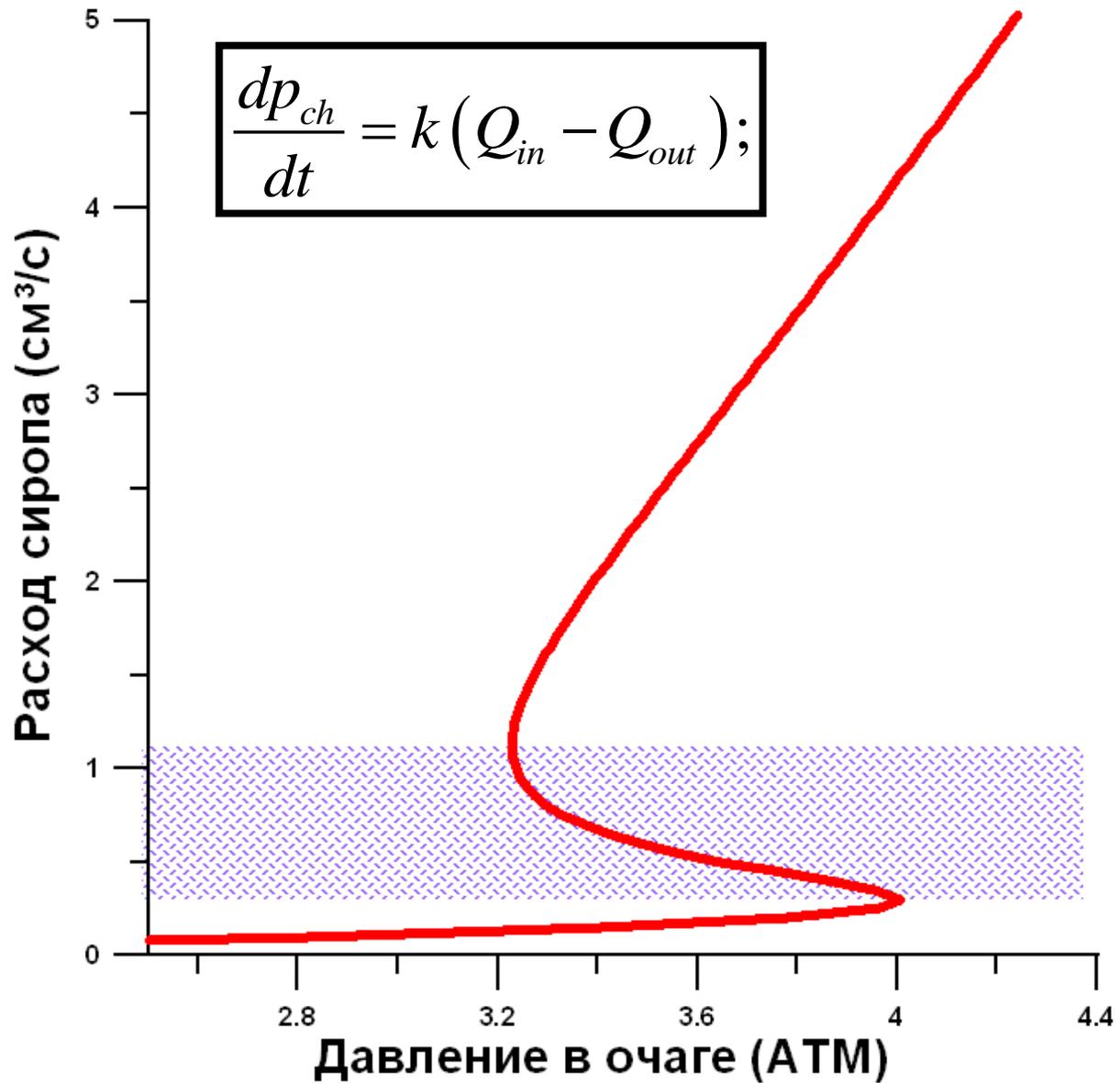
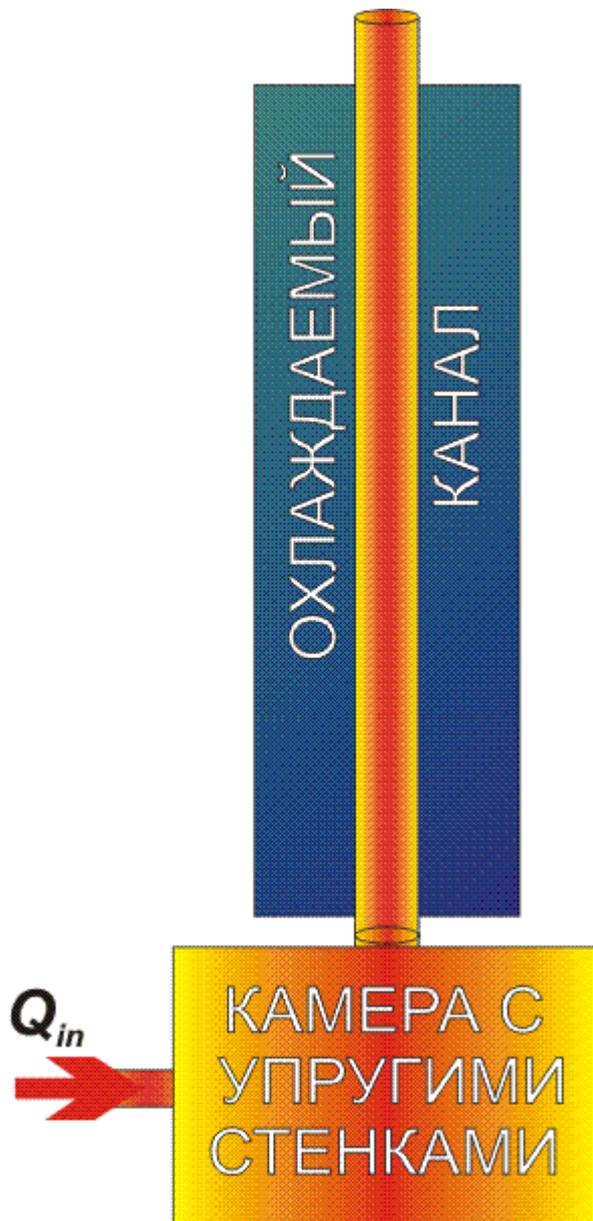
Моделирование угловых измерений

