

Лекция 8

“Методы реконструкции физико-химических условий существования магм”

По курсу «динамической вулканологии», механико-математический и геологический факультеты МГУ

<http://wiki.web.ru/wiki/>

Геологический_факультет_МГУ:Вулканология

Павел Юрьевич Плечов, кафедра петрологии МГУ

Главный объект изучения магматической петрологии – магма.

- Магма это смесь расплава, кристаллов и флюида, способная к перемещению.
- Магма существует только под поверхностью Земли.
- На поверхности Земли магма превращается в лаву вследствие дегазации и остывания.

Никто никогда не видел магму...

Лава

Геофизики



Никто никогда не видел магму.

- Мы можем наблюдать лавовые потоки и лавовые озера.
- На поверхности Земли много разнообразных интрузивных и эффузивных горных пород.
- Мы можем проводить эксперименты при заданных условиях в различных магматических системах.
- Растущие кристаллы захватывают и сохраняют расплавы из которых растут, формируя расплавные включения.
- Мы можем проводить численное моделирование и сравнивать результаты моделирования с природными данными.

Основы современных геологических исследований

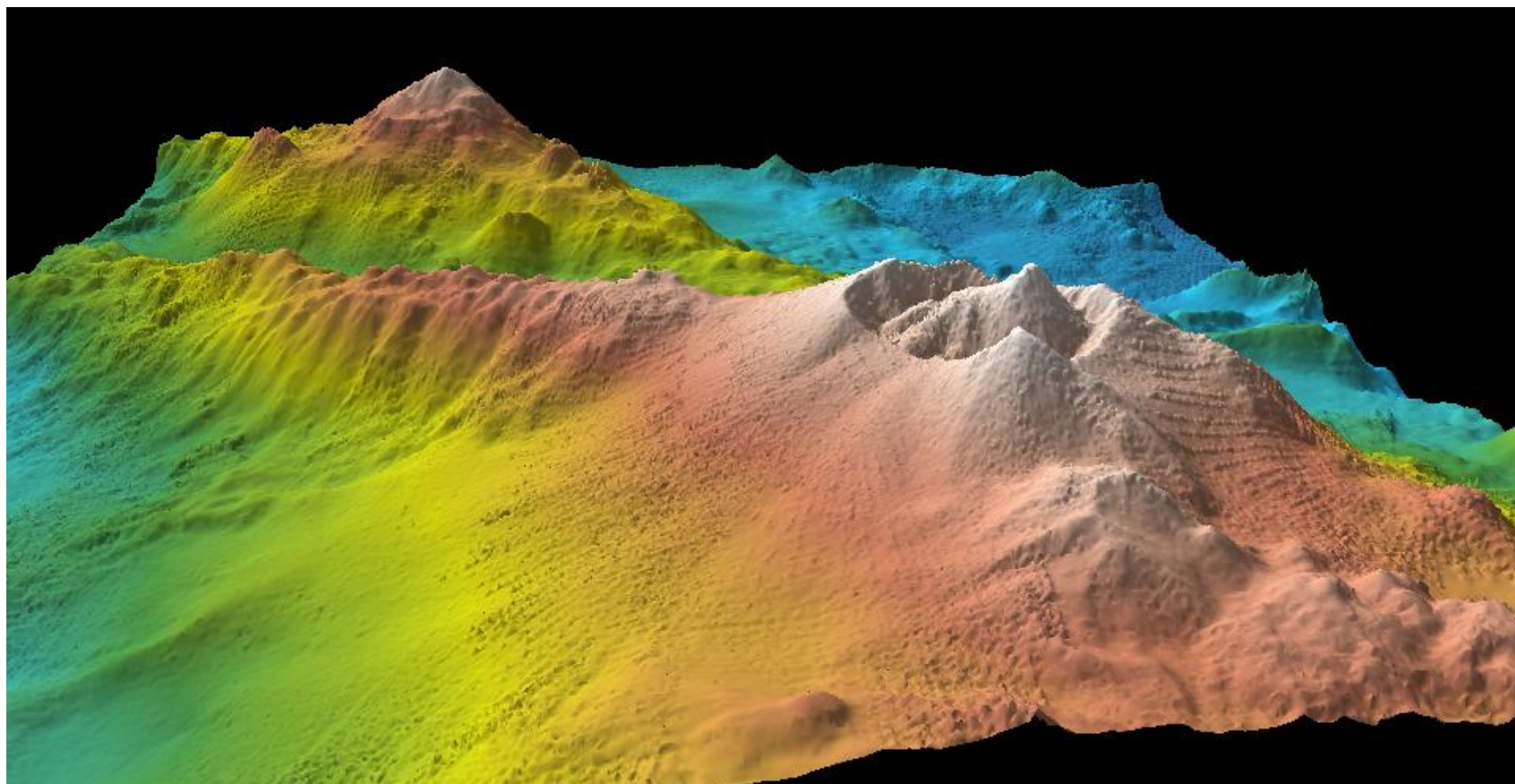
- **Sampling** – получение уникальных образцов, которые несут уникальную новую информацию.
- **Monitoring** – получение новых данных о активных вулканических и интрузивных объектах.
- **Dating** – формирование глобальных информационных систем и баз данных.
- **Analysing** – все более и более детальное изучение ключевых объектов и даже отдельных образцов.
- **Modelling** – соединение накопленных данных и теоретических идей на количественном уровне.

