

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.
- Оценка параметров вулканических систем на основе данных расчетов. Методы Монте-Карло
- Учет нелинейной реологии магмы и кинетики кристаллизации.

МЕЛЬНИК ОЛЕГ ЭДУАРДОВИЧ

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

Страница курса в Интернете:

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



Blaise Pascal




Barry Voight

ОТ ПОРТРЕТОВ К ФОТОГРАФИЯМ



Time-lapse photography
of Mount St. Helens dome
growth

2004 - 2005

 USGS

Рост лавовых куполов

Цикличность, немонотонность,
паузы

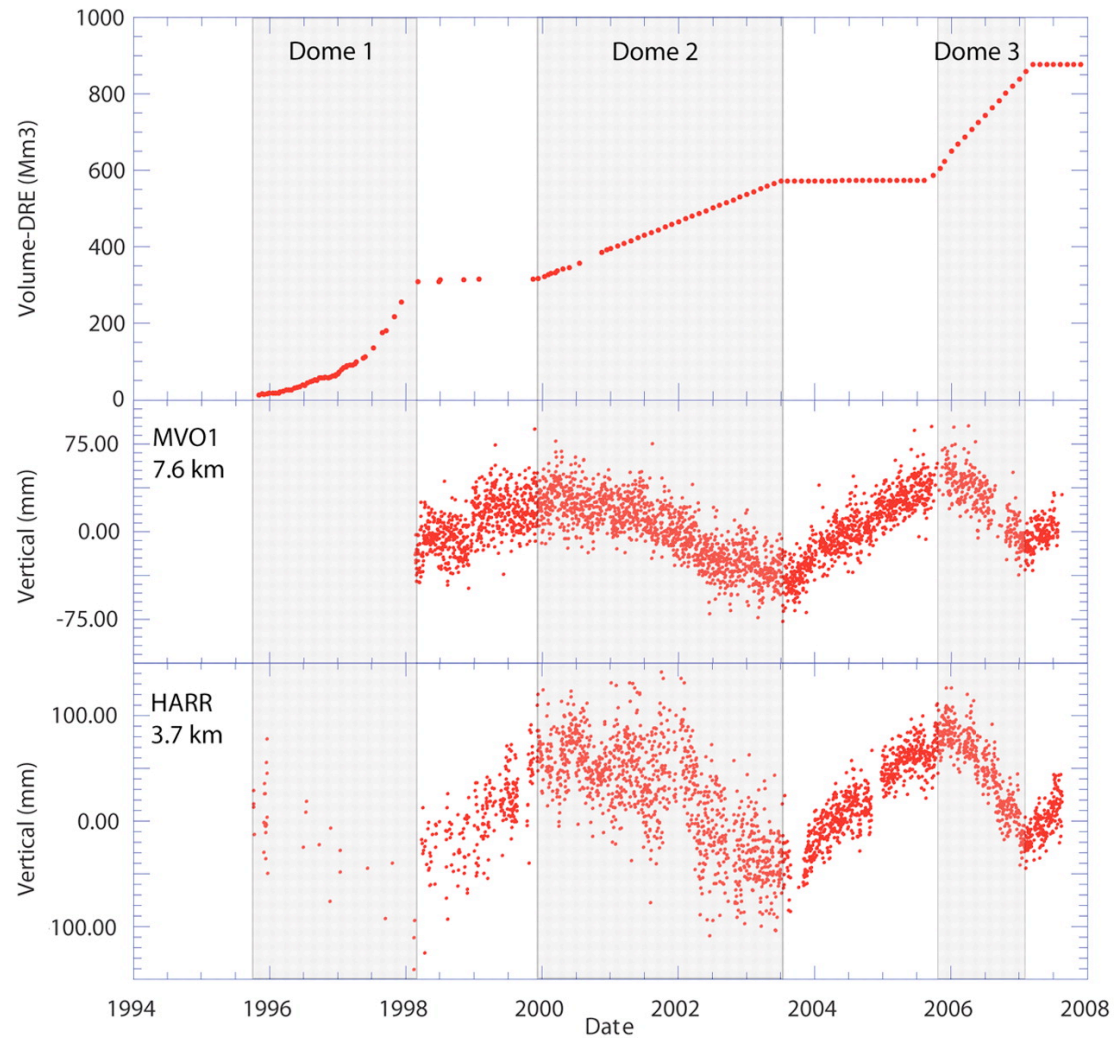
Данные полевых наблюдений

Циклические режимы (SHV)

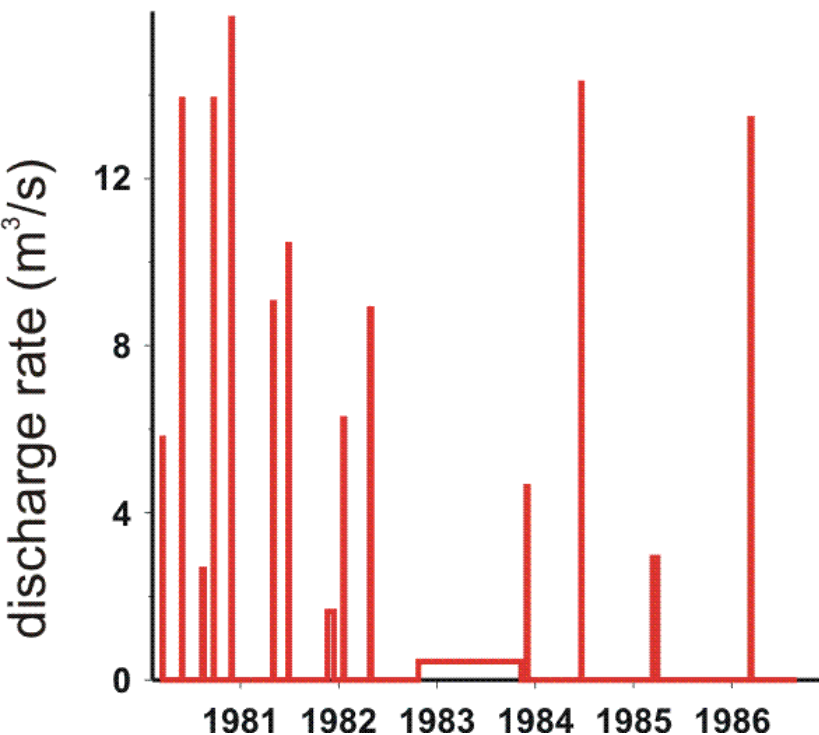
- Короткопериодные (часы, дни)
 - Угломерные измерения
 - Сейсмические данные
- Длиннопериодные (2-3 года)
 - Рост купола
 - Паузы в извержениях
 - Деформации поверхности (опускание во время роста, поднятие при паузах)
- Промежуточные (5-7 недель)
 - Быстрое изменение скорости роста купола
 - Сейсмические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



Объем купола и деформации поверхности на SHV



Mount St. Helens (1980-1987)



3 периода роста купола;

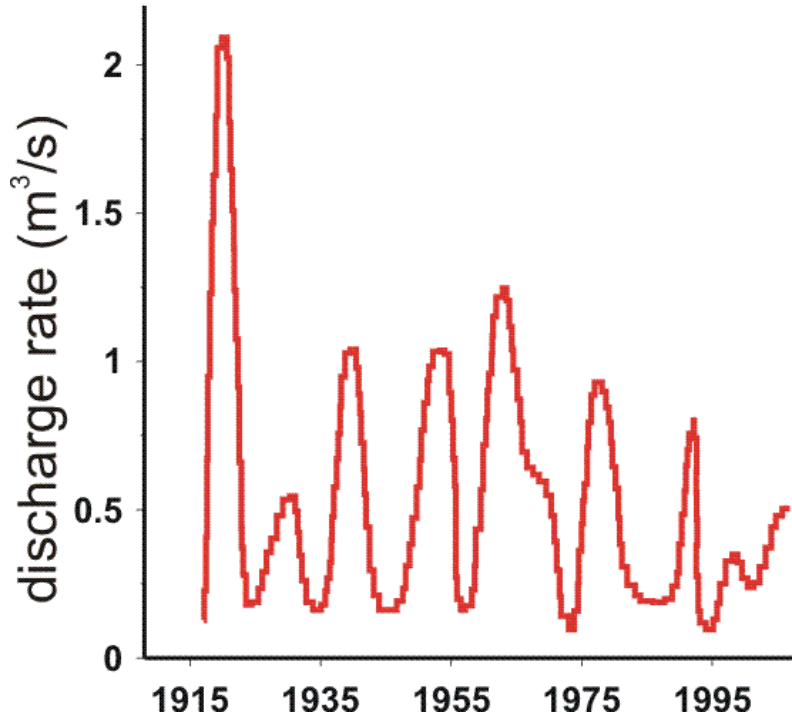
I - 8 всплесков $5-15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_{av} \approx 0.67 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

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

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



Santiaguito (1922-2010-?)



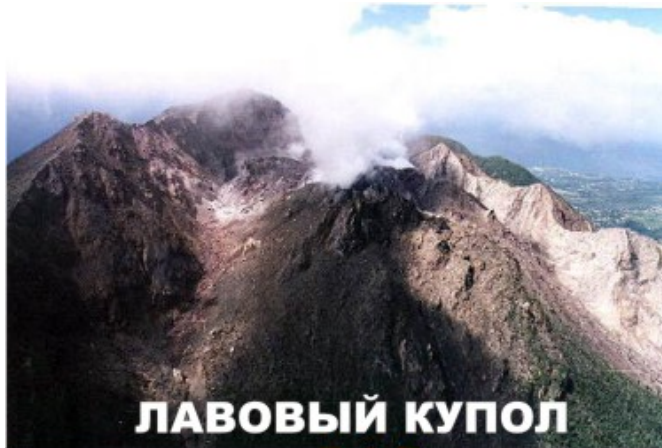
Циклы: 8 с 1922 г.

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

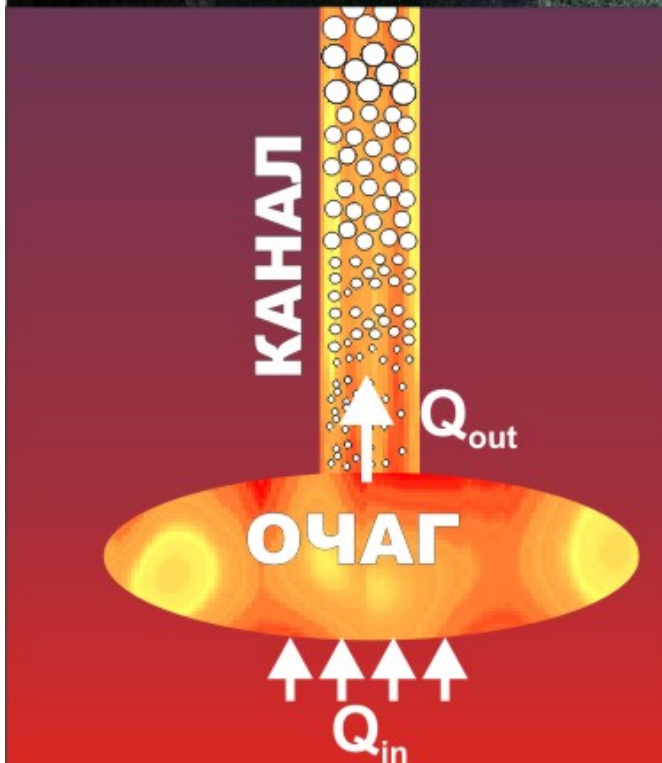
Слабый ($\sim 0.2\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$): 3-11-лет

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

Экструзивный режим извержения



ЛАВОВЫЙ КУПОЛ

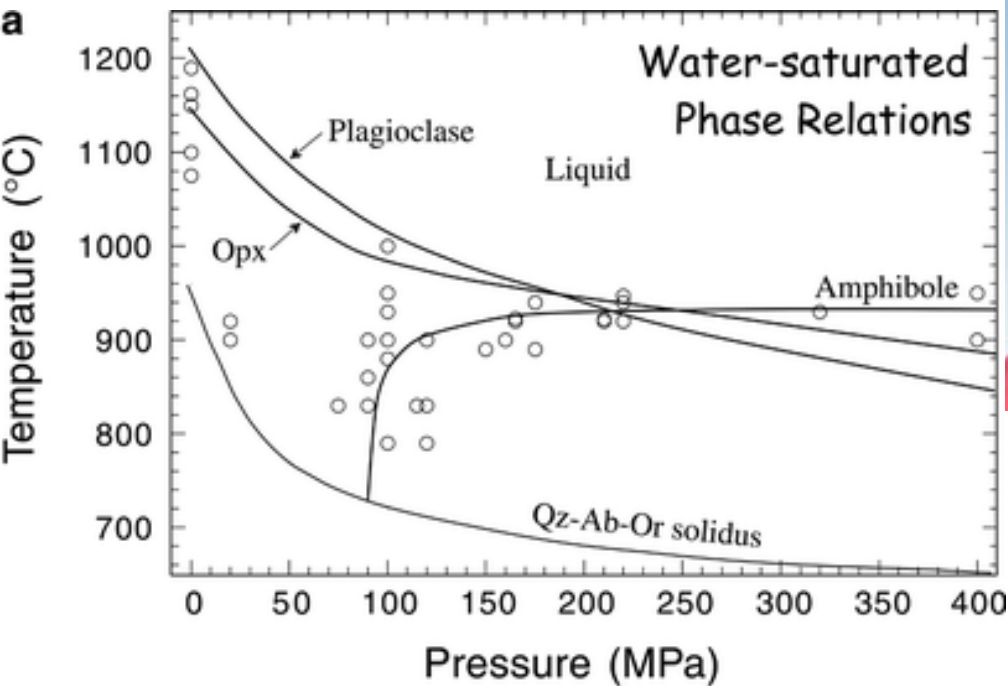


Медленный подъем
(0.1-30 мм/с)