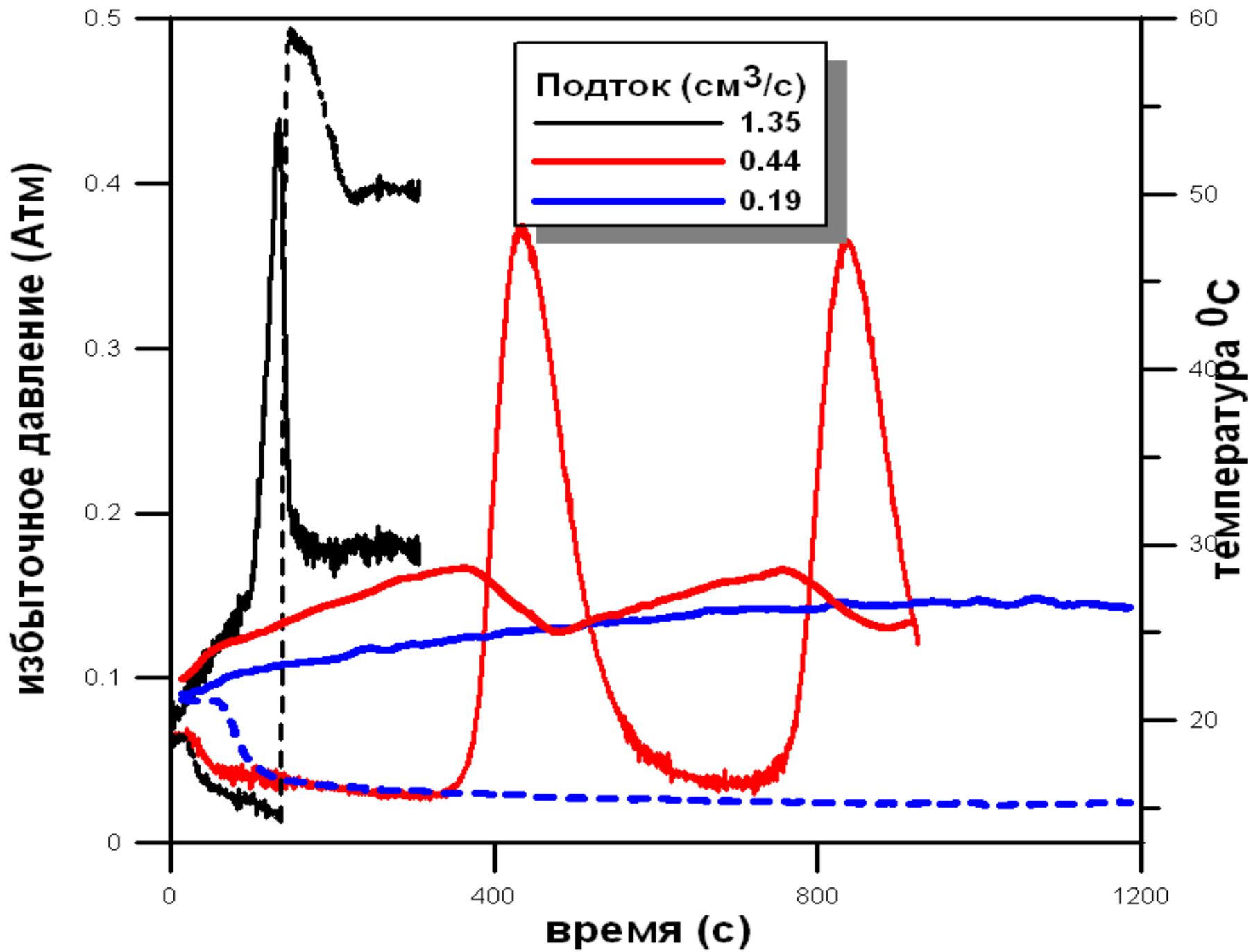


Stefanie
Hautmann,
Bristol

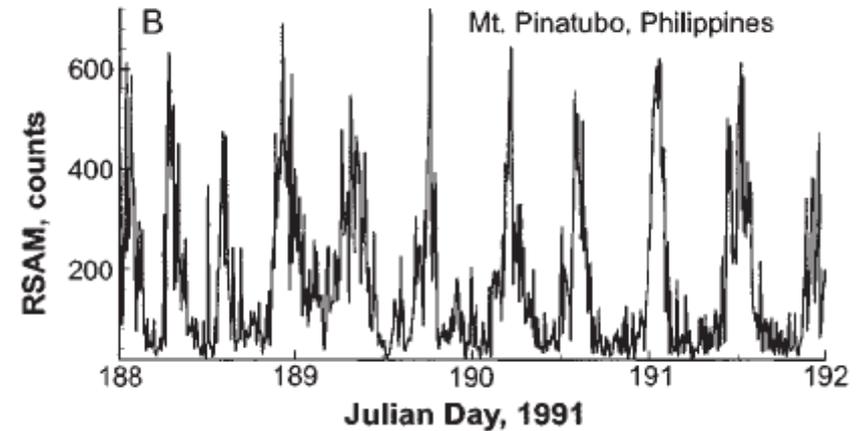
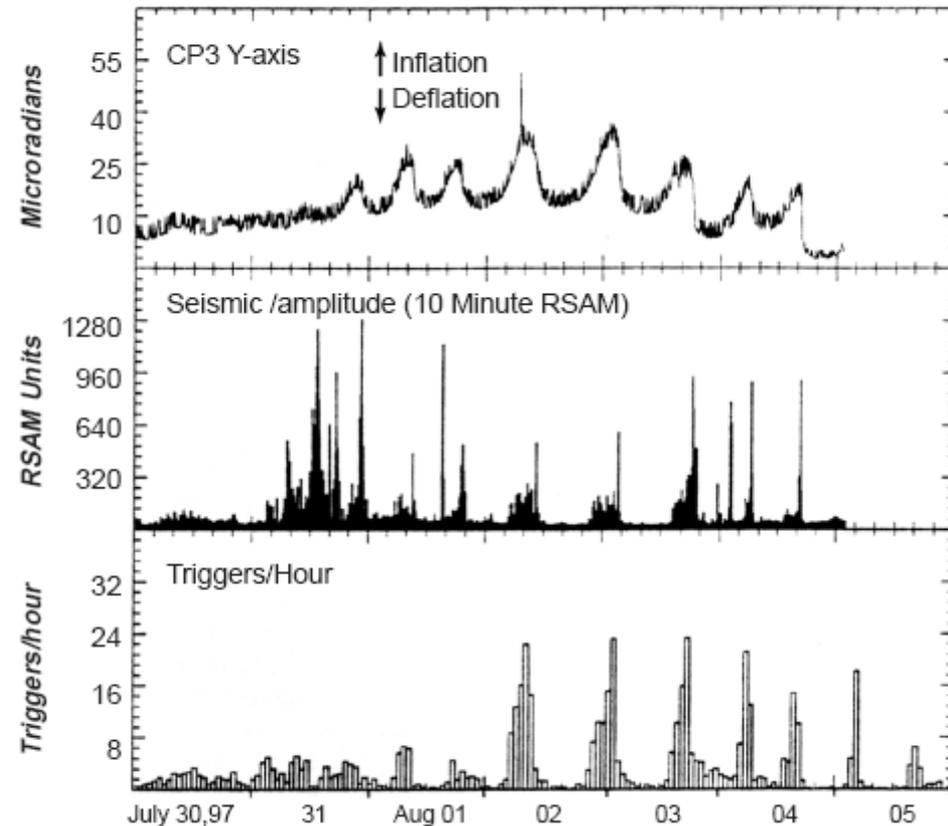


Экспериментальное моделирование циклических режимов





Короткопериодические циклы



Roger P. Denlinger*
Richard P. Hoblitt*