Рабочее место петролога на научном судне



Southern Surveyor, 2006 год

Детальные схемы подводных вулканов

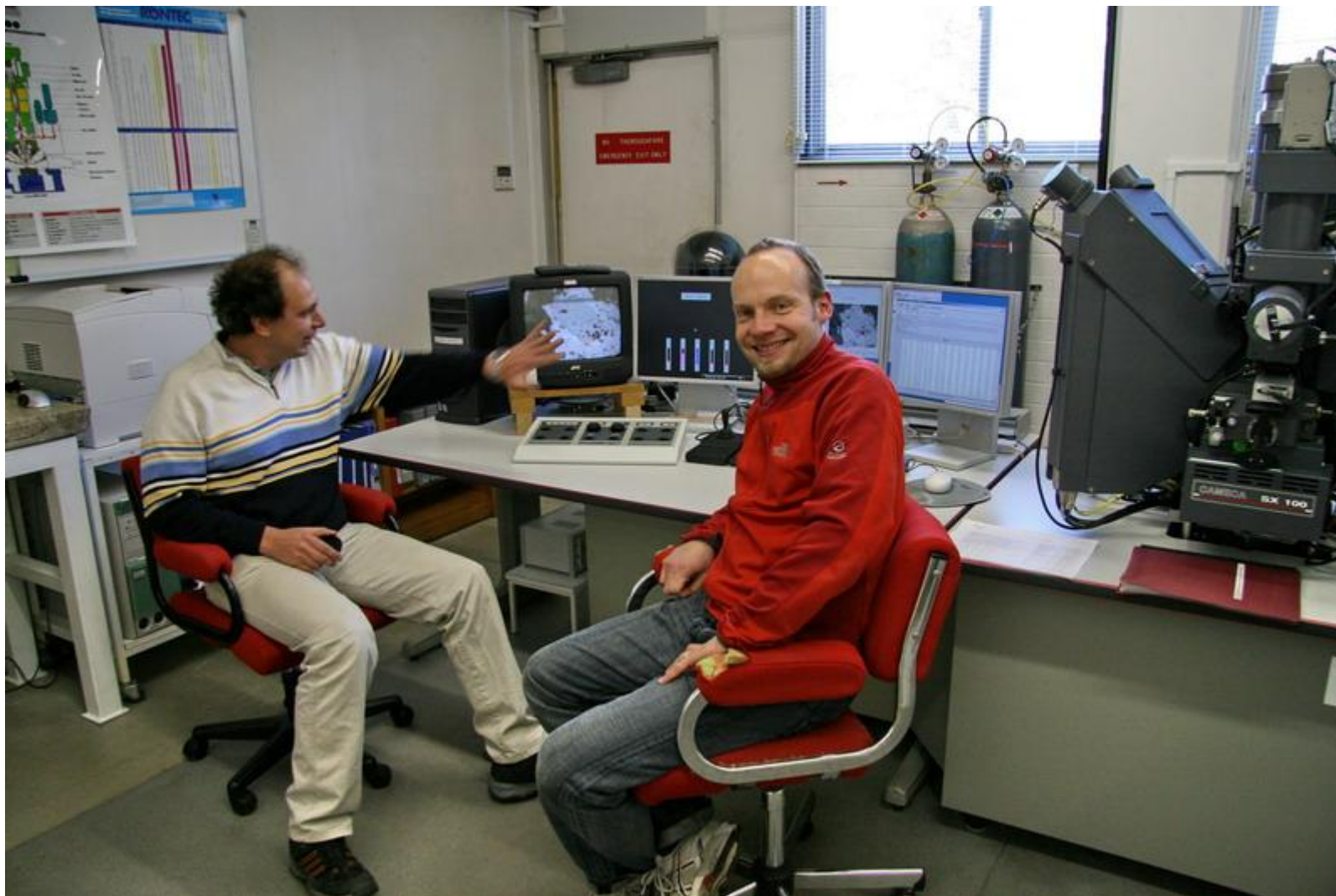


Hunter Ridge, Southern Surveyor, 2006 год





Микрозонд Cameca SX-100 в университете Тасмании



Merchantek 213nm and 266nm lasers and Agilent HP 4500 ICP-MS



Температура магмы

- Прямые замеры температуры в лавовых озерах

Erta Ale (Burgi et al, 2002)

лавовые фонтаны 1187°C

Лава в трещинах 924°C

Корочки на озере 427°C

Килауэа (Flynn et al., 1994)

