

*Общая тема:*

# **АКТИВНЫЕ ОКРАИНЫ КОНТИНЕНТОВ**

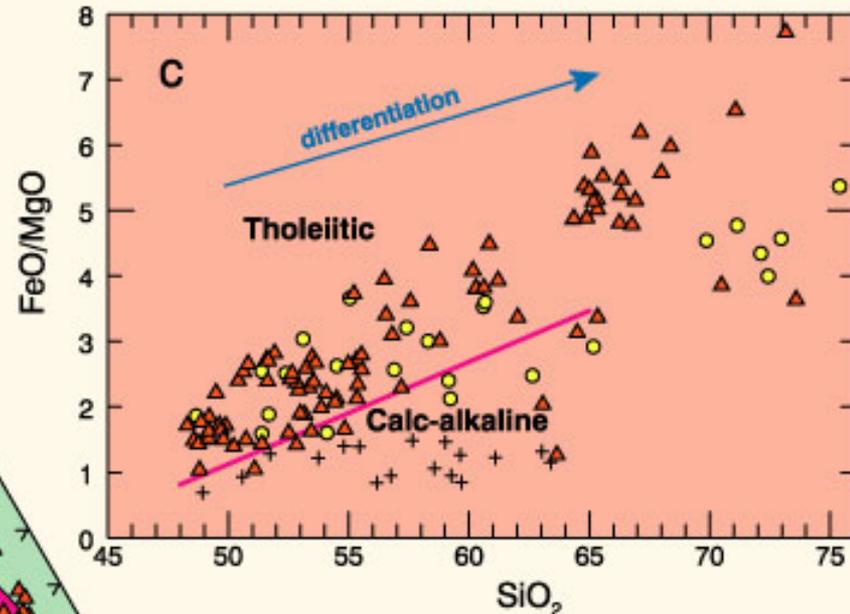
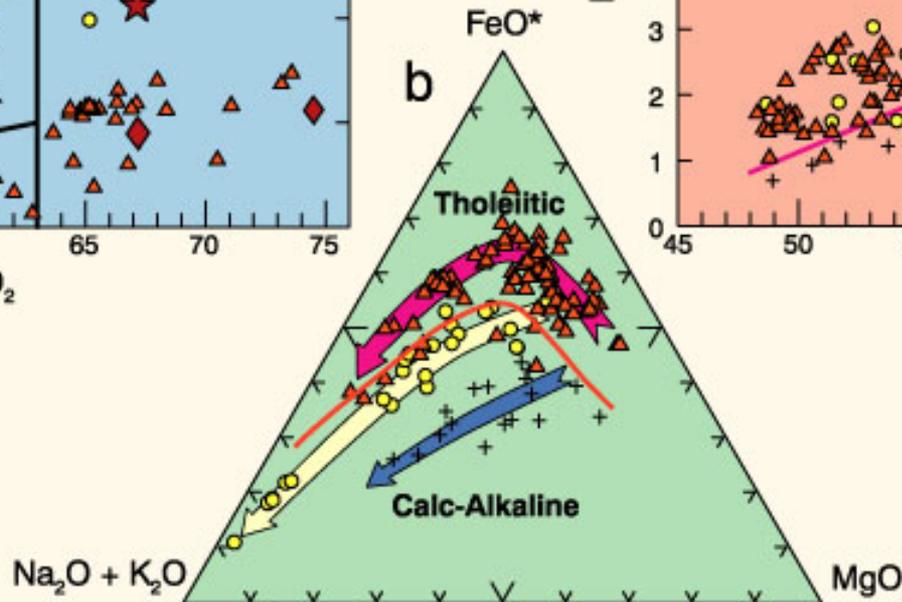
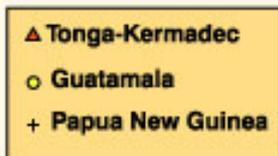
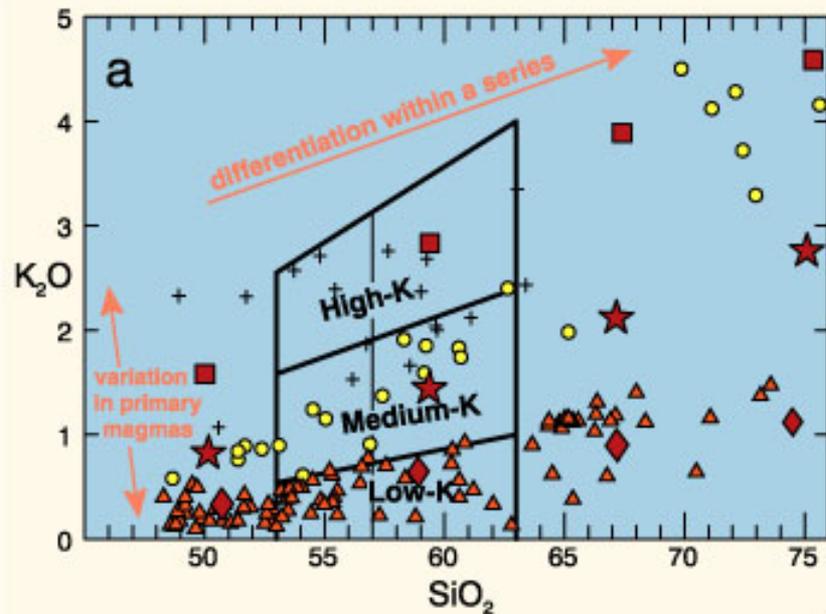
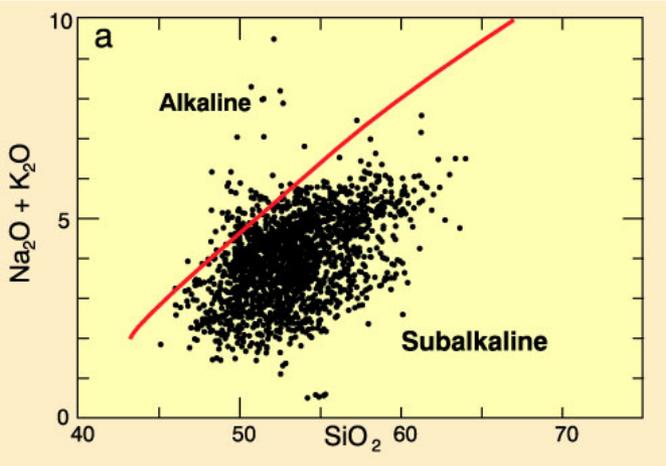
*Лекция № 25*