Cyclic eruptive behavior of silicic volcanoes

Geology; May 1999; v. 27; no. 5; p. 459–462

Instability of Magma Flow from Volatile-Dependent Viscosity

Jonathan J. Wylie,¹ Barry Voight,^{2,3} J. A. Whitehead¹

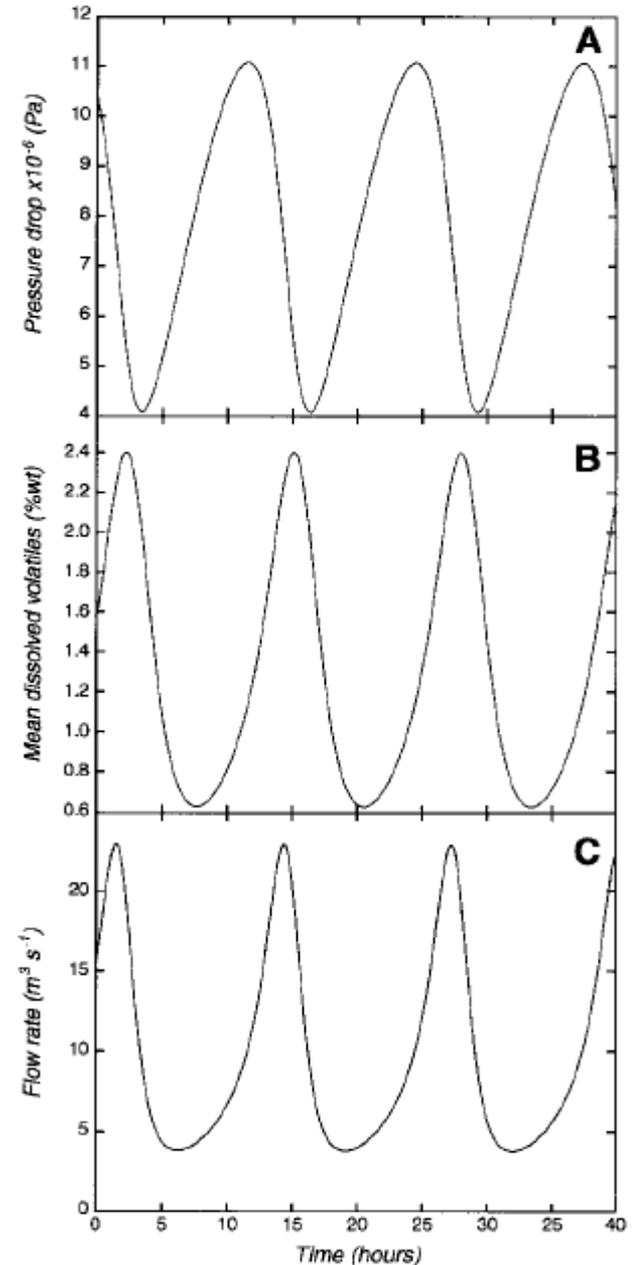
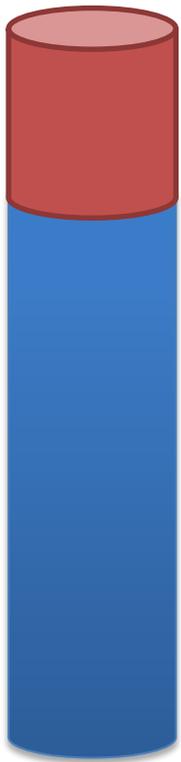
SCIENCE VOL 285