центр потока в

лавовом тоннеле – 1130°C

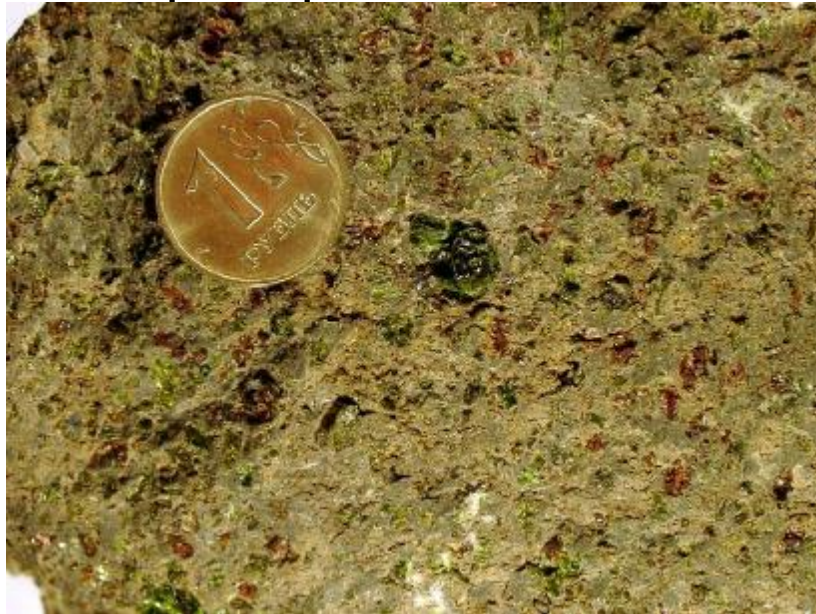
Края потока в

лавовом тоннеле – 1100°C

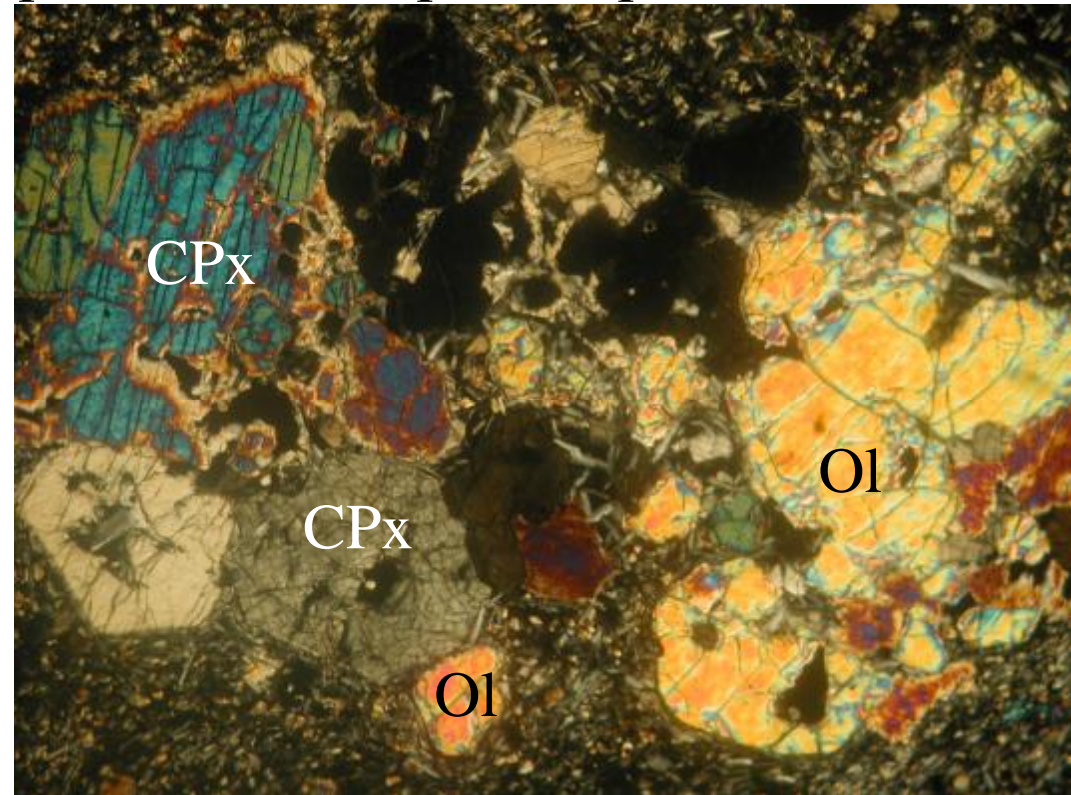


Температура по минеральным равновесиям

Пример: Оливин-Клинопироксеновый термометр



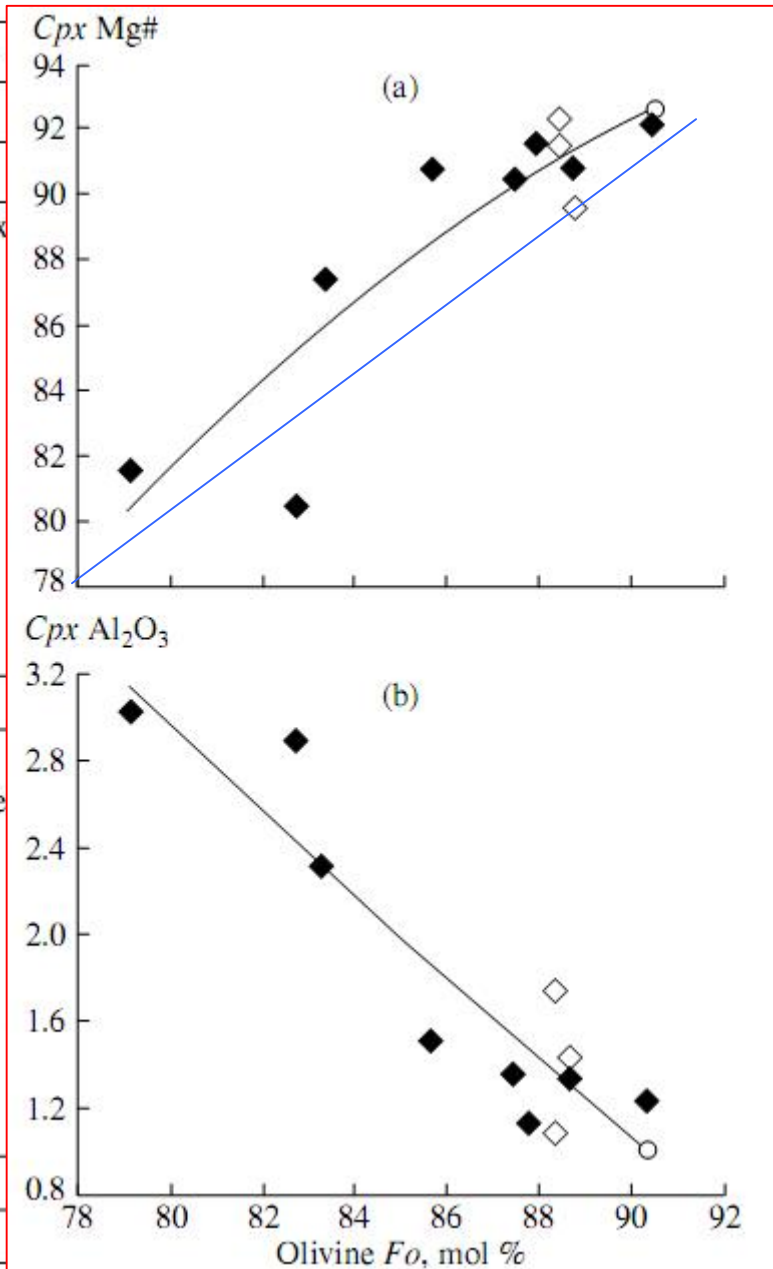
Авачиты, вулкан Авача,
Камчатка.



Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Матвеев С.В. и др. (2005) Петрология «авачитов» - высокомагнезиальных базальтов Авачинского вулкана (Камчатка): I. Общая характеристика, состав пород и минералов. Петрология, т.13, № 2, с. 115-138.