## **Природа магматизма и происхождение андезит-базальтовых серий островных дуг**

- 1. Петрогеохимическая специфика островодужных серий**
- 2. Механизмы магмообразования**
- 3. Образование высокоглиноземистых базальтов (на примере лав Ключевского вулкана)**
- 4. Формирование андезит-базальтовых серий (на примере влк. Ключевской и Безымянный)**

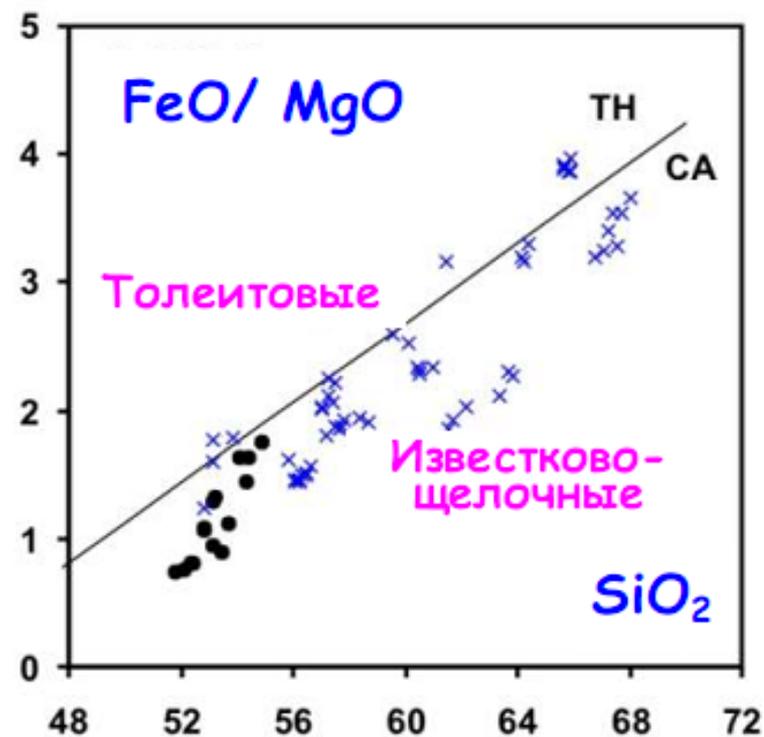
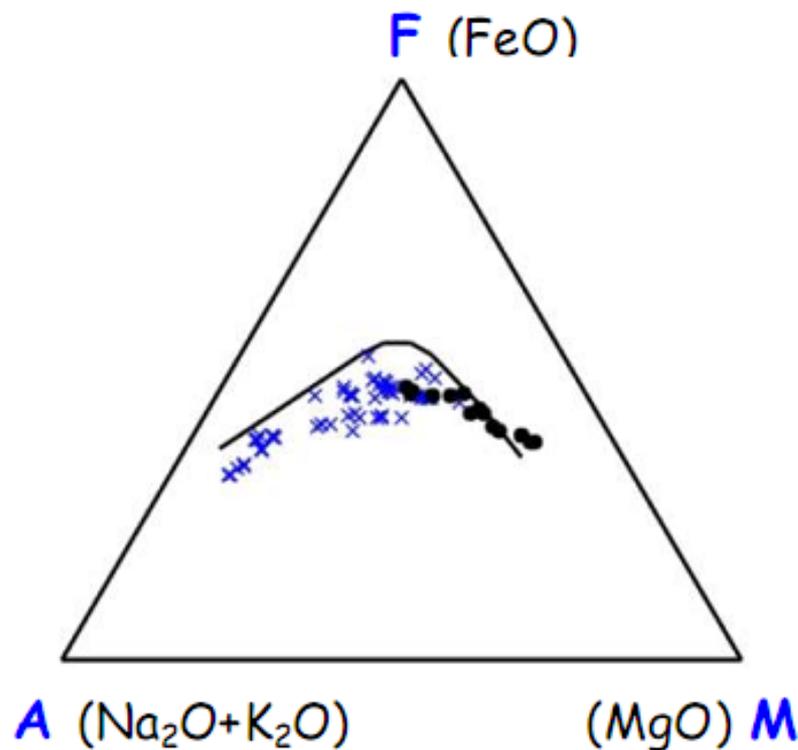
# Петрохимическая типизация магматических серий островных дуг