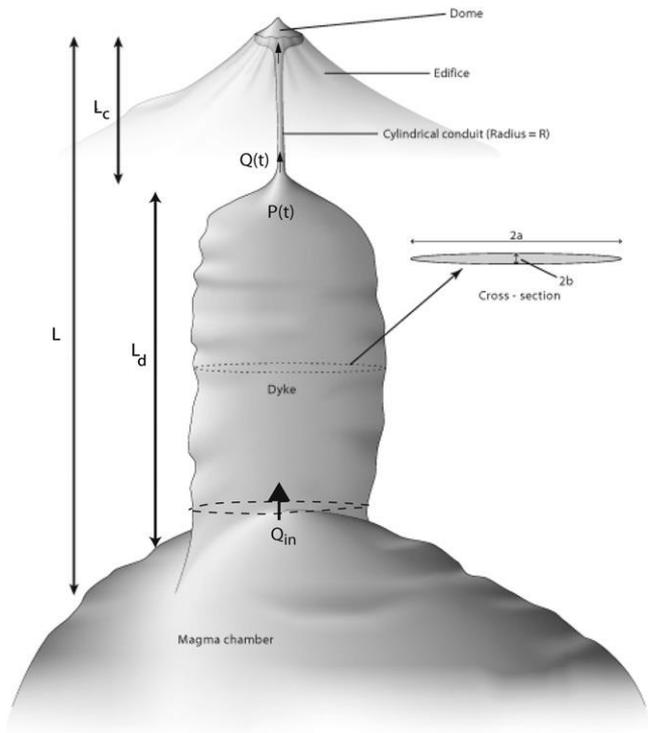


Instability of Magma Flow from Volatile-Dependent Viscosity

Jonathan J. Wylie,¹ Barry Voight,^{2,3} J. A. Whitehead¹

- Канал разбивается на две части
- В верхней части
 - Диффузионное газоотделение
 - Вязкость магмы зависит от содержания растворенного газа
- Нижняя часть
 - Канал с податливыми стенками, его объем зависит от давления
 - Трение отсутствует





$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma}{\rho V_d} (Q_{in} - Q)$$