Сосуществующие оливины и клинопироксены в авачитах

Component	3/1*	срх4	3/2	срх2	срх6b	срх6a
	<i>Ol**</i>	<i>Cpx</i>	<i>Ol</i>	<i>Cpx</i>	<i>Cpx</i>	<i>Cpx</i>
	<i>Cpx***</i>	<i>Ol</i>	<i>Cpx</i>	<i>Ol</i>	<i>Ol</i>	<i>Ol</i>
	Clinopyrox					
SiO ₂	54.59	53.23	54.57	53.45	53.43	53.78
TiO ₂	0.10	0.11	0.22	0.11	0.16	0.21
Al ₂ O ₃	1.08	1.23	1.73	1.13	1.35	1.51
FeO	2.69	2.82	2.99	2.97	3.23	3.2
MnO	0.07	0.11	0.05	0.07	0.1	0.11
MgO	18.09	18.28	18.00	18.08	17.85	17.56
CaO	22.38	22.79	22.81	22.65	23.05	22.8
Na ₂ O	0.24	0.19	0.24	0.23	0.19	0.22
Cr ₂ O ₃	0.74	0.71	1.06	0.45	0.53	0.37
Total	99.98	99.47	101.67	99.14	99.89	99.76
Mg#, mol %	92.3	92.0	91.5	91.6	90.8	90.7
	Olivine					
SiO ₂	40.07	40.70	40.07	39.67	39.91	39.74
FeO	11.36	9.37	11.36	11.68	10.88	13.67
MnO	0.12	0.15	0.12	0.25	0.2	0.22
MgO	48.45	49.15	48.45	47.05	47.75	45.86
CaO	0.18	0.22	0.18	0.20	0.17	0.14
NiO	0.14	0.21	0.14	0.17	0.13	0.15
Cr ₂ O ₃		0.04		0.07	0.00	0.00
Total	100.32	99.84	100.32	99.09	99.04	99.78
Fo, mol %	88.4	90.3	88.4	87.8	88.7	85.7



Условие равновесия системы

Минимум свободной энергии Гиббса

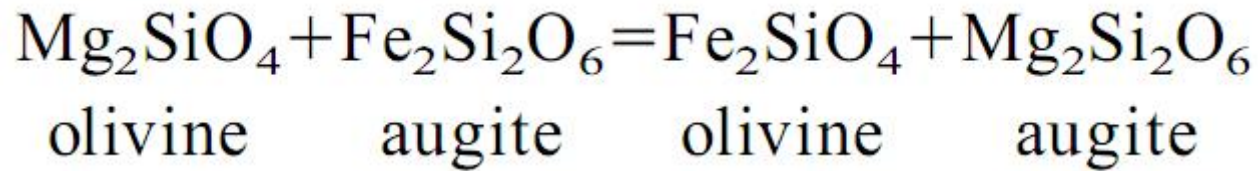
$$G = f(T, p, m_a \dots m_k, \mu_a \dots \mu_k) = \min$$

В дифференциальной форме:

$$dG = -SdT + Vdp + \sum_a^k \mu_a dm_a = 0$$

$$d^2G > 0$$

Обмен Mg и Fe между оливином и клинопироксеном



$$K = \frac{a_{\text{фаялит}} * a_{\text{энстатит}}}{a_{\text{форстерит}} * a_{\text{ферросилит}}} \quad \begin{aligned} a_{\text{форстерит}} &= \gamma_{\text{fo}} * \text{Fo} \\ a_{\text{фаялит}} &= \gamma_{\text{fa}} * (1 - \text{Fo}) \end{aligned}$$

Уравнение смещенного равновесия:

$$RT \ln K = RT \ln K_{\text{D Fe/Mg}}^{\text{Ol/Aug}} + \sum_i RT \ln \gamma_i = -\Delta_r H_T^\circ + T \Delta_r S_T^\circ = -\Delta_r G_T^\circ$$

$$\ln K_{\text{D Fe/Mg}}^{\text{Ol/Aug}} + \frac{\Delta_r C_{\text{p}(T_0)}^\circ}{RT} (T - T_0) - \frac{\Delta_r C_{\text{p}(T_0)}^\circ}{R} \ln = -\frac{\Delta_r H_{T_0}^\circ}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \frac{\Delta_r S_{T_0}^\circ}{R}$$

Калибровка по экспериментам, Loucks, 1996

$$\ln K_{D_{Fe/Mg}^{Ol/Aug}} + \frac{\Delta_r C_{p(T_0)}^o}{RT} (T - T_0) - \frac{\Delta_r C_{p(T_0)}^o}{R} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \\ = 0.8240 (10^4 / T \text{ K}) - 5.5105$$

Принимаем $T_0 = 1400 \text{ K}$,

$$\Delta_r C_{p(1400 \text{ K})}^o = -0.084 \text{ KJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

Получаем уравнение оливин-клинопироксенового геотермометра

$$\ln K_{D_{Fe/Mg}^{Ol/Aug}} - 78.025 = \frac{-5945.96}{T} - 10.1327 \ln T$$

Популярные геотермометры для магматических систем

- Двупироксеновый термометр (Wells, 1977; Lindsley, 1983)
- Оливин-клинопироксен (Loucks, 1996)
- Оливин-шпинель (Ballhaus, 1991)
- Плагиоклаз-Роговая обманка (Holland, Blundy, 1994)
- Ильменит-Магнетит (Lindsley)

Содержание H_2O в магме

КОСВЕННЫЕ ДАННЫЕ

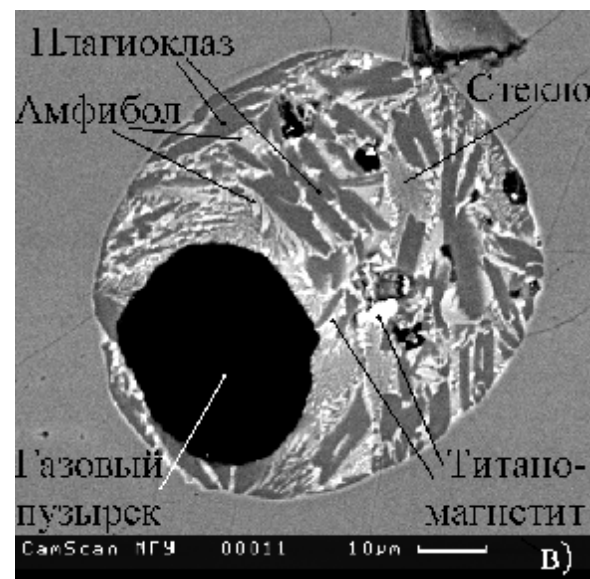
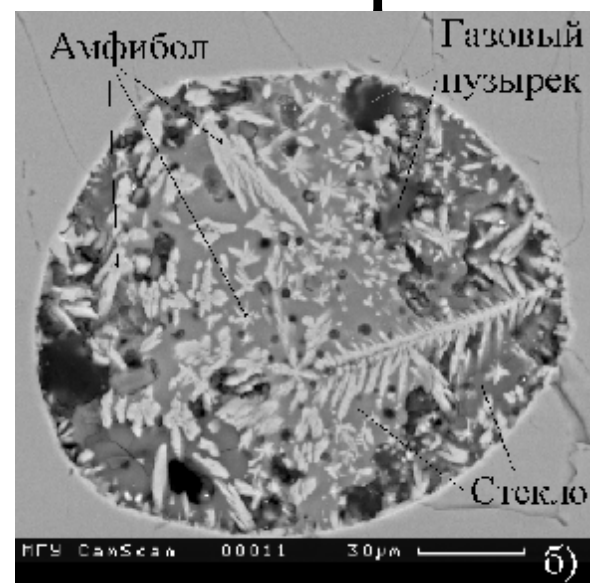
- Присутствие магматических водосодержащих минералов (биотита, амфибола) свидетельствует о присутствии воды в магматическом очаге (не менее 3% вес.)
- Пузыристые текстуры лав свидетельствуют об активной дегазации во время извержения, т.е. о присутствии воды в магме.