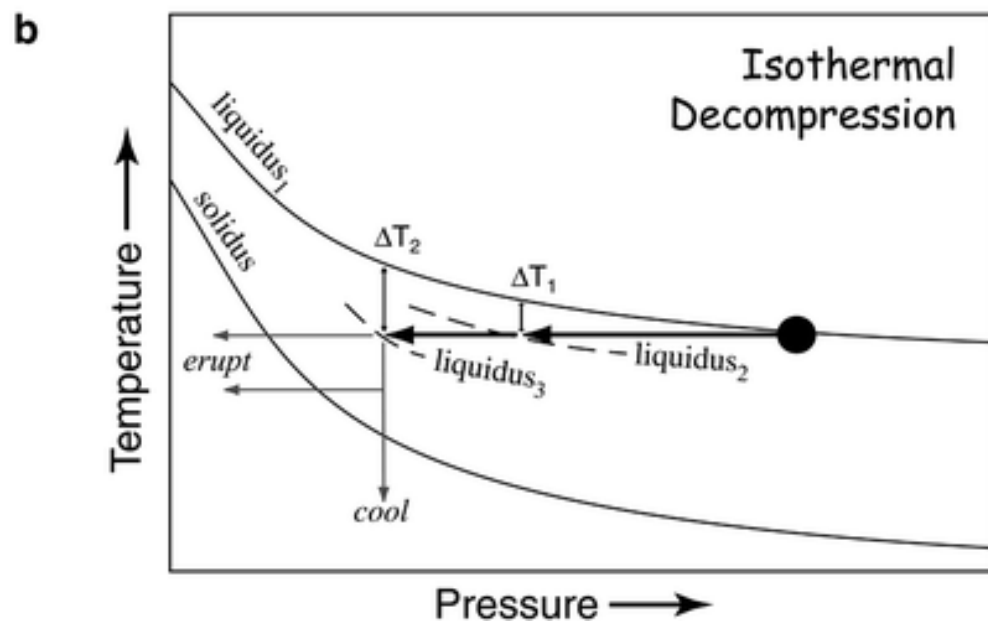
- ❖ Кристаллизация магмы при подъеме приводит к росту вязкости
- ❖ Слияние пузырьков и фильтрация газа через них
- ❖ Подпитка очага в процессе извержения свежей магмой

КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАГМЫ



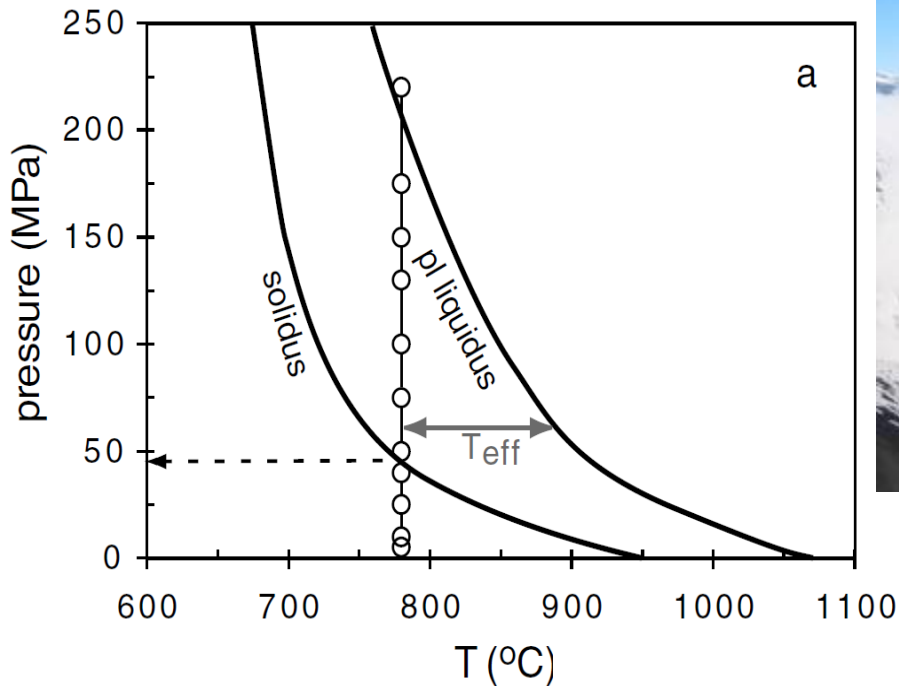
Пример фазовой диаграммы вулкана Маунт Сент Хеленс

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

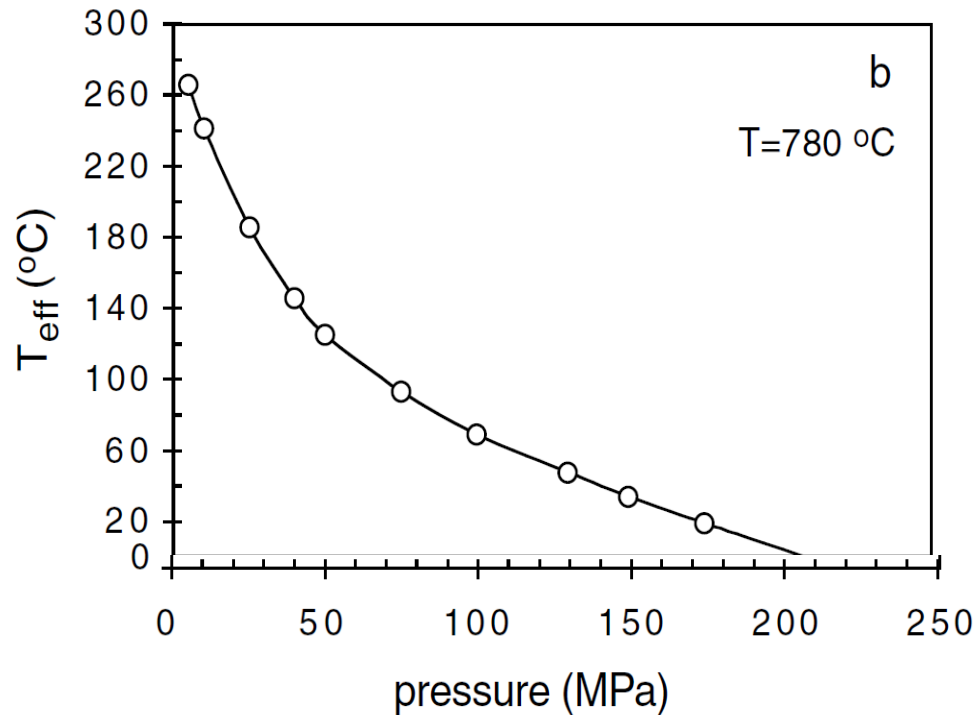


При подъеме магмы за счет падения давления происходит эффективное переохлаждение расплава и его кристаллизация.

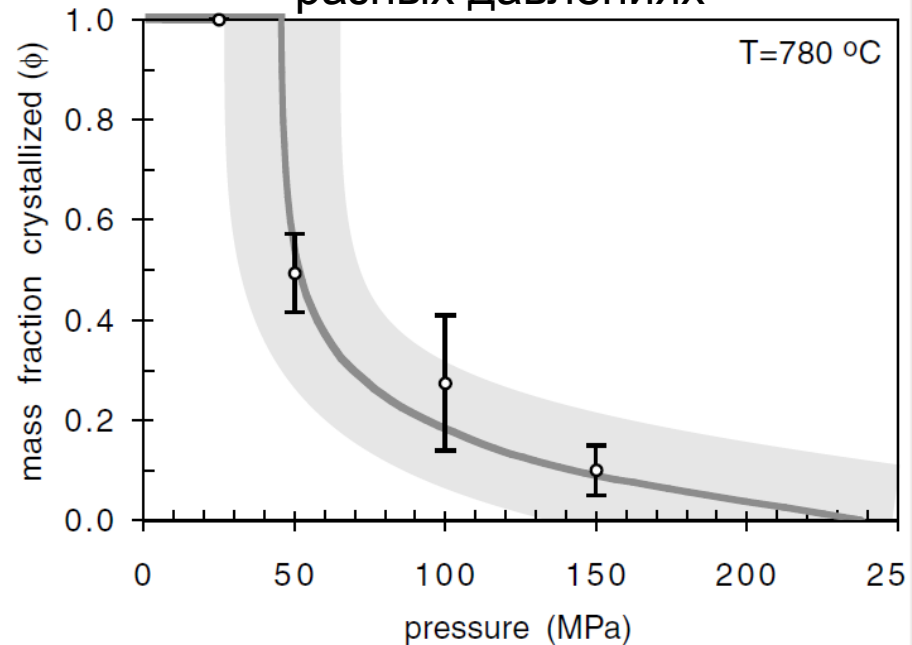
**Температура может оставаться постоянной!
 Или даже расти**



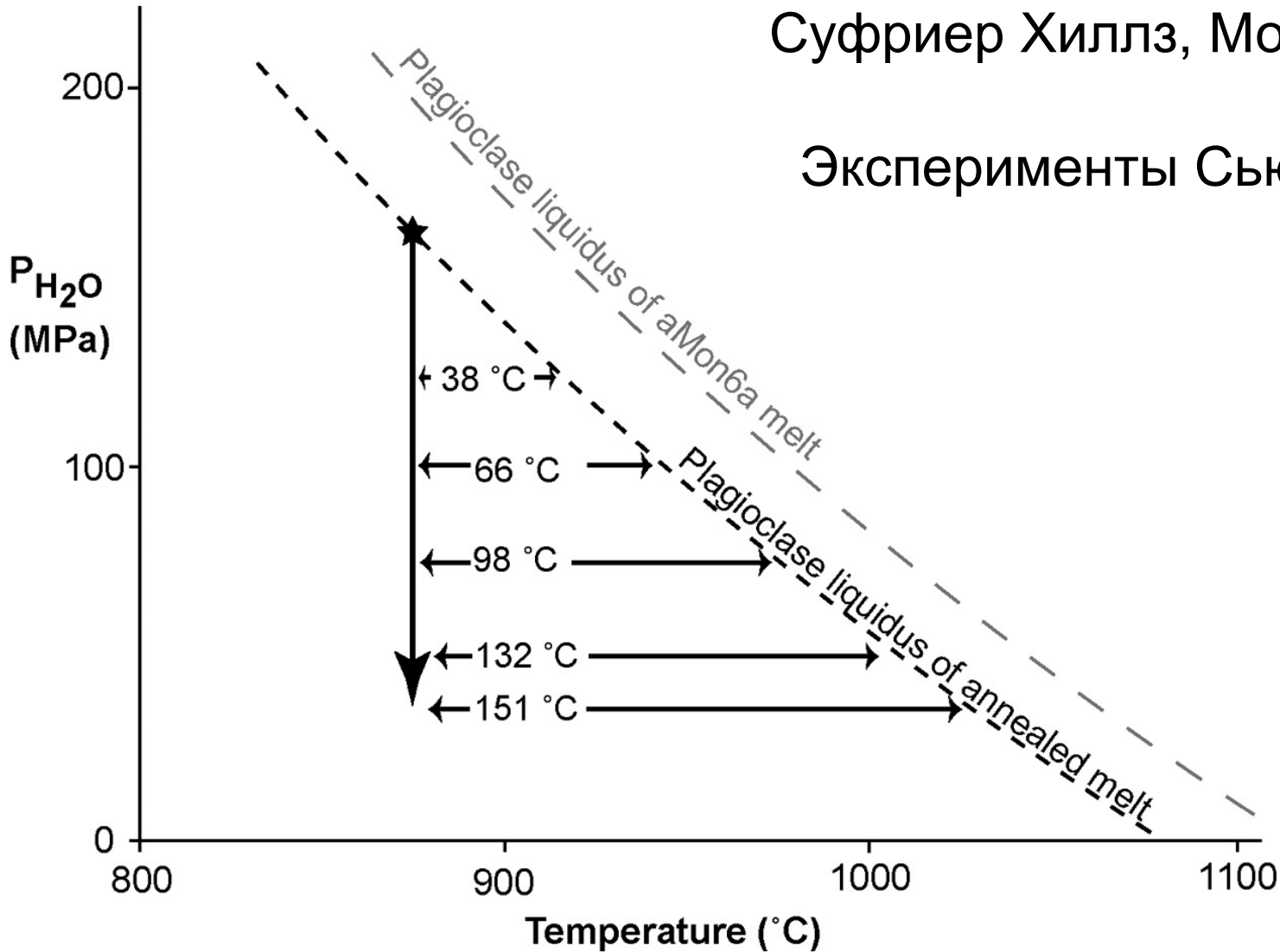
Hammer, JE, and Rutherford, MJ (2002) An experimental study of decompression-induced crystallization in silicic melt. *J. Geophys. Res.* 107(B1), 8-1 - 8-24.