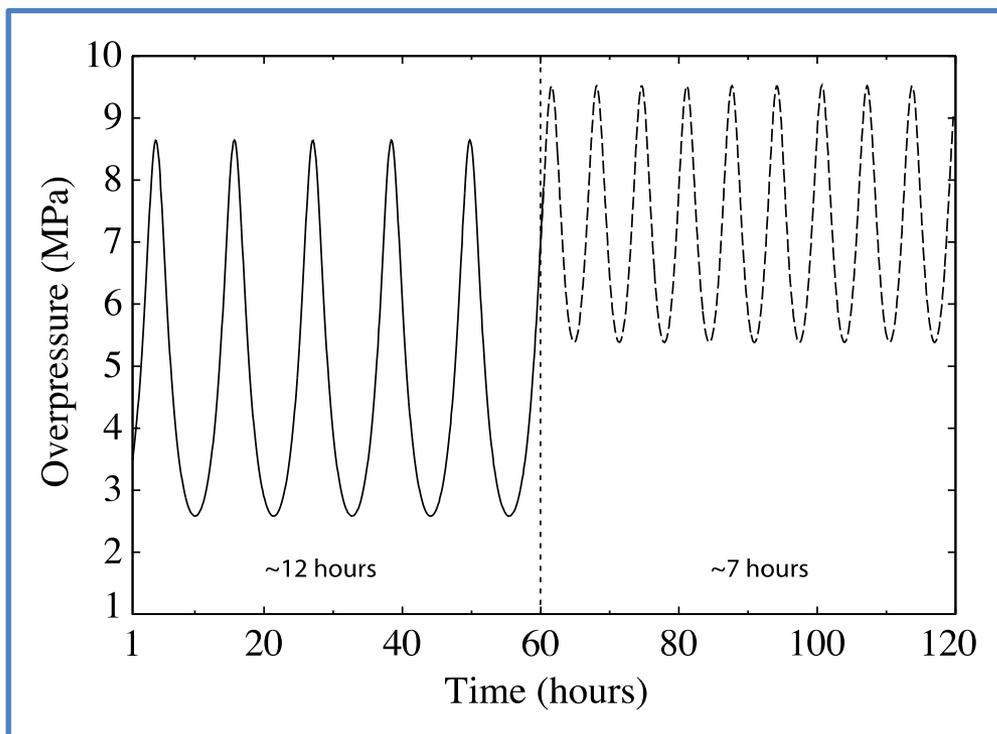
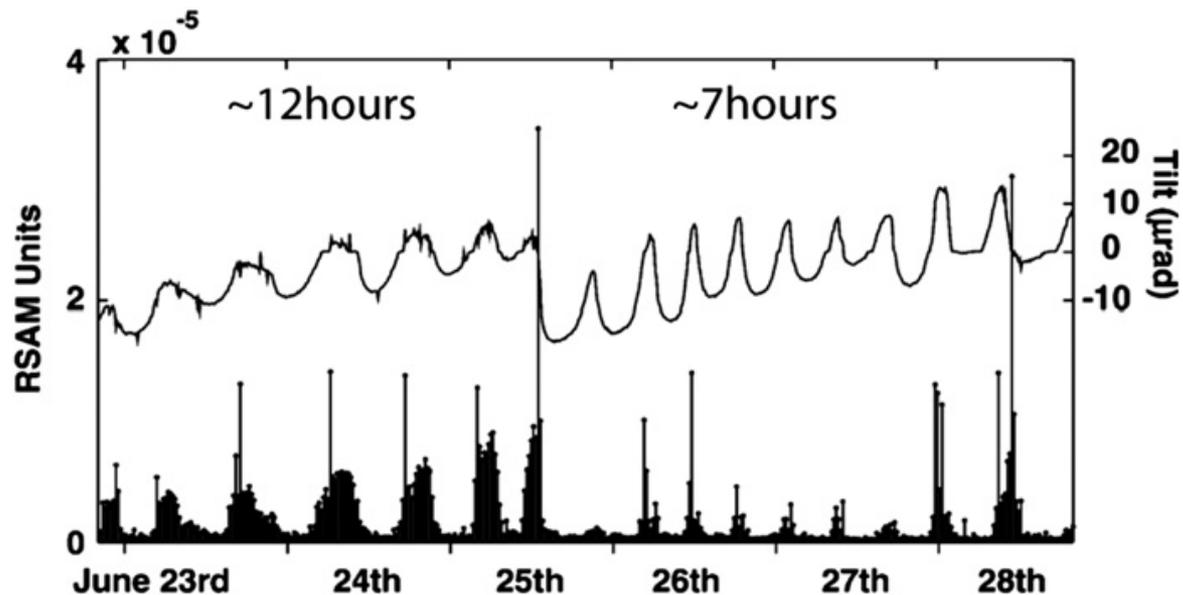
$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\pi R^4 \rho}{8 \mu L_c} \frac{dP}{dt} + \pi R^2 \rho \frac{d}{dt} v_{slip}$$

$$v_{slip} = \begin{cases} a_s \sigma^m, & \sigma \geq \sigma_c \\ 0, & \sigma < \sigma_c \end{cases}$$



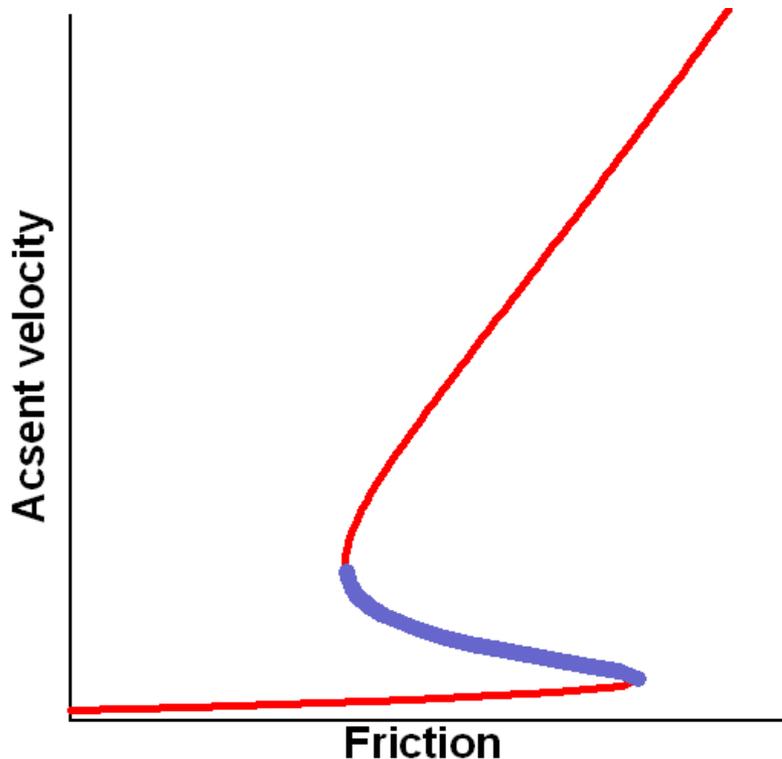
Costa A., Wadge G., Melnik O. (2012) Cyclic extrusion of a lava dome based on a stick-slip mechanism, Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 337-338, 39-46, doi: 10.1016/j.epsl.2012.05.011

Изменение
цикличности
после
обрушения
купола



Что вулкану нужно для циклического поведения?

$$F = \lambda \frac{\mu(V, \dots)}{D_{cond}^2} V \Rightarrow \frac{\partial F}{\partial V} = \underbrace{\lambda \frac{\mu(V, \dots)}{D_{cond}^2}}_{>0} + \underbrace{\lambda \frac{V}{D_{cond}^2}}_{>0} \boxed{\frac{\partial \mu(V, \dots)}{\partial V}}$$



- Сила трения должна падать с ростом скорости
 - Переменная вязкость
 - Проскальзывание
 - Неньютоновские свойства
- Кинетические процессы
 - Кристаллизация
 - Теплообмен
 - Диффузия
- Наличие резервуара магмы
 - Очаг
 - Канал в виде дайки
 - Сжимаемость магмы

Проблема!