Содержание воды, прямые измерения

- Прямые измерения содержания воды в стеклах дают заниженные значения, так как стекла потеряли большую часть воды при извержении. Обычно, стекла надводных извержений содержат не более 0.3 % вес. воды. Содержание воды в стеклах подводных извержений коррелирует с глубиной извержения. Но вода может быть не магматической.

Содержание воды, прямые измерения

- Расплавные включения частично сохраняют воду, которая была в магме до извержения.
- Вода измеряется FTIR-спектрометрией или SIMS
- Принимаются максимальные из измеренных значений воды во включениях

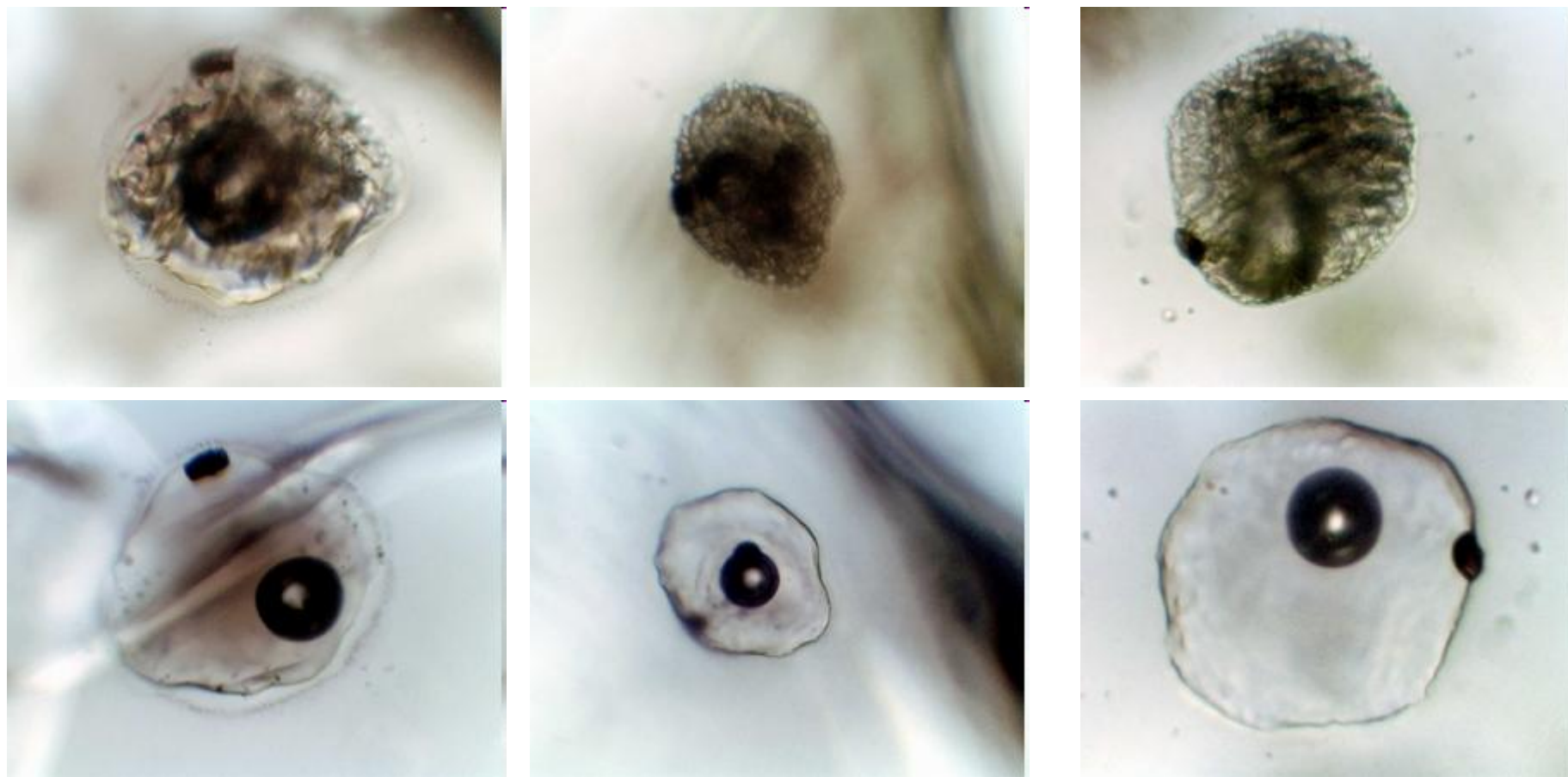


Plechov et al., 2008 - Measured water content is 3.2 -3.5 wt.%

Расплавные включения в минералах



Частично или полностью
раскристаллизованные включения требуют
эксперимента для гомогенизации



Получаем состав расплава в равновесии с минералом, температуру гомогенизации, расчетную температуру равновесия и сод. H_2O

Давление при кристаллизации

- Пока не известно прямых методов измерения давлений в магматических очагах.