Равновесная доля кристаллов при разных давлениях

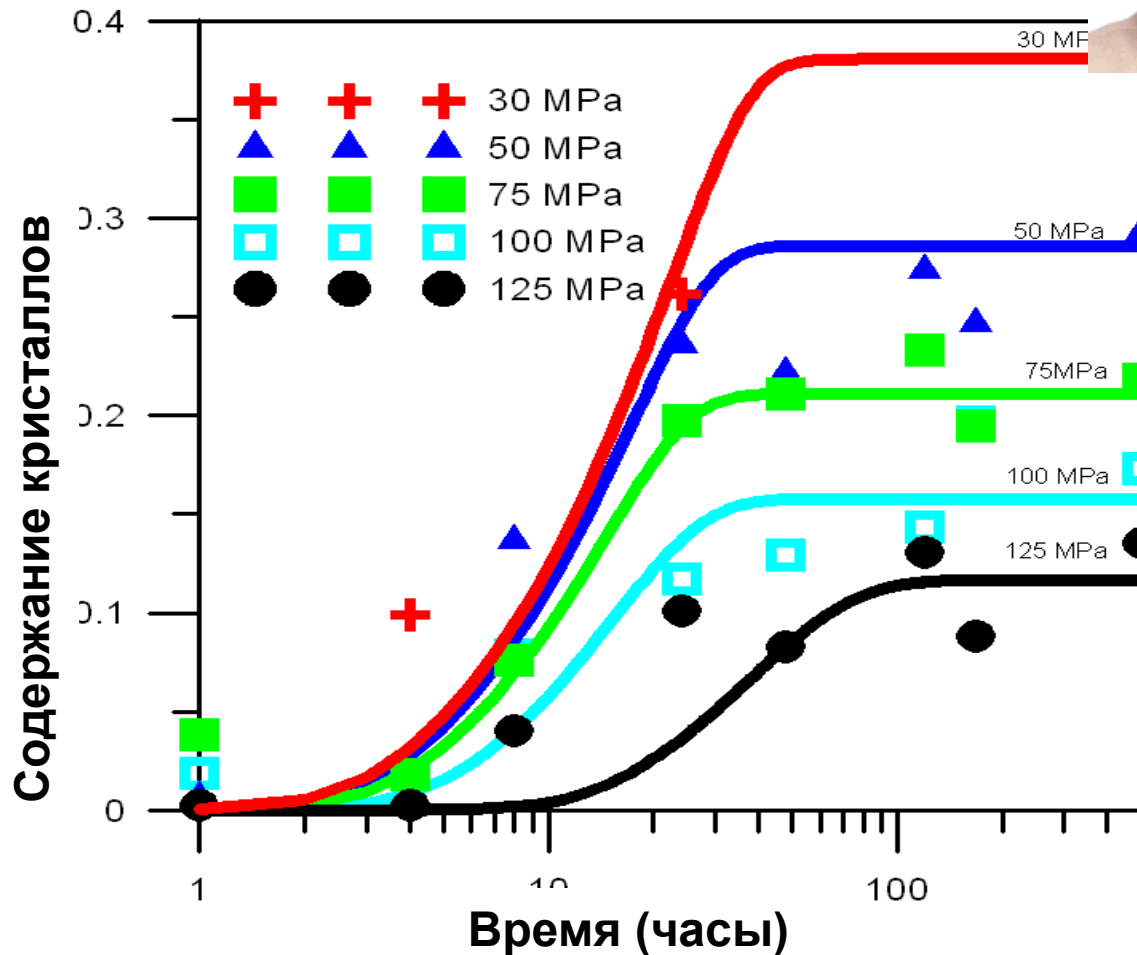


Кристаллизация магмы на вулкане
Суффриер Хиллз, Монтсеррат,
Эксперименты Сюзан Коуч



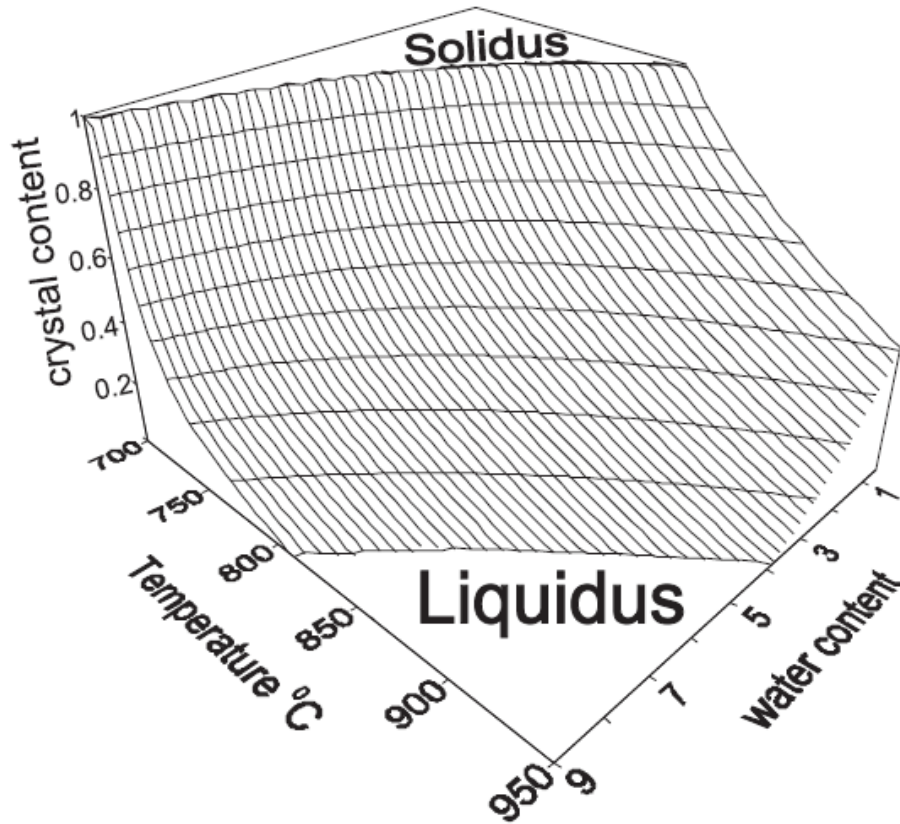
Обработка

О. Мельника



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.

Как я это сделал?



$$\beta_{eq}(p, T) = \frac{A(p)(T - T_{liq}(p))}{B(p) - T}.$$

Шаг 1.

Найти равновесную концентрацию кристаллов как функцию давления (P_{H_2O}) и температуры
Имеется:

$$\beta_{eq}(p, T_{exp}) = \beta_{exp}(p, T_{exp})$$

$$\beta_{eq}(p, T_{sol}(p)) = 1$$

$$\beta_{eq}(p, T_{liq}(p)) = 0$$

Шаг 2. Определение эффективной температуры плавления

$$\beta_{eq}(p, T_{eq}, X) \Rightarrow T_m = T_{eq}(\beta_{eq}, p, X)$$

Соотношение для равновесной концентрации можно разрешить и получить значение равновесной температуры, которая будет температурой ликвидуса для остаточного расплава, если мы закристаллизовали β_{eq} кристаллов

Можно ввести понятие переохлаждения магмы

$$\Delta T = T - T_m$$

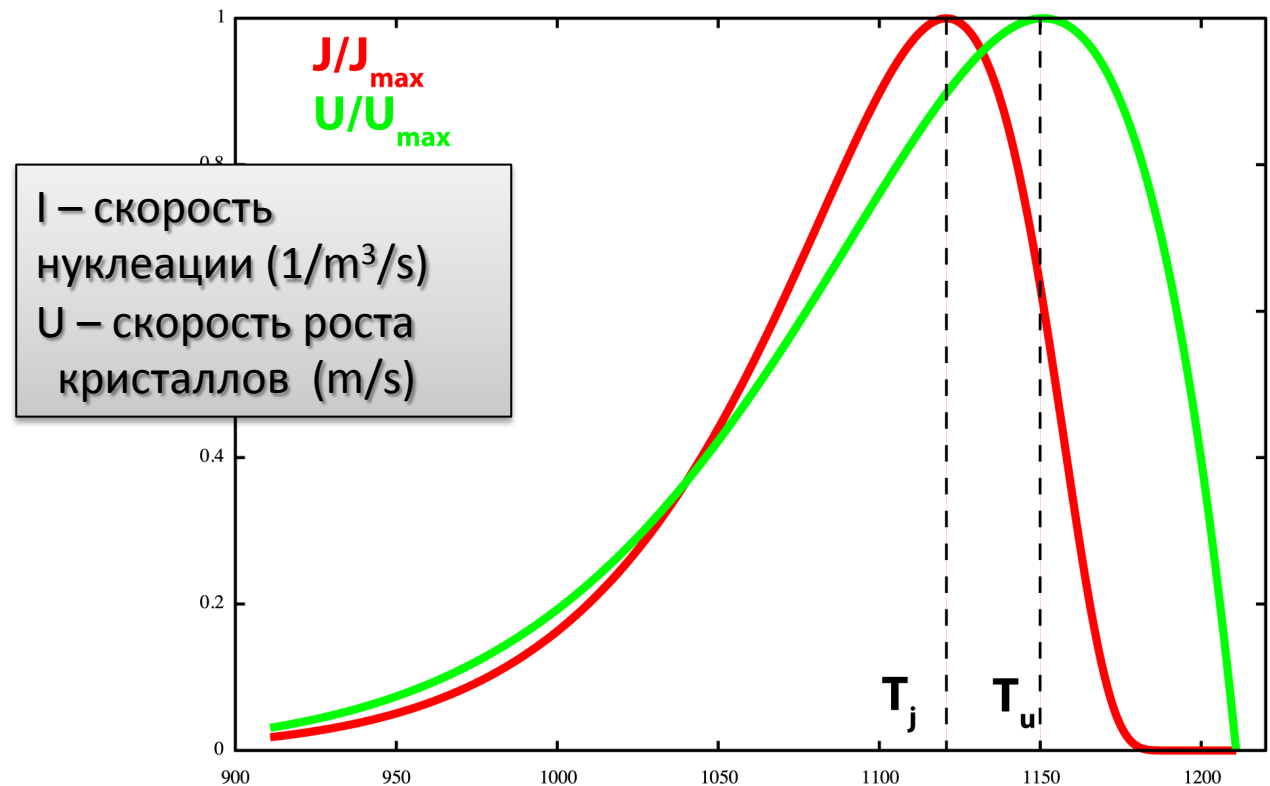
Шаг 3. Введение скорости роста и нуклеации как функции переохлаждения



$$I(T) = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_t}{RT}\right) \exp\left(-\frac{\Delta G_c}{RT}\right); \quad \Delta G_c = \frac{16}{3} \pi \frac{\Sigma^3}{\Delta h_v^2} \frac{T_m^2}{T_m - T}$$

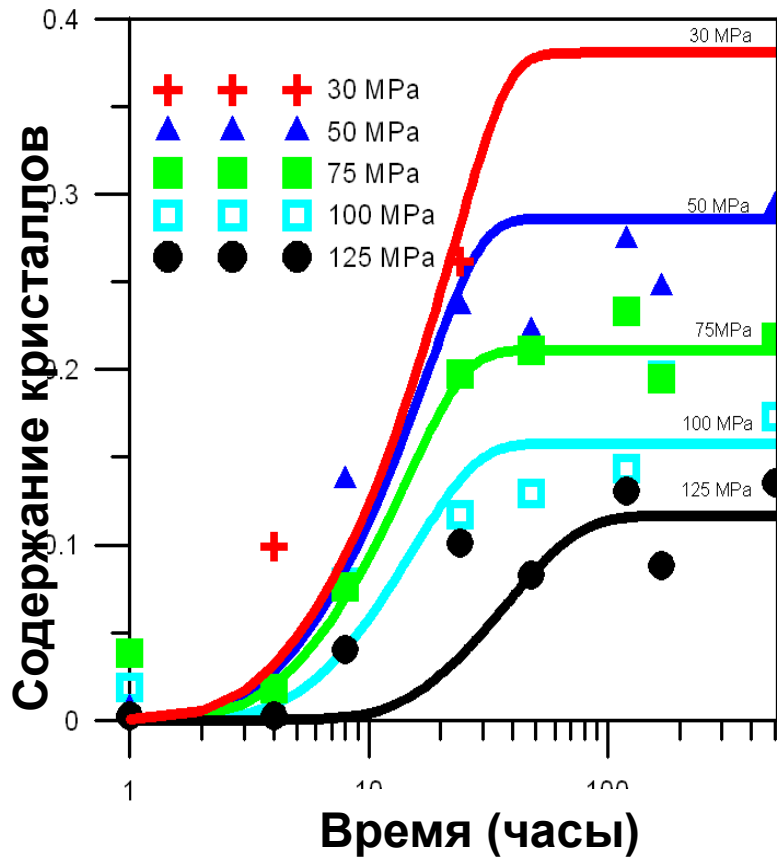
$$U(T) = U_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_t}{RT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta h_v(T_m - T)}{RT_m T}\right)\right] \quad (5)$$

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.