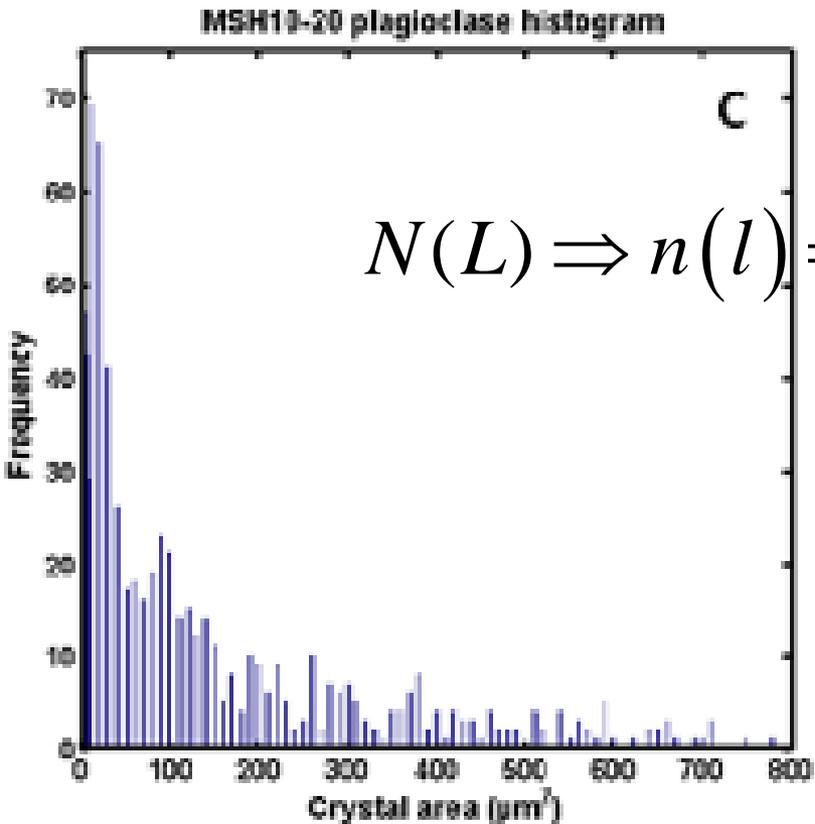
$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128 \mu L}$$

Как определить диаметр канала?

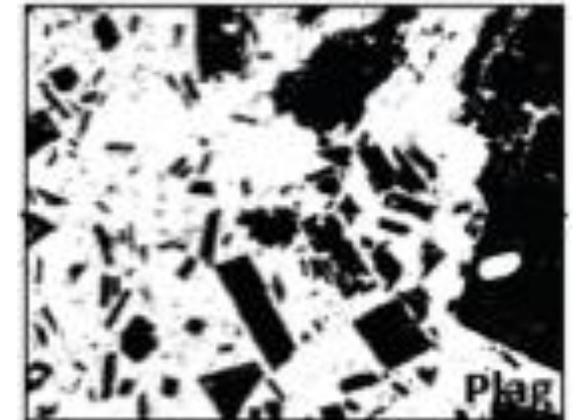
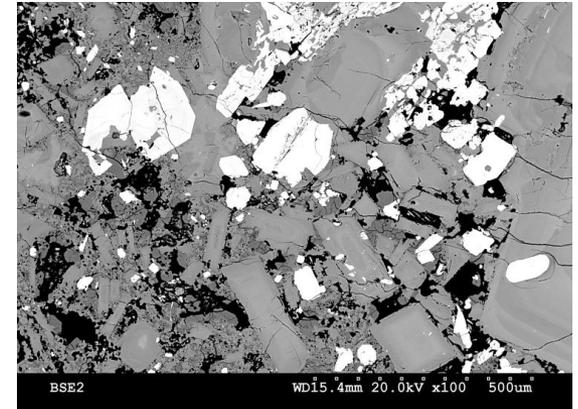
Вулканонологи за работой