Популярные расчетные методы основаны на:

- Плотности включений CO_2
- Зависимости растворимости воды в магме от давления
- Равновесиях, сильно зависящих от давления
- Зависимости объема кристаллической ячейки от давления

Клинопироксеновый барометр

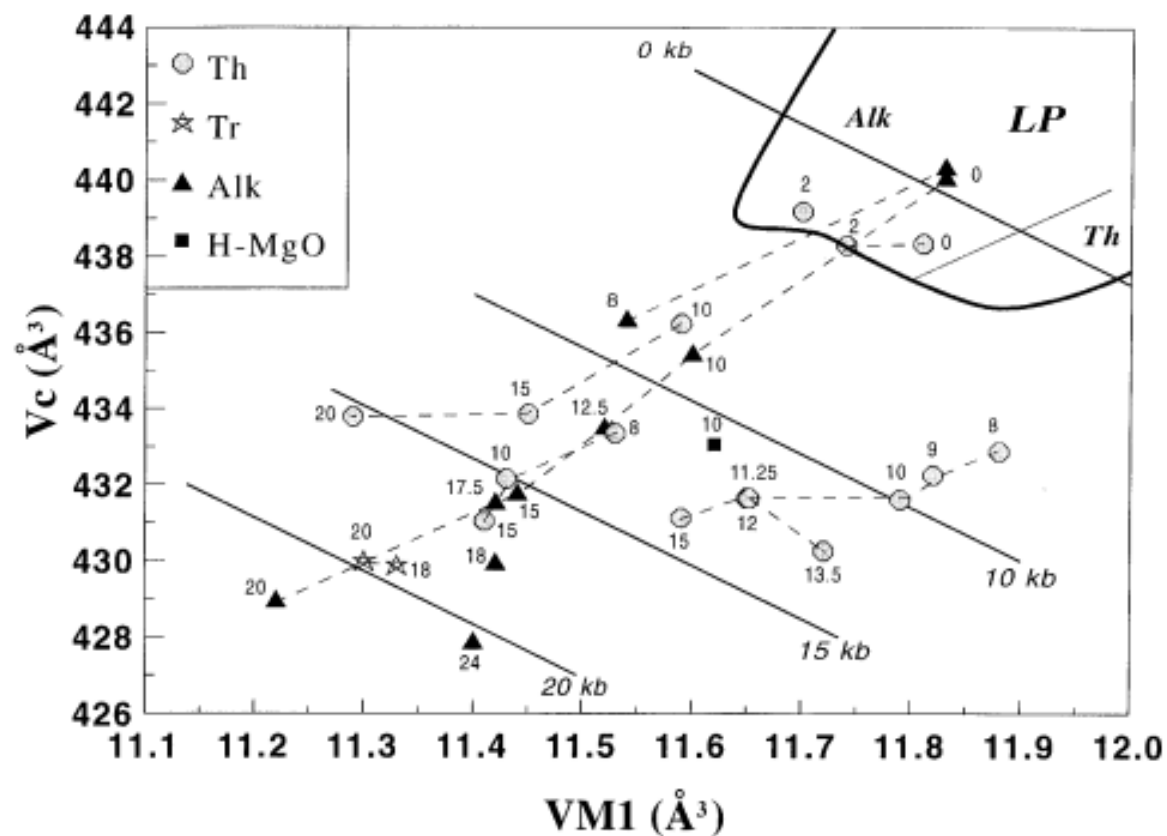
$$P = a_0 + a_1(Vc) + a_2(VM1)$$

$$a_0 = 698.443, a_1 = -1.15378 \quad a_2 = -16.1598$$

Vc – объем ячейки клинопироксена, $VM1$ – объем полиэдра $M1$



Paolo Nimis



[Nimis, 1995; Nimis, Ulmer, 1998; Nimis, 1999]



Обобщенная формула клинопироксенов

Вхождение элементов в ту или иную позицию контролируется соотношением объема позиции и радиуса иона. При повышении давления ячейка клинопироксена сжимается, но уменьшаются и радиусы ионов, причем с различной скоростью.

$$P(\text{kbar}) = 698.443 + 4.985 \cdot \text{Al}_T - 26.826 \cdot \text{Fe}_{M1}^{2+} - 3.764 \cdot \text{Fe}^{3+} + 53.989 \cdot \text{Al}_{M1} + 3.948 \cdot \text{Ti} + 14.651 \cdot \text{Cr} - 700.431 \cdot \text{Ca} - 666.629 \cdot \text{Na} - 682.848 \cdot \text{Mg}_{M2} - 691.138 \cdot \text{Fe}_{M2}^{2+} - 688.384 \cdot \text{Mn} - 6.267 \cdot (\text{Mg}_{M2})^2 - 4.144 \cdot (\text{Fe}_{M2}^{2+})^2,$$

$$(\text{Fe}_{M1} \cdot \text{Mg}_{M2}) / (\text{Fe}_{M2} \cdot \text{Mg}_{M1})$$

$$= e^{**} (0.238 \cdot R^{3+} + 0.289 \cdot \text{CNM} - 2.315)$$

$$\text{CNM} = \text{Ca} + \text{Na} + \text{Mn}$$

$$R^{3+} = \text{Al}_{M1} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti} + \text{Cr}$$