Шаг 4. Моделирование кристаллизации

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

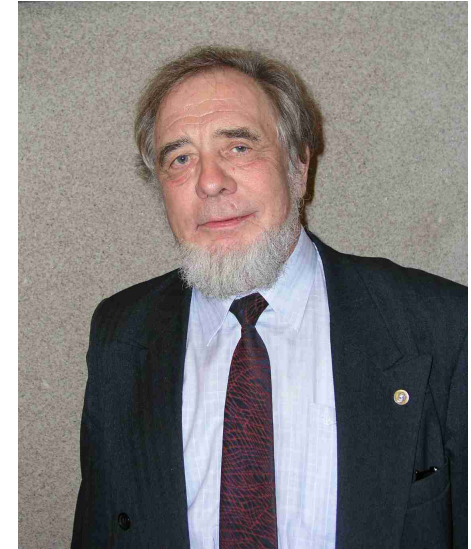


Площадь поверхности всех кристаллов, зародившихся от $t = 0$ до t

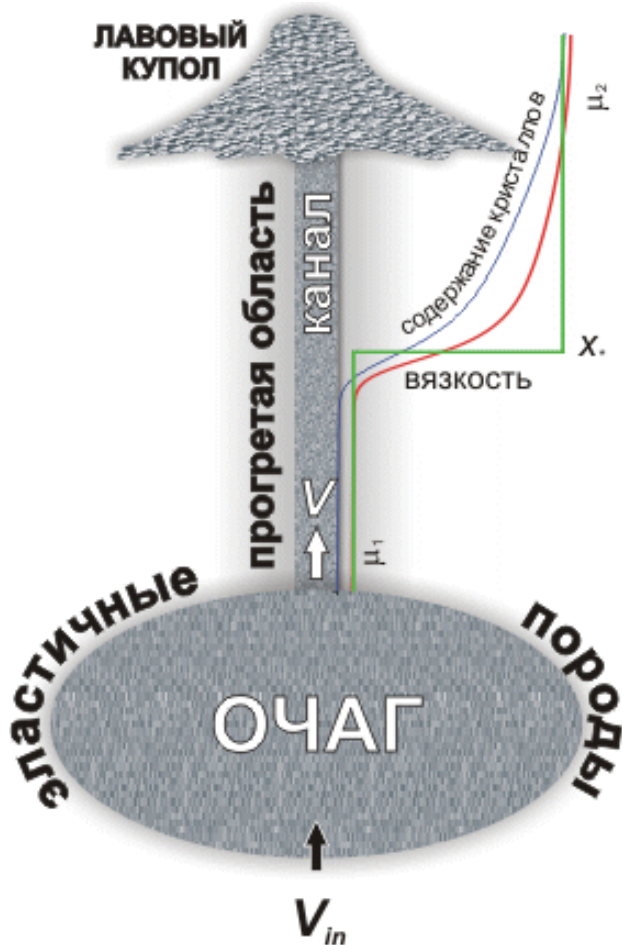
Забудем о сложностях.
На время

Простейшая модель подъема
магмы с кристаллизацией.

Простейшая модель

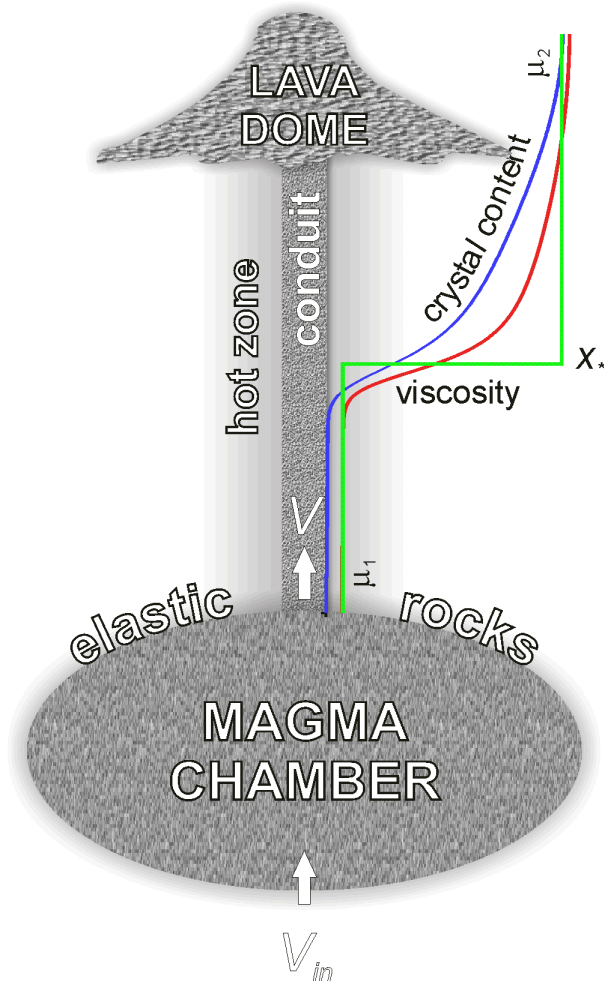


Barmin, A, Melnik, OE & Sparks, RSJ. 'Periodic behavior in lava dome eruptions', *Earth and Planetary Science Letters*, 199 (1-2), (pp. 173-184), 2002.



- ✓ 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



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

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

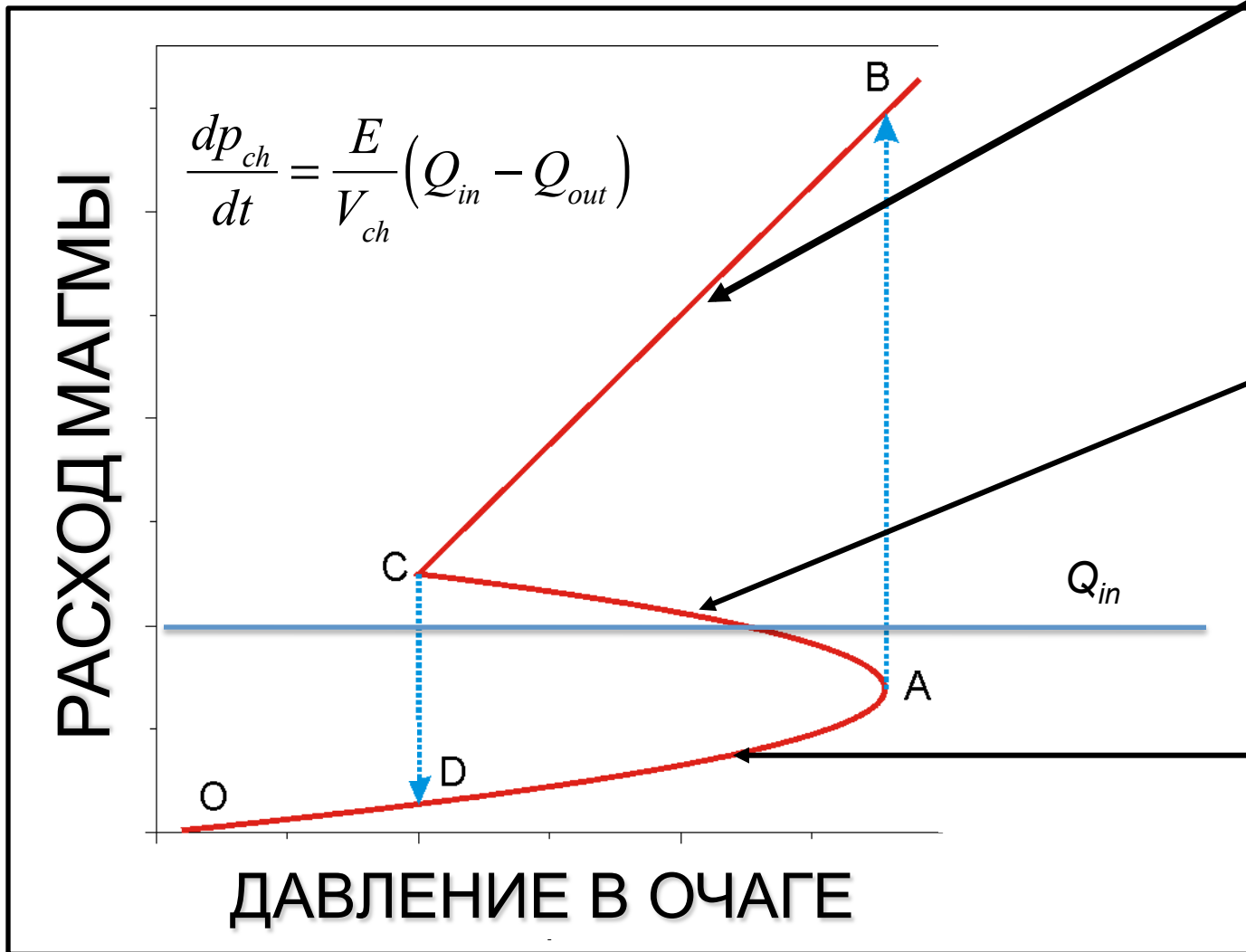
$$\frac{\partial}{\partial t} \beta + V \frac{\partial \beta}{\partial x} = U$$