Распределение кристаллов по размерам

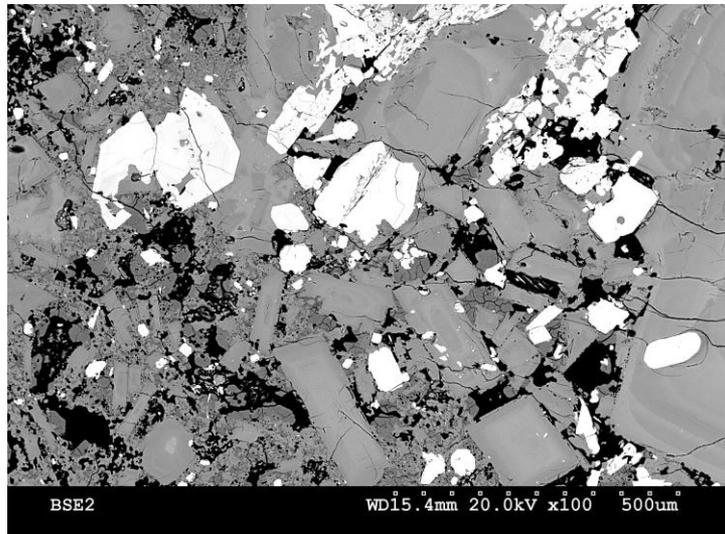


$$N(L) \Rightarrow n(l) = \frac{\Delta N}{\Delta l} = \frac{dN}{dl}$$

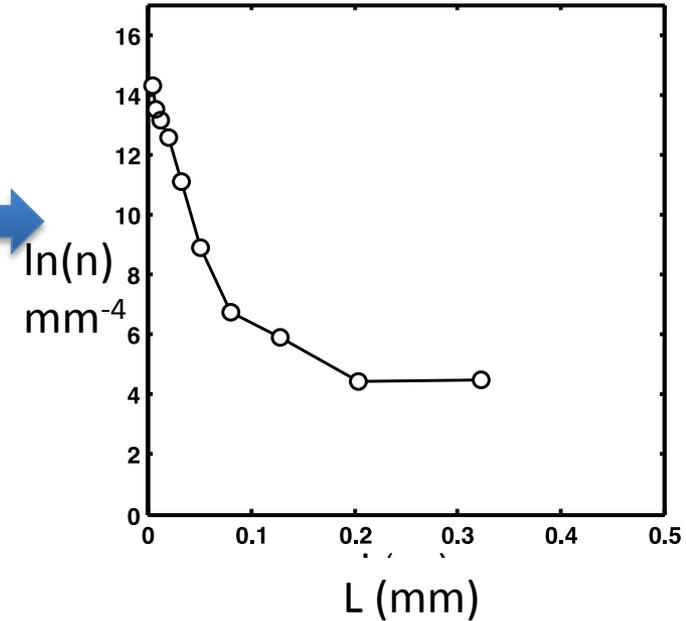


Распределение по размерам

Изображение с электронного микроскопа



Анализ изображения
+
2D to 3D

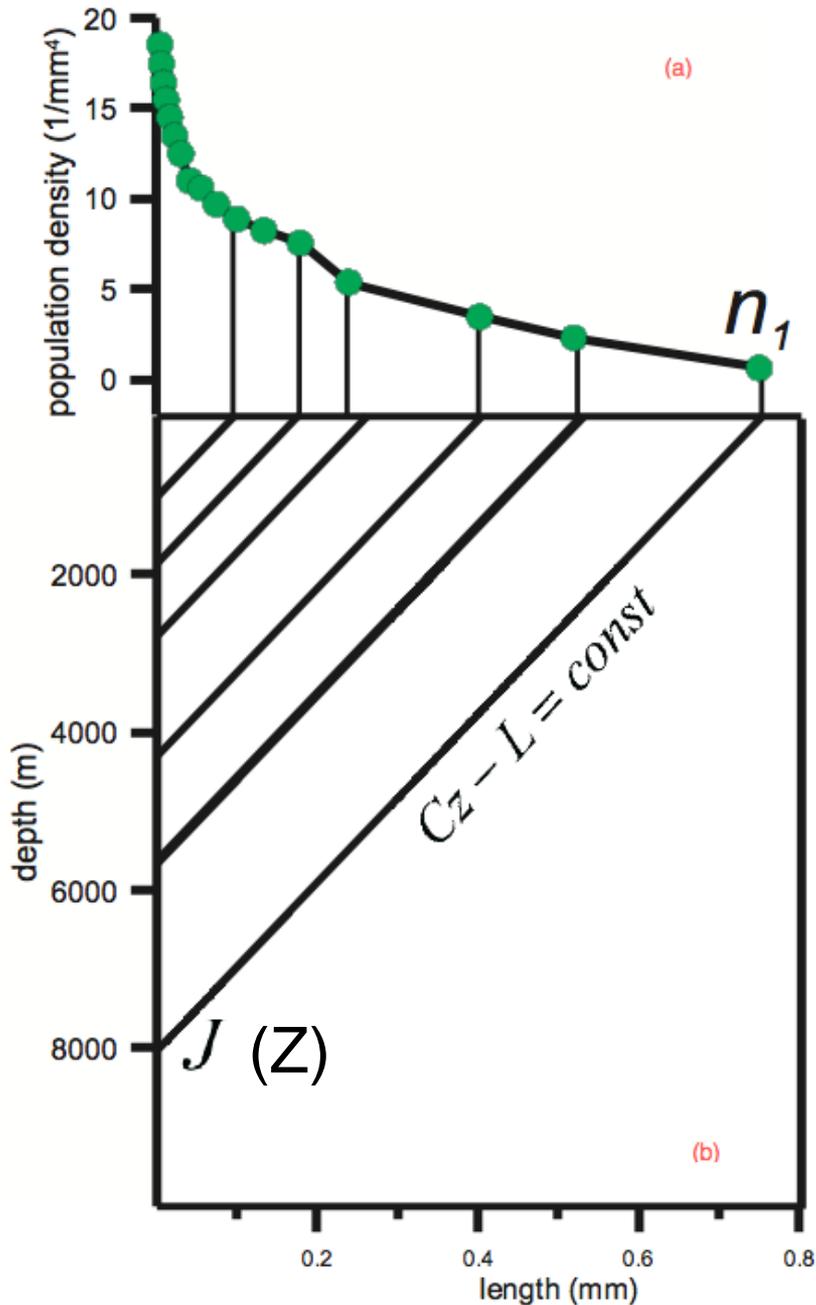


Эволюция распределения

- Изменение числа кристаллов данного диапазона размеров в данной точке = приток извне + рост кристаллов

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial z} NV + \frac{\partial}{\partial L} NU = 0$$
$$\frac{\partial}{\partial L} \Downarrow$$
$$\frac{\partial}{\partial t} n + \frac{\partial}{\partial z} nV + \frac{\partial}{\partial L} nU = 0$$