Стандартные кислородные буферы

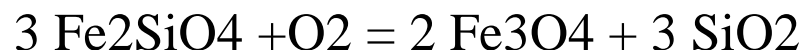
MH magnetite-hematite



NiNiO nickel-nickel oxide



FMQ fayalite-magnetite-quartz



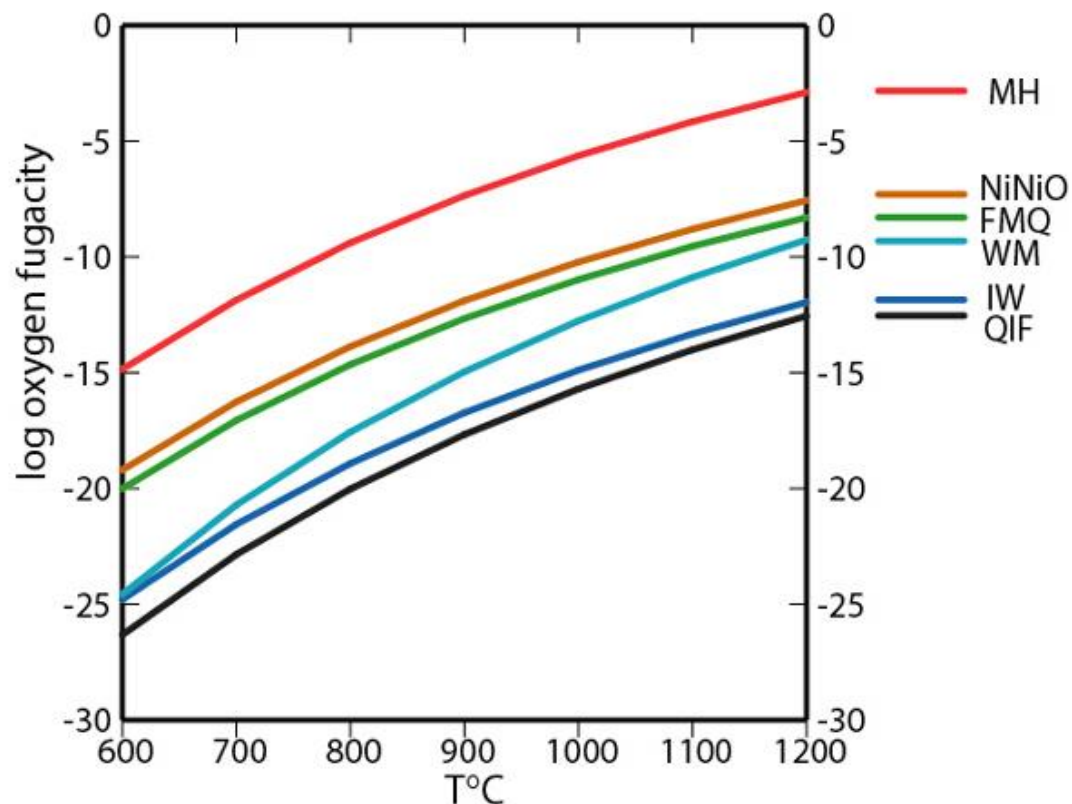
WM wustite-magnetite



IW iron-wustite



QIF quartz-iron-fayalite



Фугитивность кислорода

($f\text{O}_2$) – количественная

характеристика

окислительно-

восстановительной

обстановки, от которой

например зависит

соотношение $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ в

расплавах и

кристаллизующихся из них

минералах.

ФУГИТИВНОСТЬ КИСЛОРОДА

Популярные способы определения фугитивности:

Для базальтовых систем:

Равновесие Оливин-Шпинель в присутствии ортопироксена (Ballhaus, 1991) определяет отклонение от кислородного буфера FMQ

Для безоливиновых систем:

Равновесие Магнетит-Ильменит (Anderson & Lindsley, 1985)

Соотношение S^{2-} и S^{6+} :

Определение положения относительно буфера Ni-NiO
(Wallace and Carmichael, 1994)

Petrolog III – полезные возможности

Расчет состава магматического расплава по составам расплавных включений

Расчет температур кристаллизации с учетом различных моделей влияния давления, содержаний воды, фугитивности кислорода на псевдоликвидусные температуры

Оценка давления и содержаний воды при совместной кристаллизации из расплава оливина, клинопироксена и плагиоклаза

Моделирование поведения рассеянных элементов на основе сложных моделей распределения.

Моделирование полибарической кристаллизации магмы при подъеме через систему промежуточных очагов.

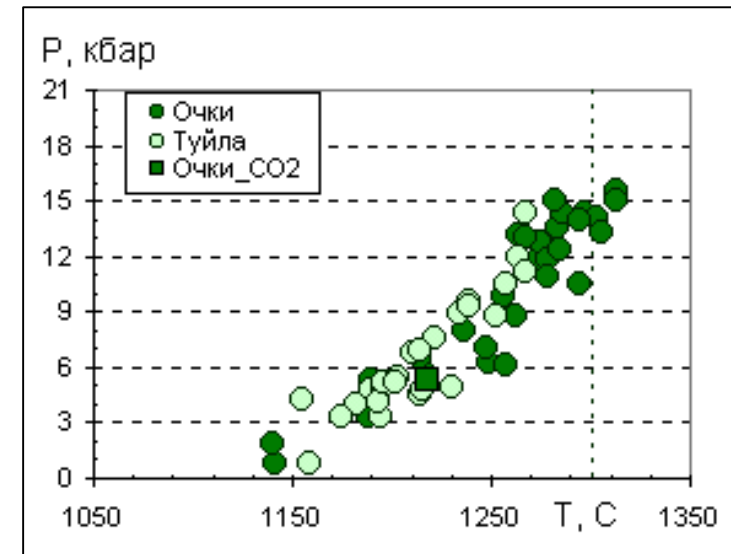
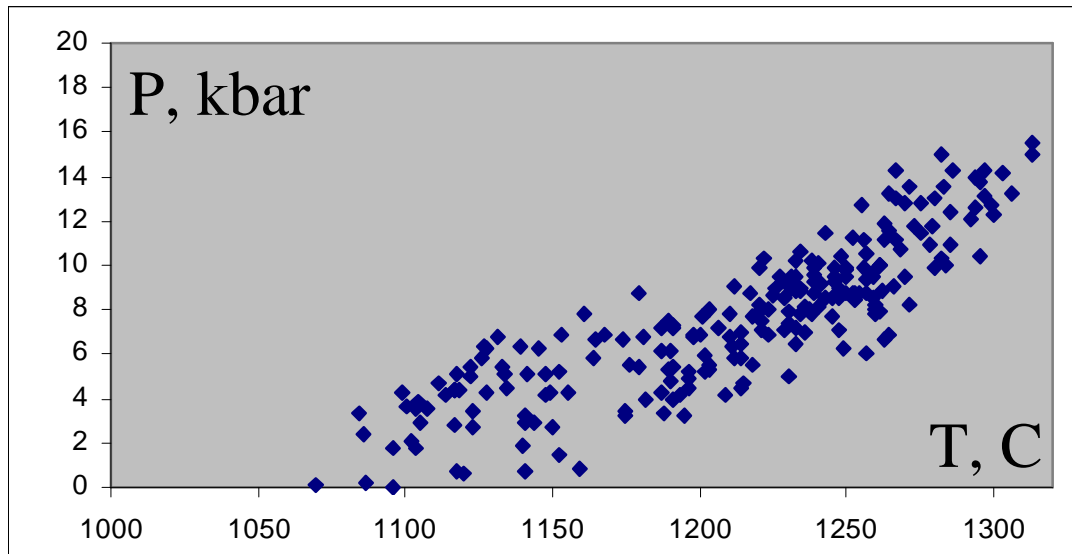
Моделирование кристаллизации в водонасыщенных условиях с отделяющимся от расплава флюидом за счет дегазации.