Граничные условия

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

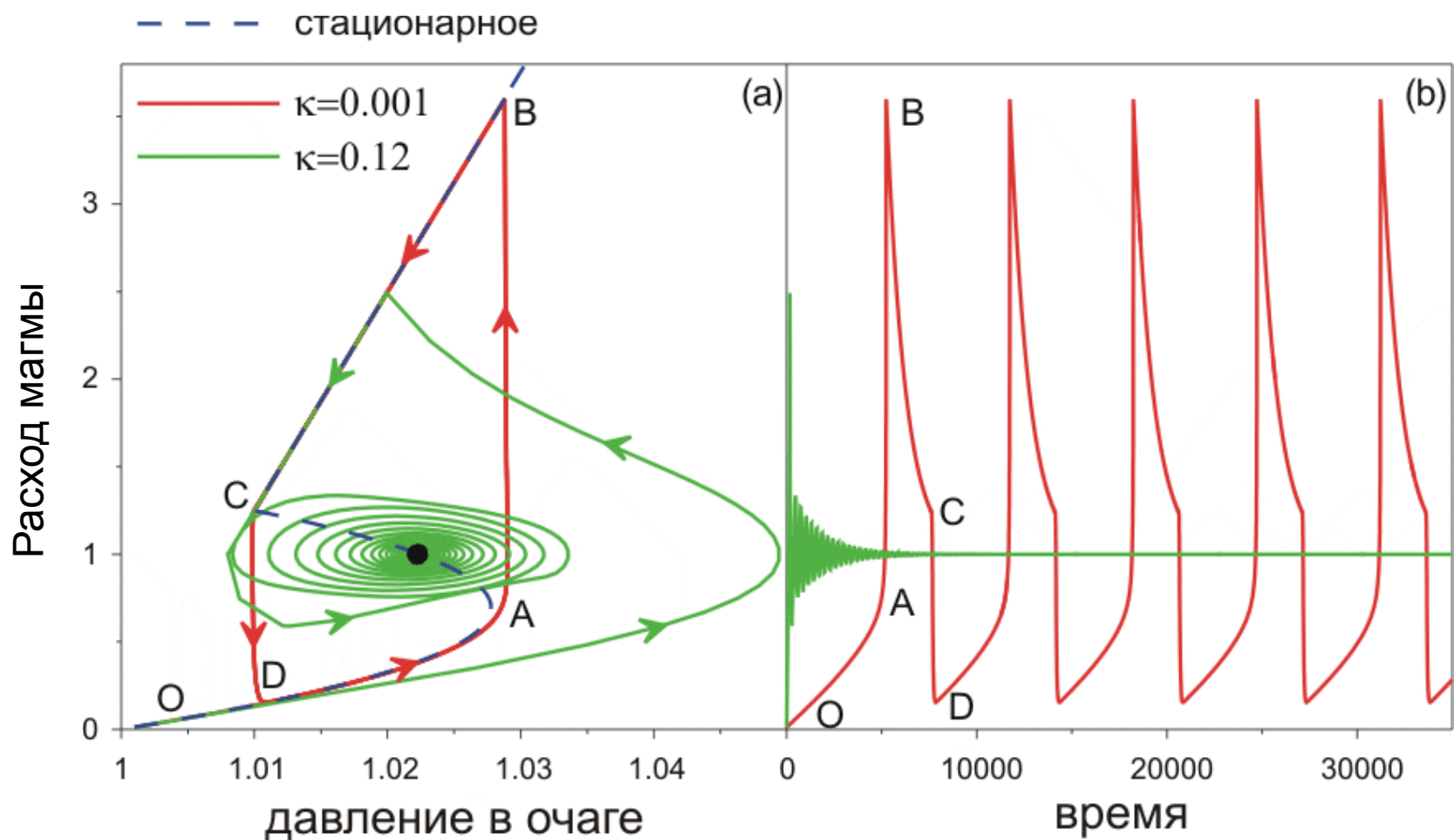
$$x = L: p = 0$$

Стационарное решение

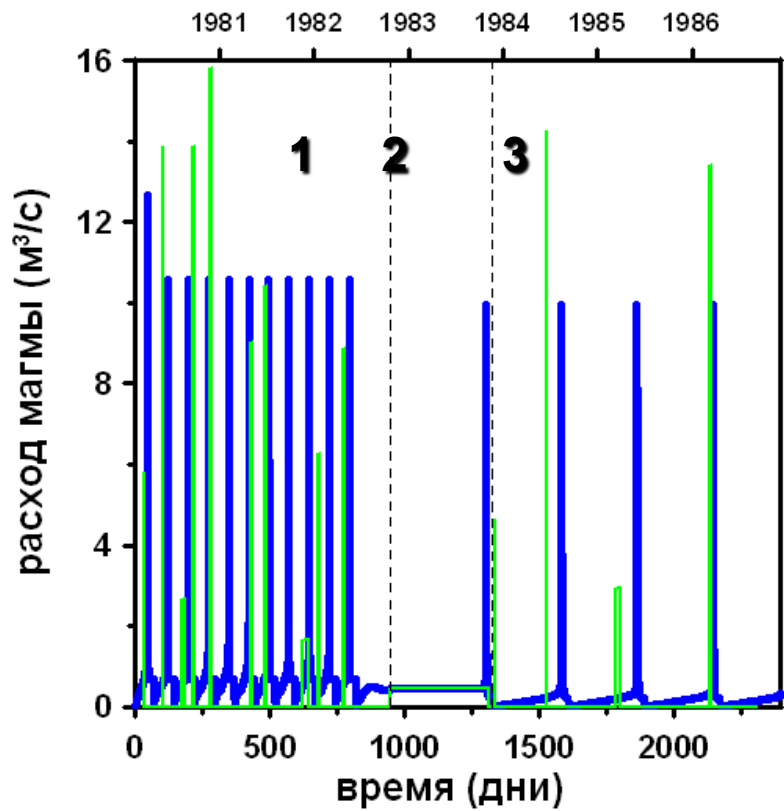


Результаты расчетов по нестационарной модели

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



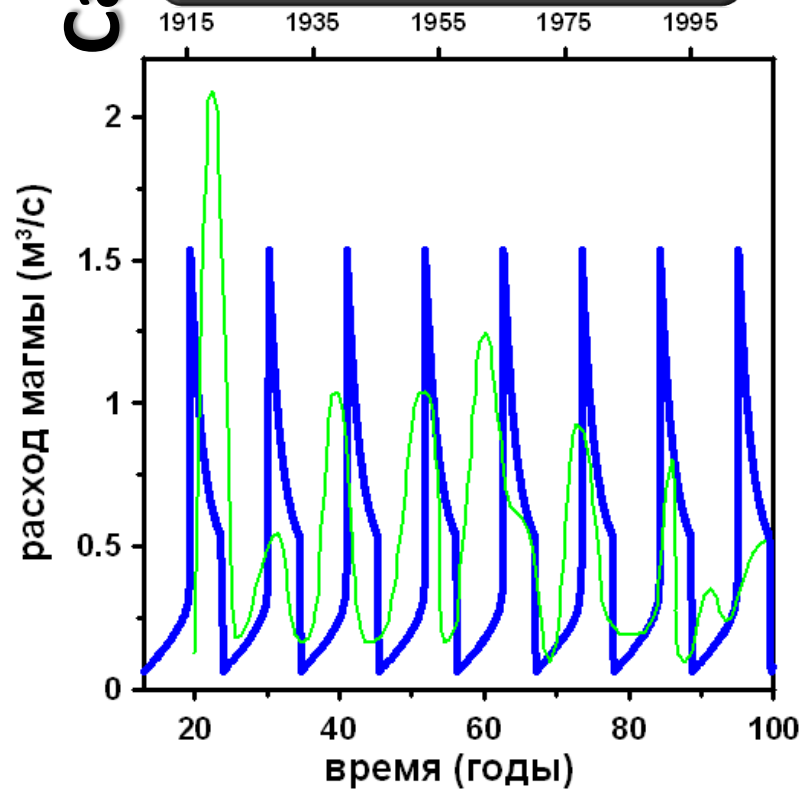
Ст Хеленс



Расчет

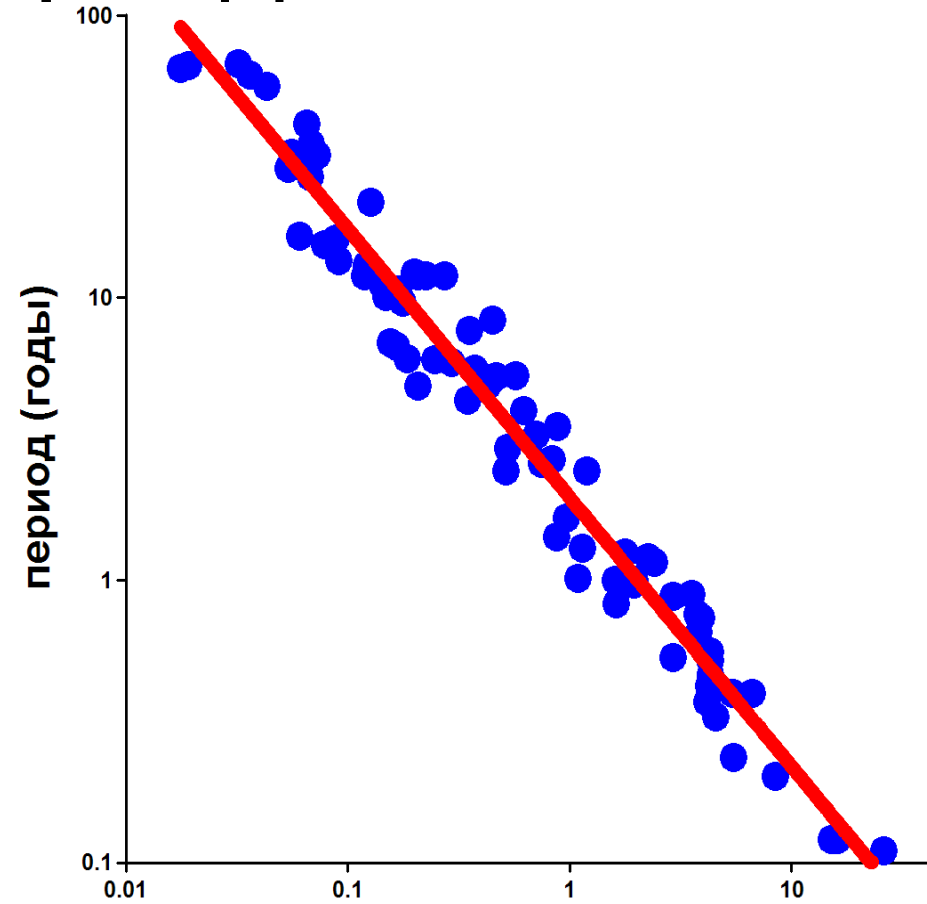
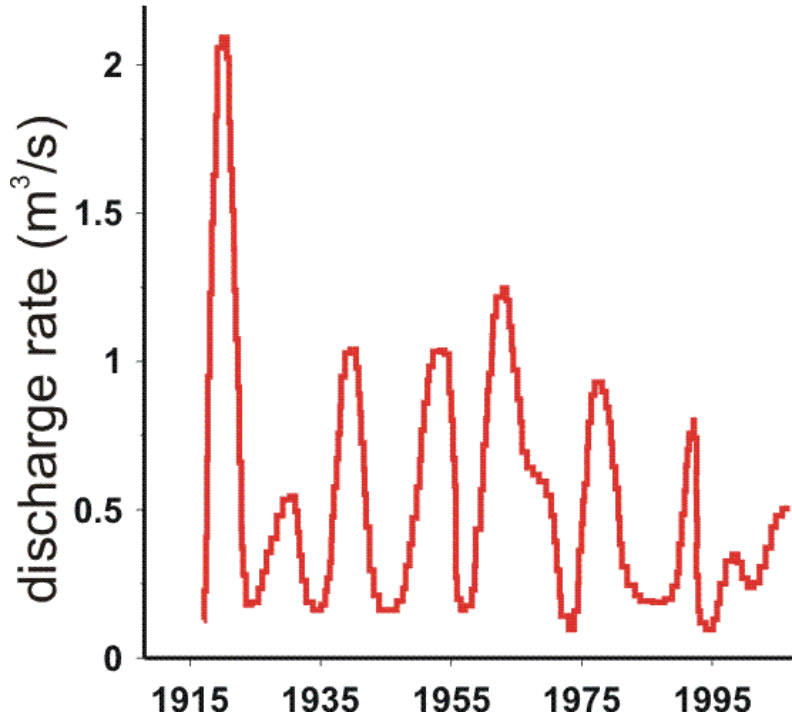
Наблюдения

Сантьяго



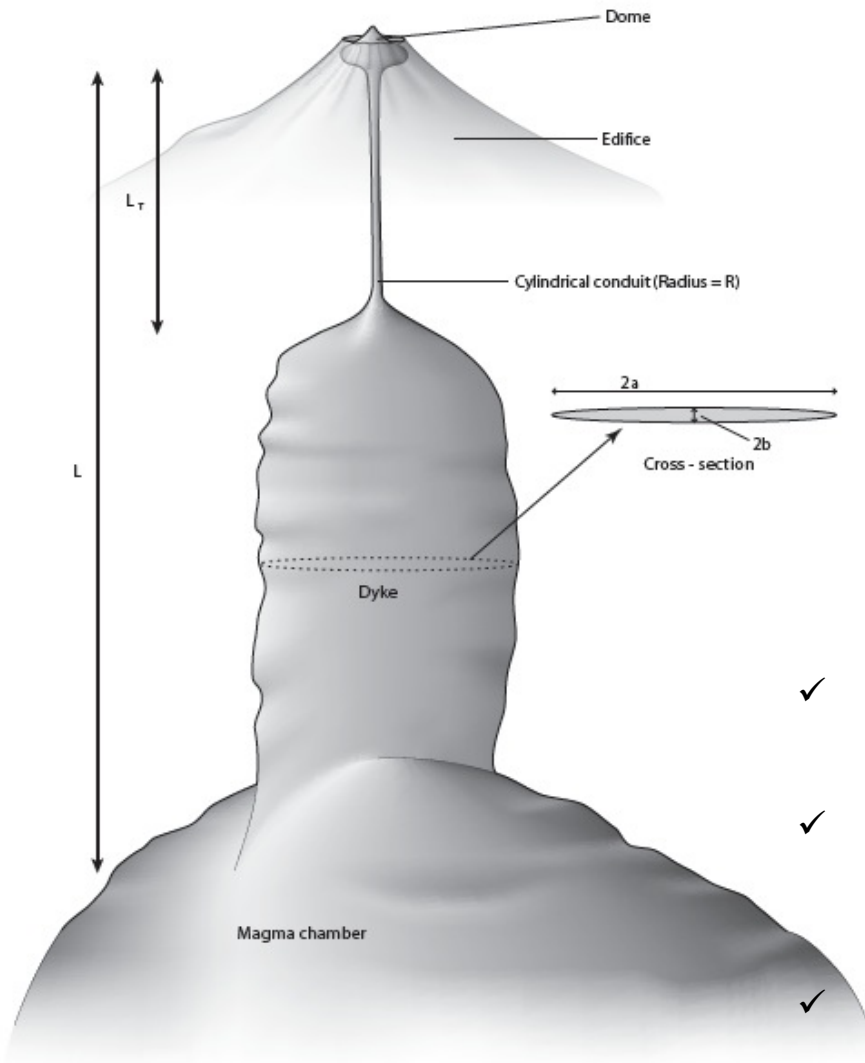


Что определяет период колебаний?



$$\Theta = \frac{Q_{in} E}{V_{ch}}$$

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

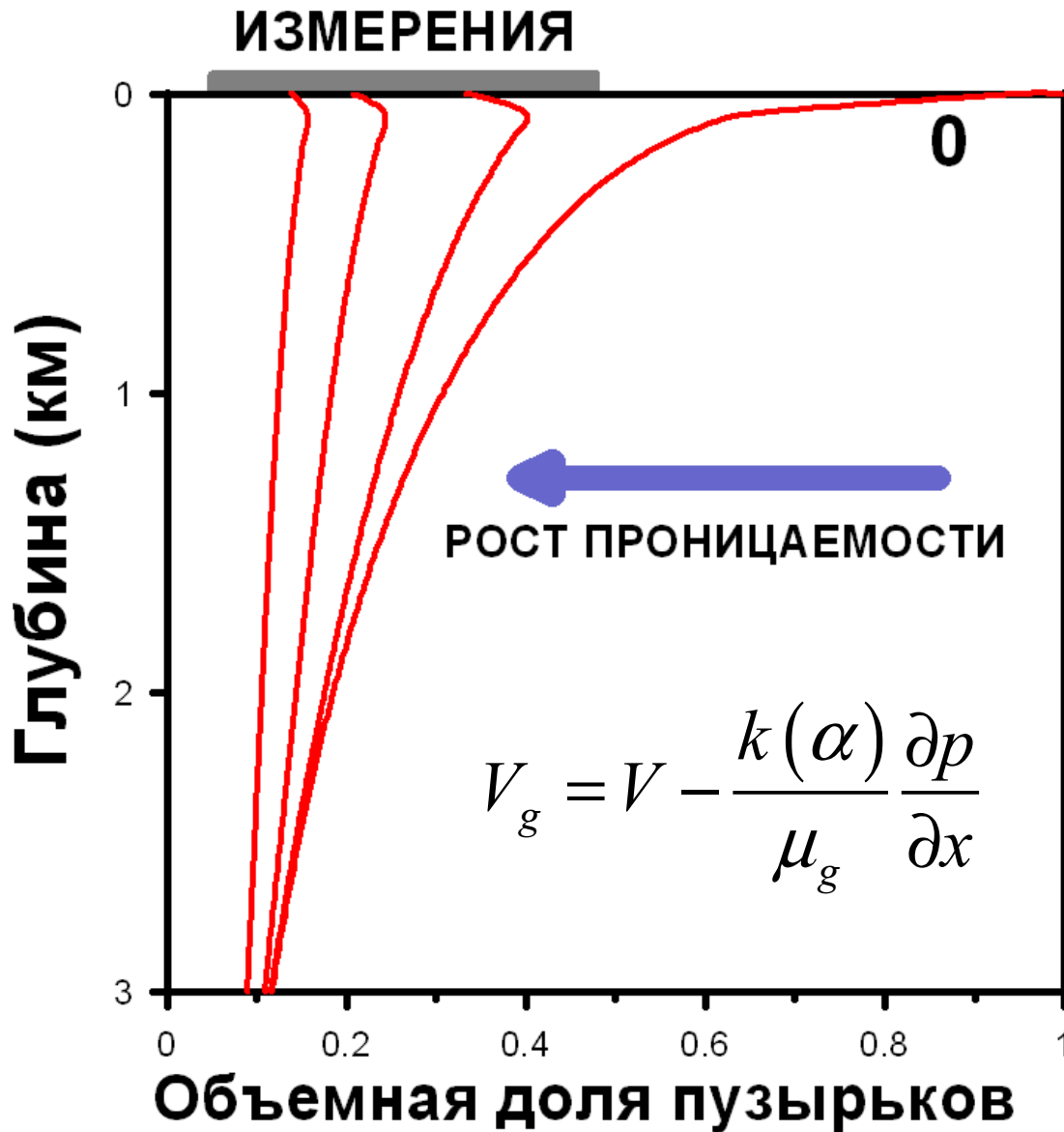
$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho g - 4\mu \frac{a^2 + b^2}{a^2 b^2} V \quad (6) \quad V_g - V = -\frac{k}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