Упрощенная модель



- Постоянный расход магмы
- Постоянное сечение канала
- Постоянная температура
- Постоянная скорость роста

Полная модель

Предполагаем

$$U = U(p, T, x)$$

$$J = J(p, T, x)$$

$$V(z)S(z) = Q = \text{const}$$

$$\frac{dp}{dz} = \rho g + \lambda \mu(p, T, x) \frac{V(z)}{S(z)}$$

$$\frac{dT}{dz} = \frac{L_*}{C_p} \frac{dx}{dz}$$

Модель в канале
может быть более
сложной

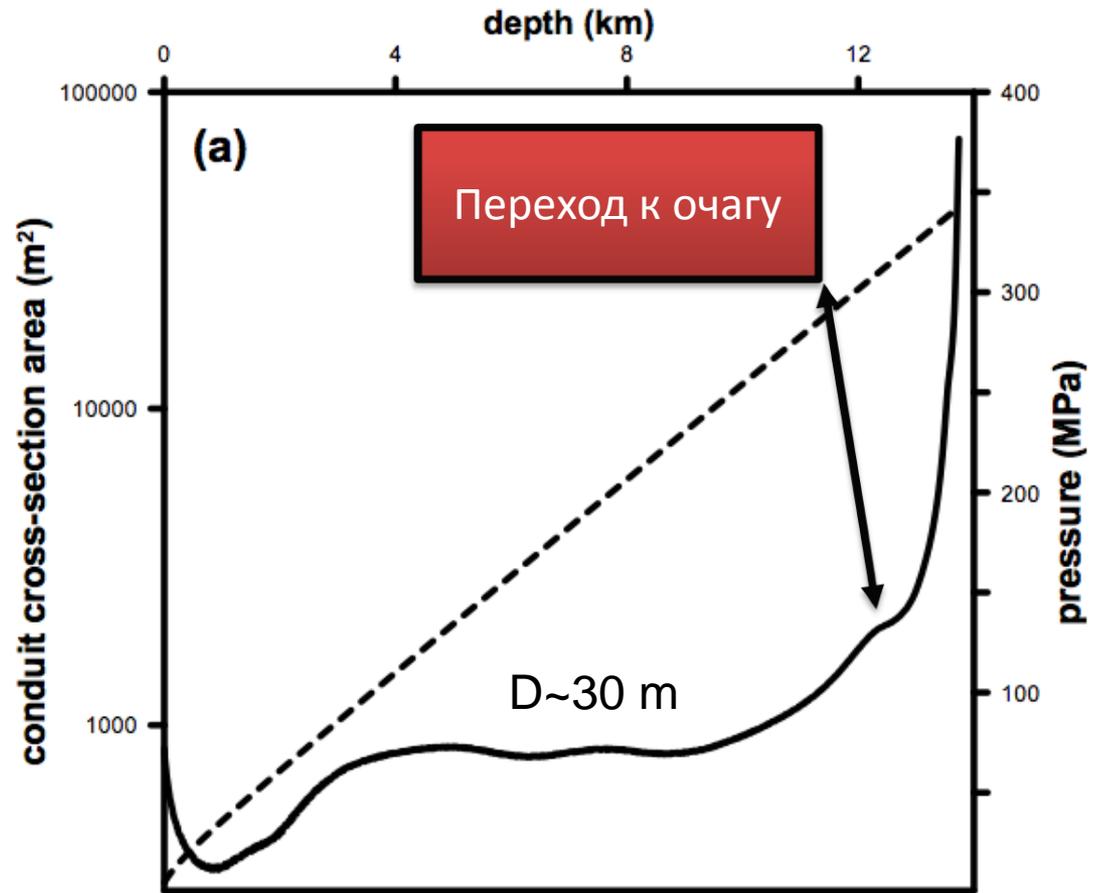
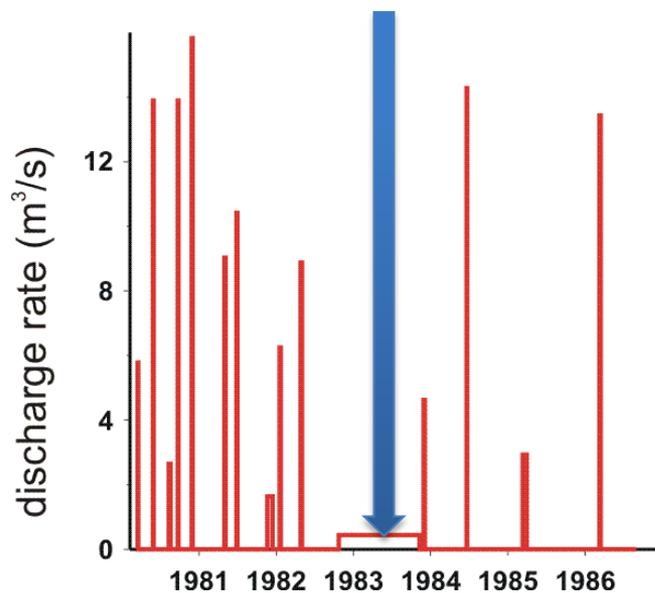
Находим распределения (z)

- Температура
- Давление
- Степень кристаллизации
- Площадь сечения канала
- Скорости роста и нуклеации
- Вязкость...

Пример: Mt St Helens, 1983-1984



- Стационарный рост, $Q \sim 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$
- кристалличность $\sim 40\%$, PL+OPX



Вылезаем из канала!