Плечов, Данюшевский, 2006 ; Danyushevsky&Plechov, in press



Klyuchevskoy volcano, 2002

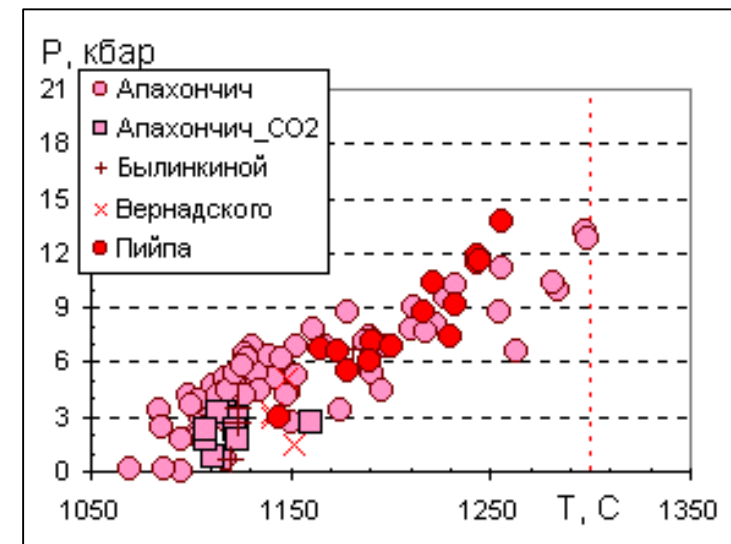
Расчет температур и давлений для каждого расплавного включения. Вулкан Ключевской.



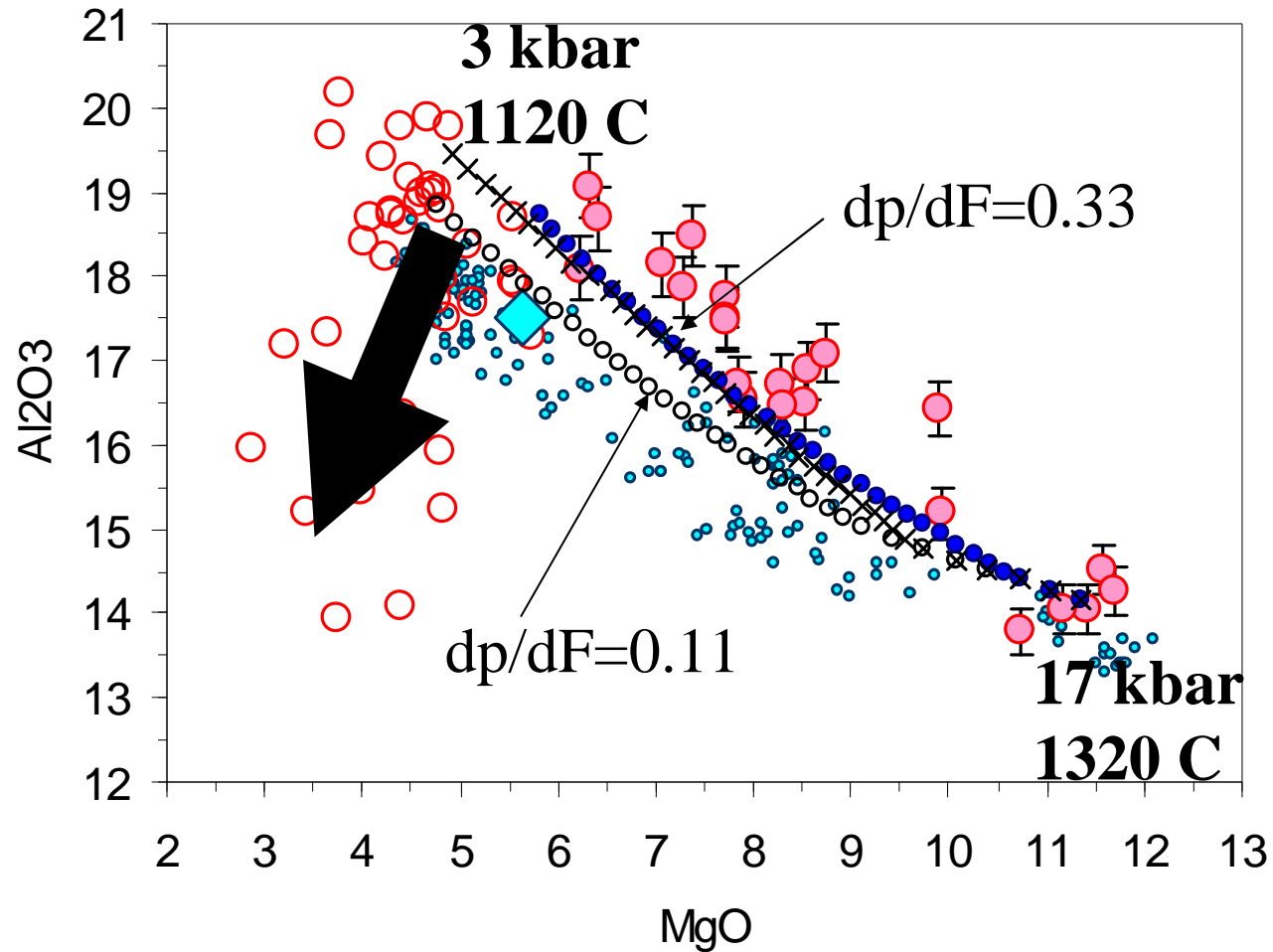
Мы знаем, что в базальтах Ключевского вулкана ОI и СРх кристаллизовались вместе [Plešchov et al., 2000]. Petrolog-III при этом условии позволяет оценить давление и температуру для каждого расплавного включения.

1) Полибарическая кристаллизация

2) Постепенный подъем магмы без остановок в промежуточном очаге



Соотношение составов пород и расплавных включений с результатами моделирования



Подведем итоги:

- Петрологические методы позволяют оценить физико-химические параметры кристаллизации магмы.
- Чем сложнее набор минералов и фаз, существовавших в равновесии, тем точнее мы можем определить параметры кристаллизации
- Термодинамическое моделирование является независимым методом проверки правильности подбора физико-химических параметров.

Остались за пределами лекции:

- Многочисленные сложности в проведении точного и достоверного анализа минералов и стекол.
- Сложности интерпретации экспериментов при создании термодинамических моделей.
- Влияние позднемагматических и постмагматических процессов на составы сосуществующих фаз.
- Кинетика кристаллизации и прохождения реакций. Учет степени неравновесности при оценке физико-химических параметров.