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

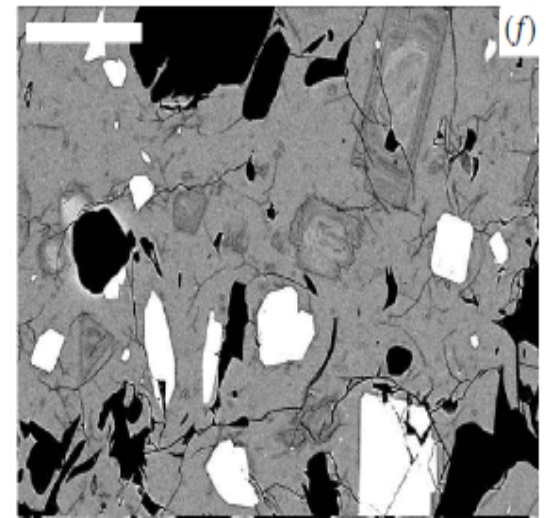
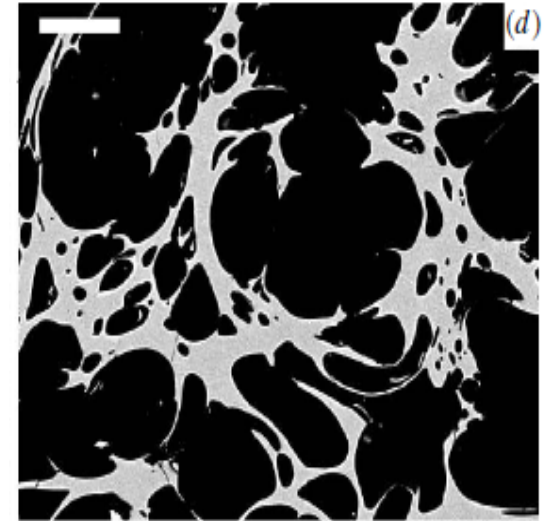
Уравнения
импульса

Низкая пористость купола

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

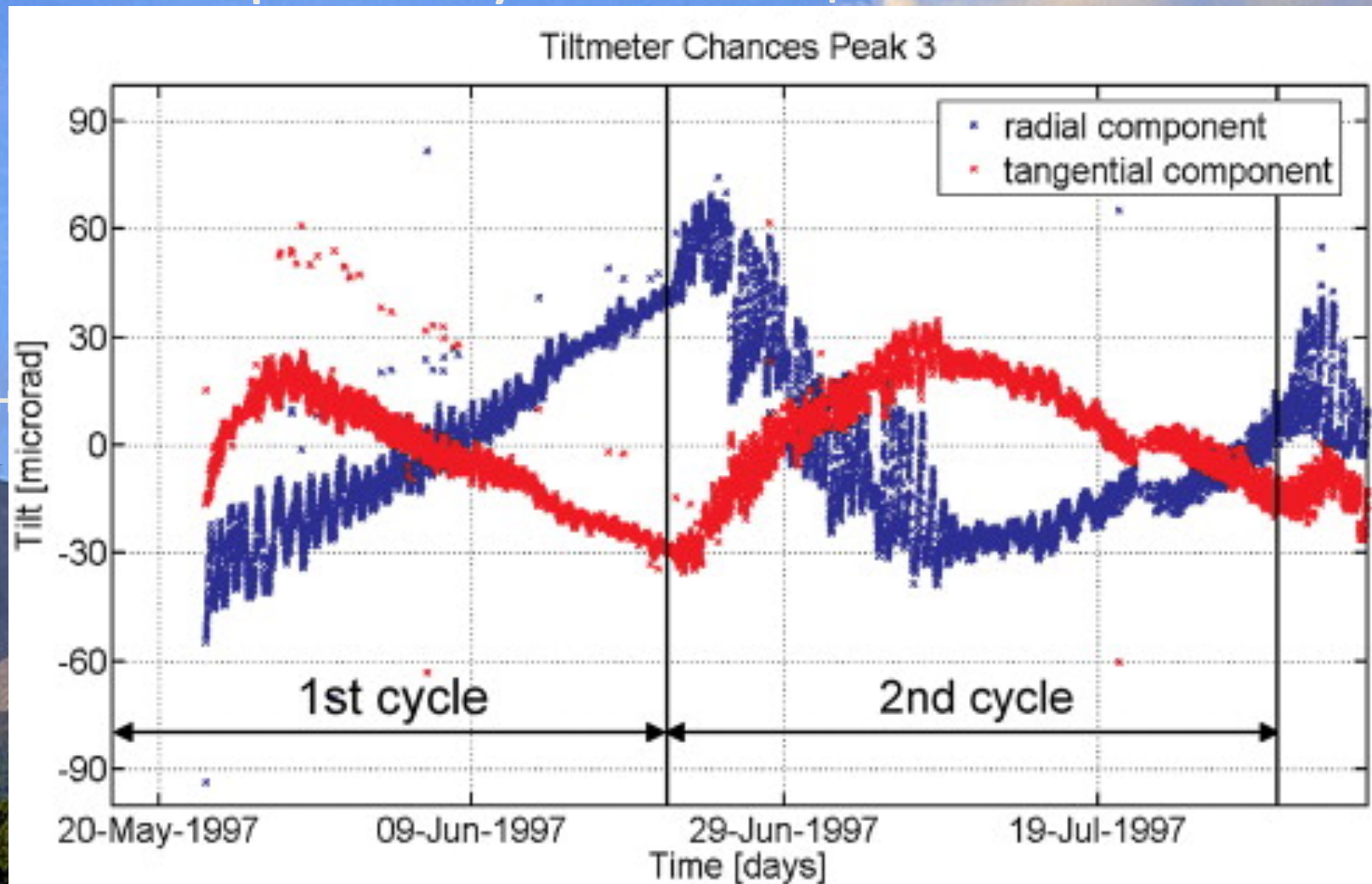


ПЕМЗА



ЛАВОВЫЙ КУПОЛ

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



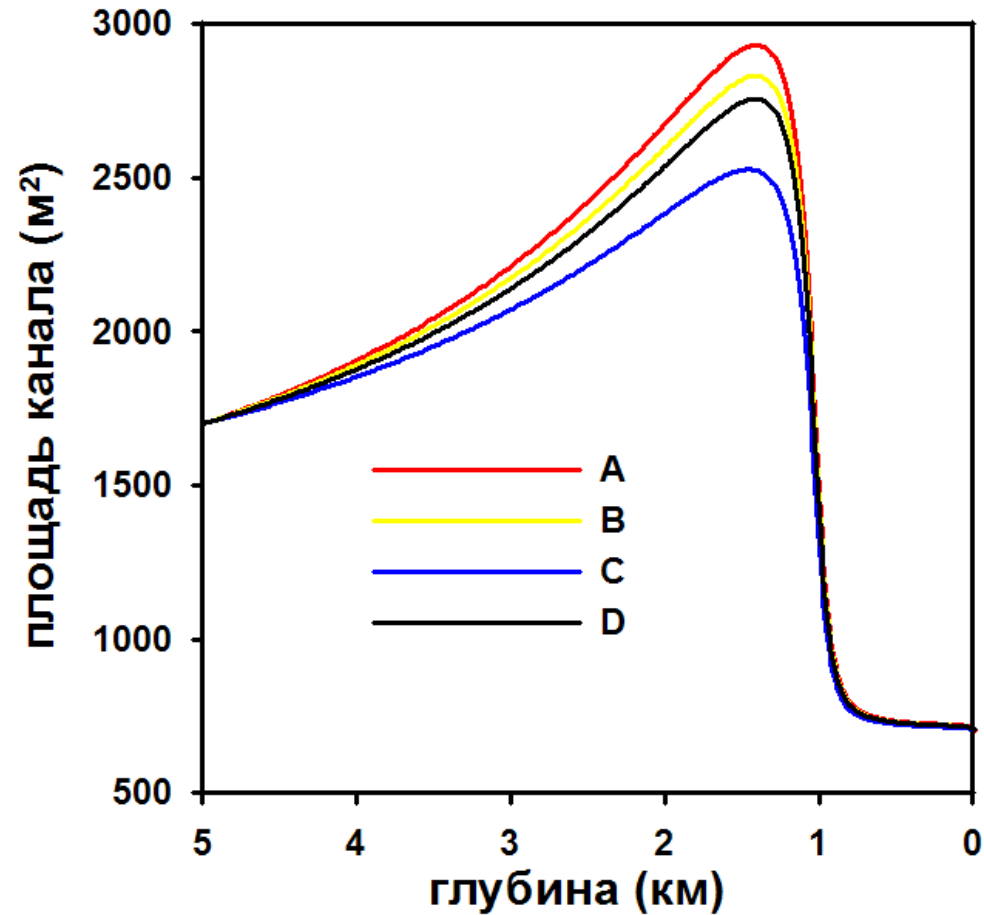
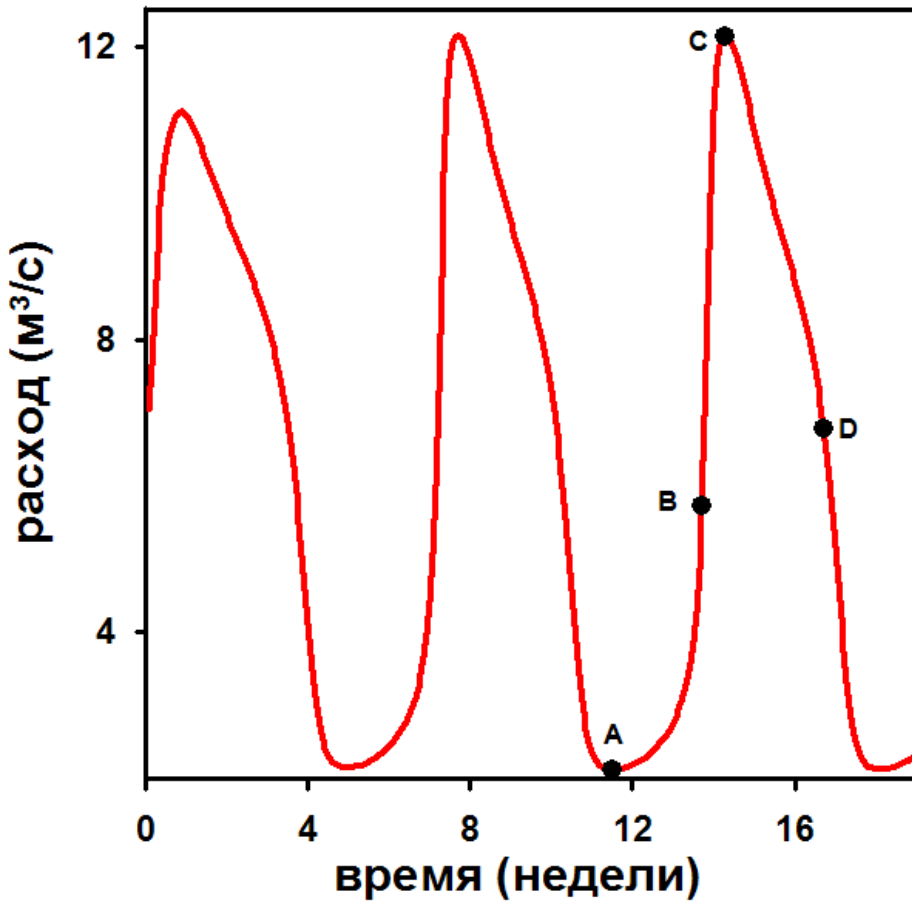
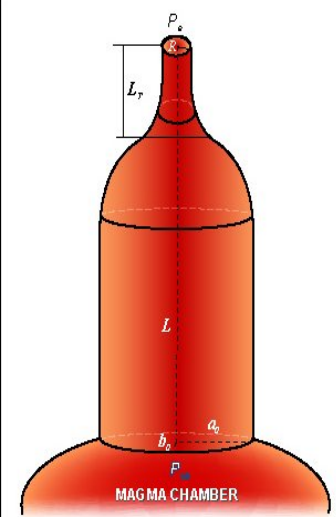
Наклон



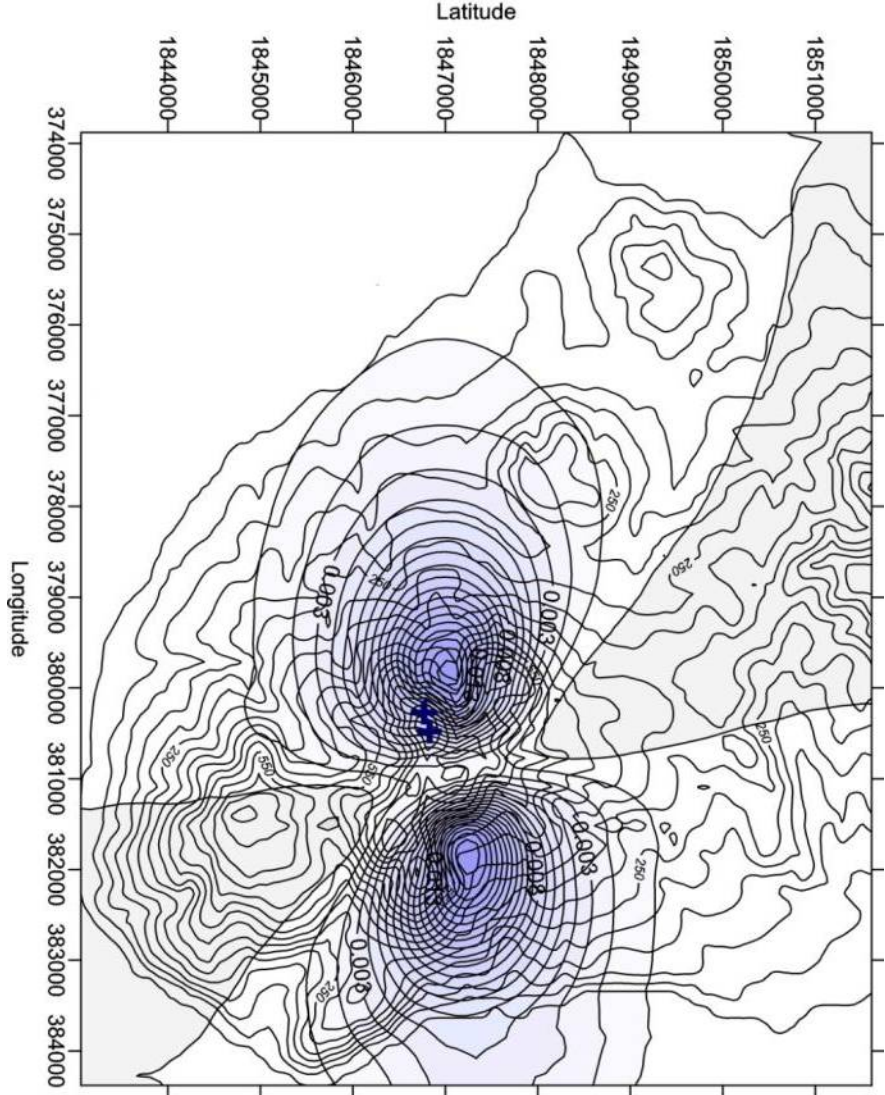
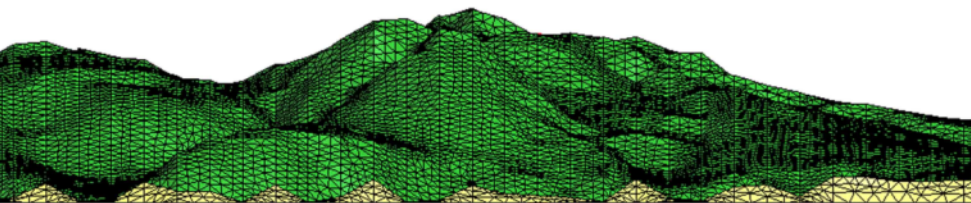
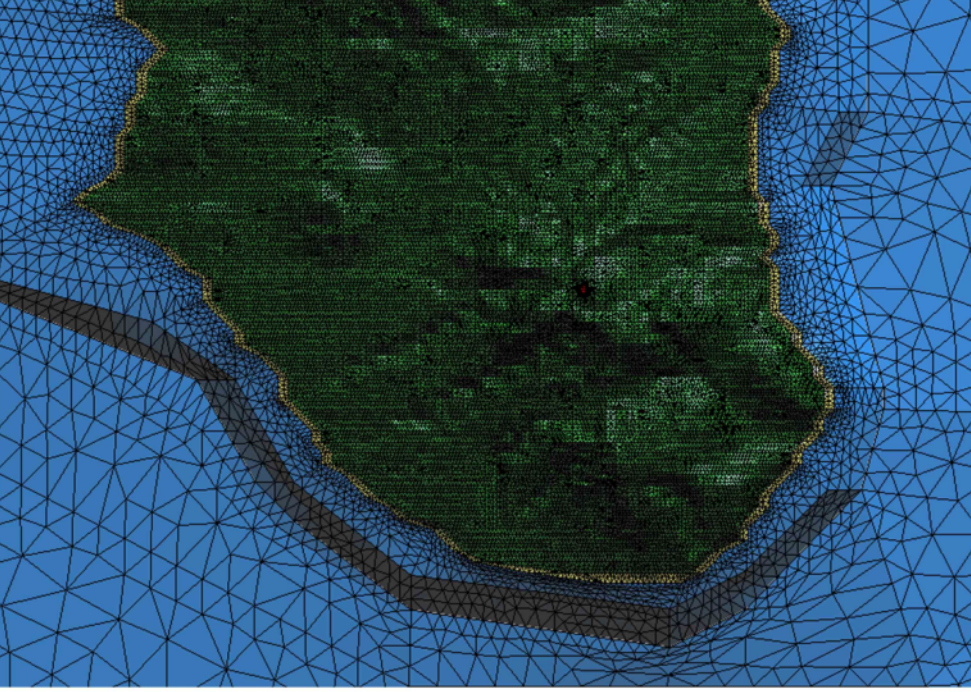
Моделирование извержения



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



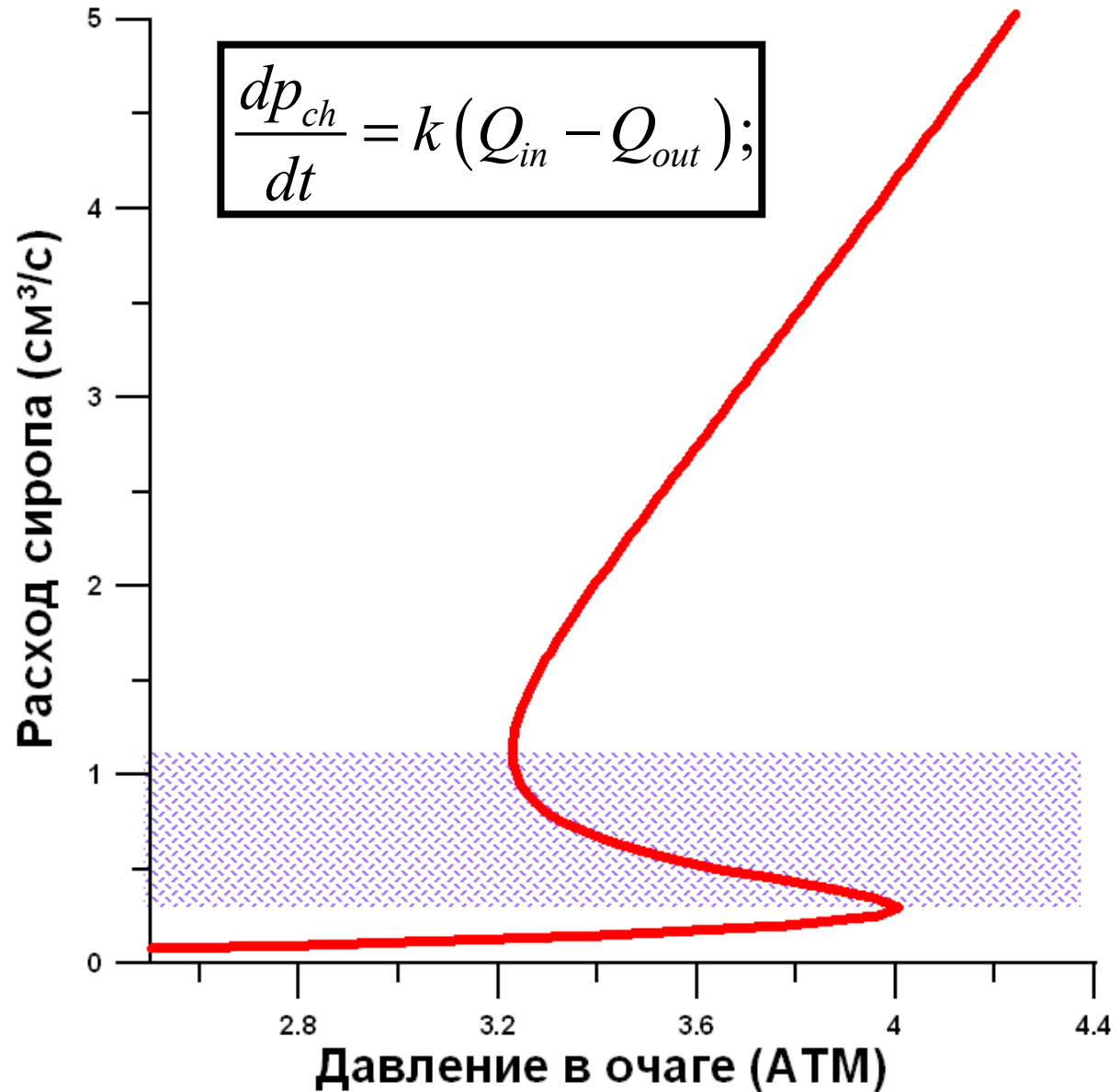
Моделирование угловых измерений

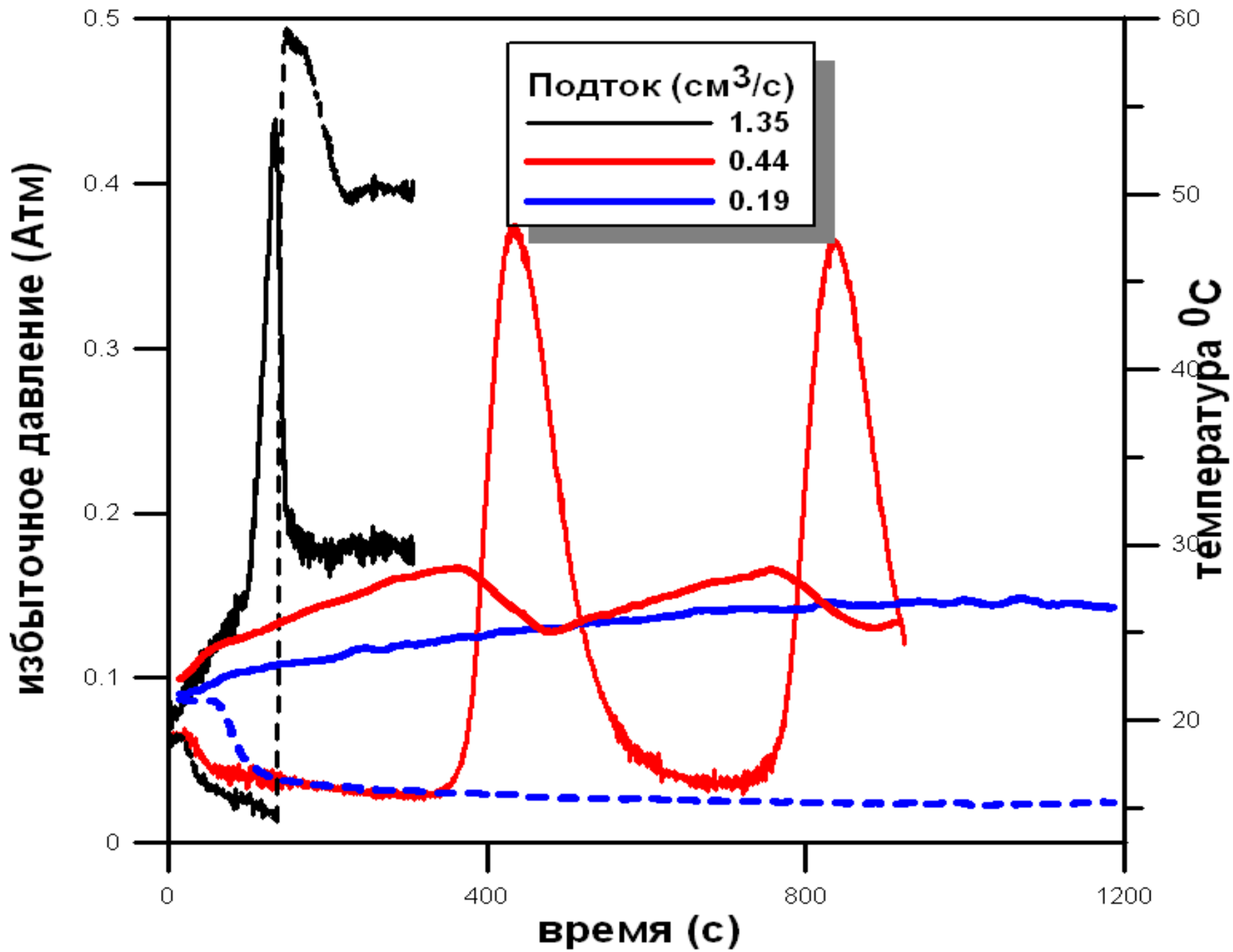


Stefanie Hautmann, Bristol

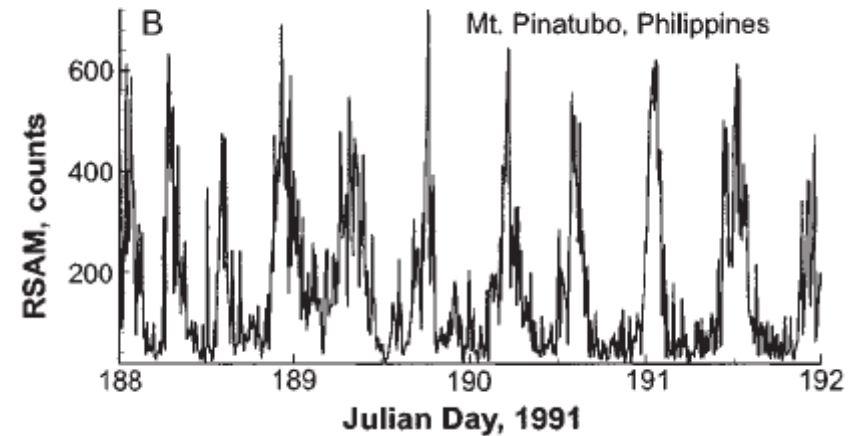
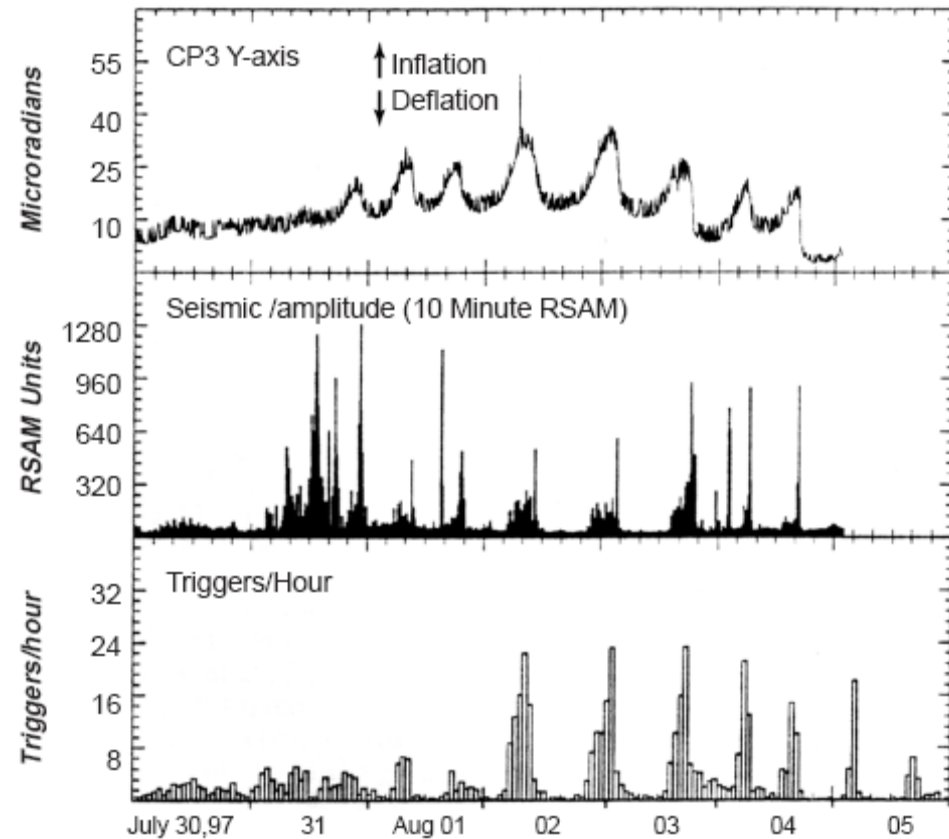


Экспериментальное моделирование циклических режимов





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

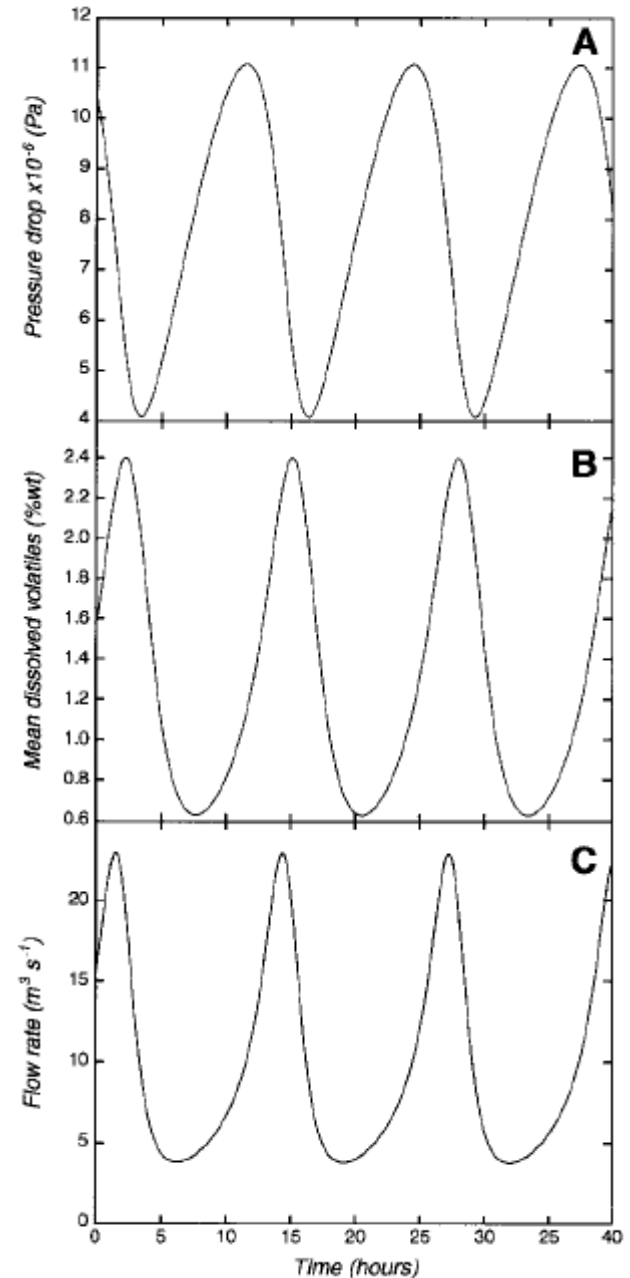
SCIENCE VOL 285

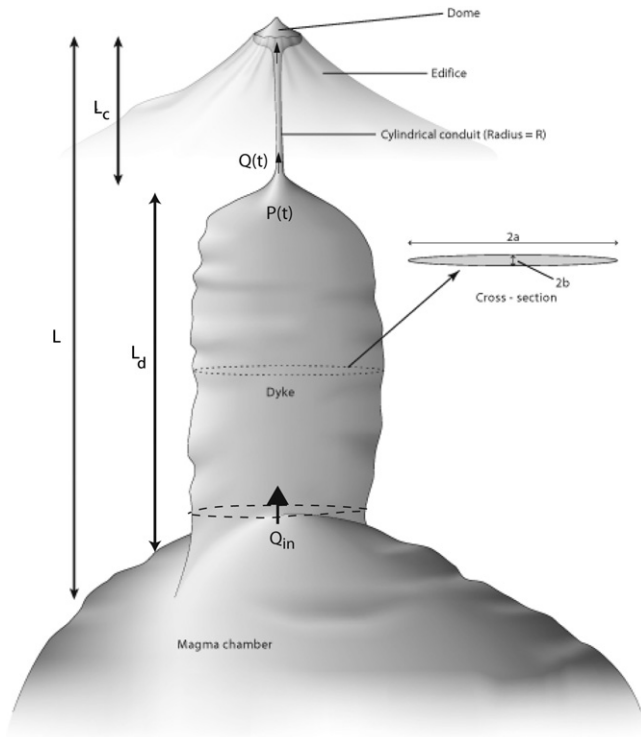


Instability of Magma Flow from Volatile-Dependent Viscosity

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
- Вход в канал
 - Постоянный расход магмы



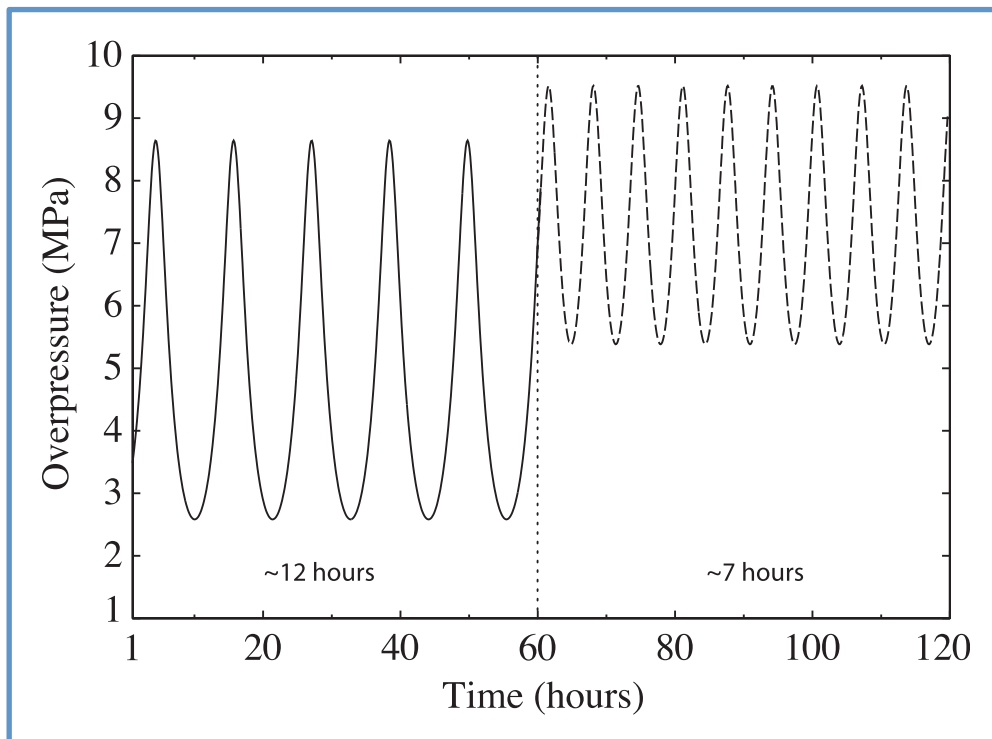
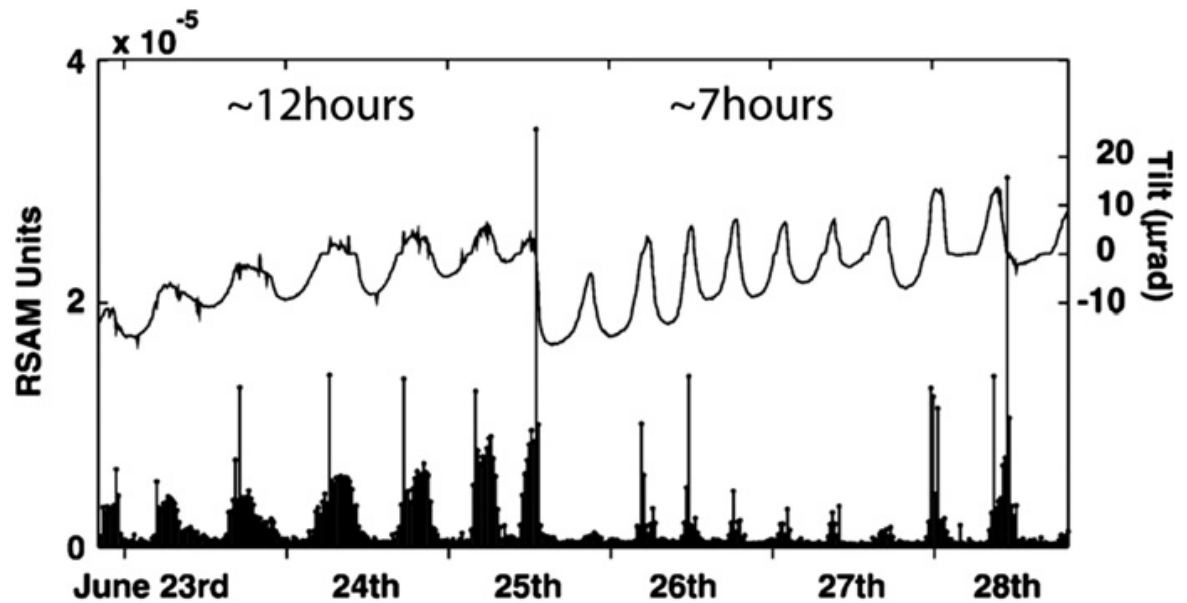


$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma}{\rho V_d} (Q_{in} - Q)$$

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

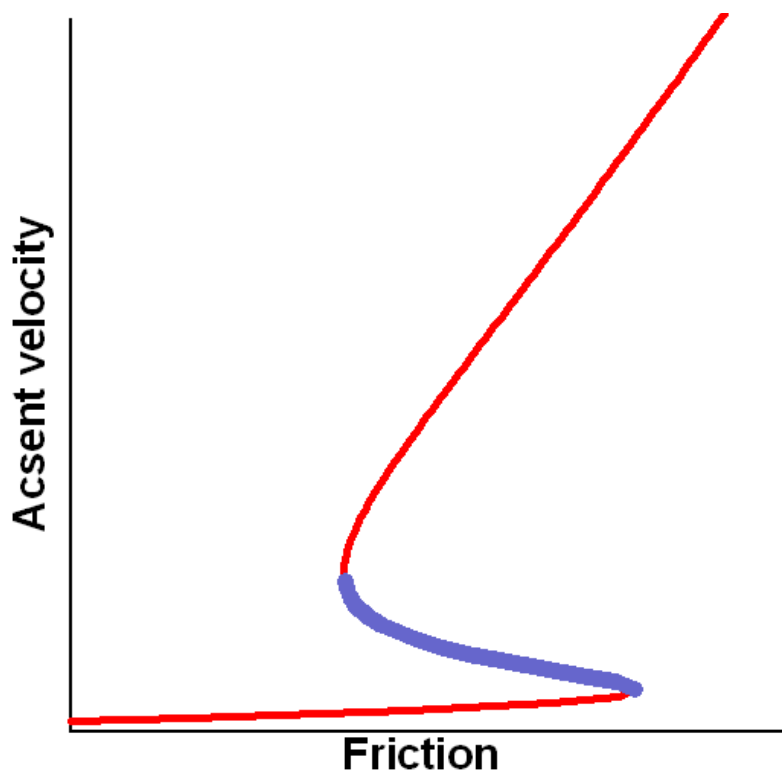
$$v_{slip} = \begin{cases} a_s \sigma^m, & \sigma \geq \sigma_c \\ 0, & \sigma < \sigma_c \end{cases}$$

Изменение
цикличности
после
обрушения
купола



Что вулкану нужно для циклического поведения?

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



- 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

Итак:

- Мы узнали, что вулканические купола не растут с постоянной интенсивностью
- Имеются циклы с различными периодами
- Научились описывать кинетику кристаллизации магмы
- Рассмотрели различные математические модели циклических экструзивных извержений.
- Выявили общие свойства вулканической системы, при которых возможны циклы.