Примеры островодужных серий



# Известково-щелочная серия вулканов Ключевской и Безымянный

СОСТАВЫ ПОРОД ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНЫХ СЕРИЙ  
НА ДИСКРИМИНАЦИОННЫХ ДИАГРАММАХ  
(на примере лав вулканов Ключевской и Безымянный)



# **Происхождение андезит-базальтовых серий островных дуг**

- 1. Высокоглиноземистых базальты и гиперстеновые серии**
- 2. Значение высокомагнезиальных базальтов**
- 3. Гипотеза плавления “мантийного клина”**
- 4. Летучие как главный фактор магмообразования**
- 5. Роль воды в образовании высоко-Al магм**
- 6. Формирование андезит-базальтовых серий (на примере лав влк. Безымянный)**

# Высокоглиноземистый базальт и гиперстеновые серии

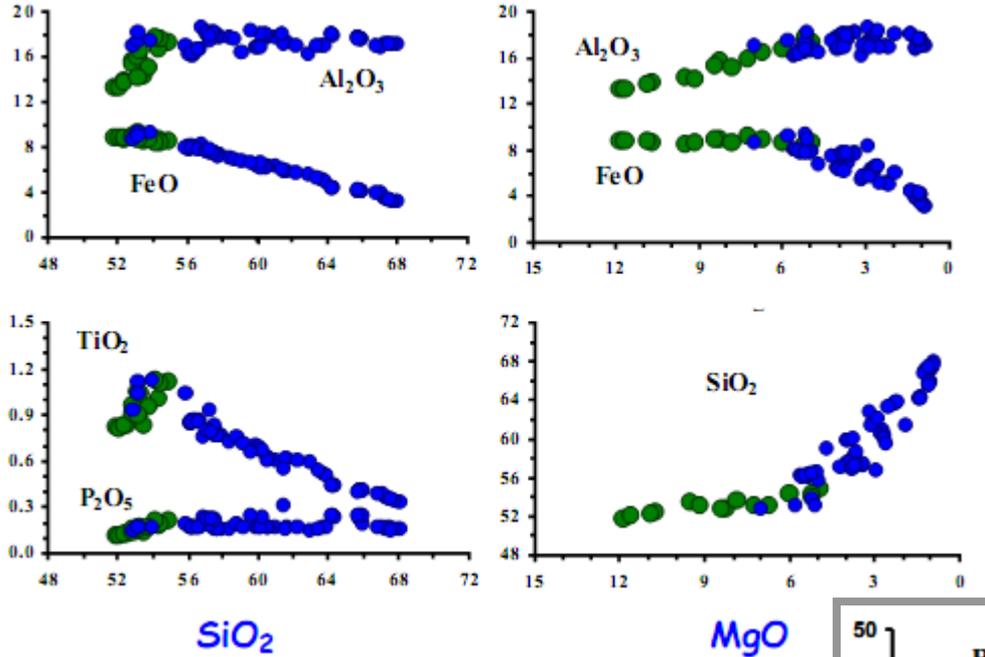
Породы этого типа характеризуются высоким содержанием глинозема ( $> 18$  мас.%  $Al_2O_3$ ) и присутствием ОРХ в основной массе.

Куно (Kuno, 1960) объединил высокоглиноземистые базальты и продукты их фракционирования в *гиперстеновую серию*, которая позднее была признана аналогом известково-щелочной серии.

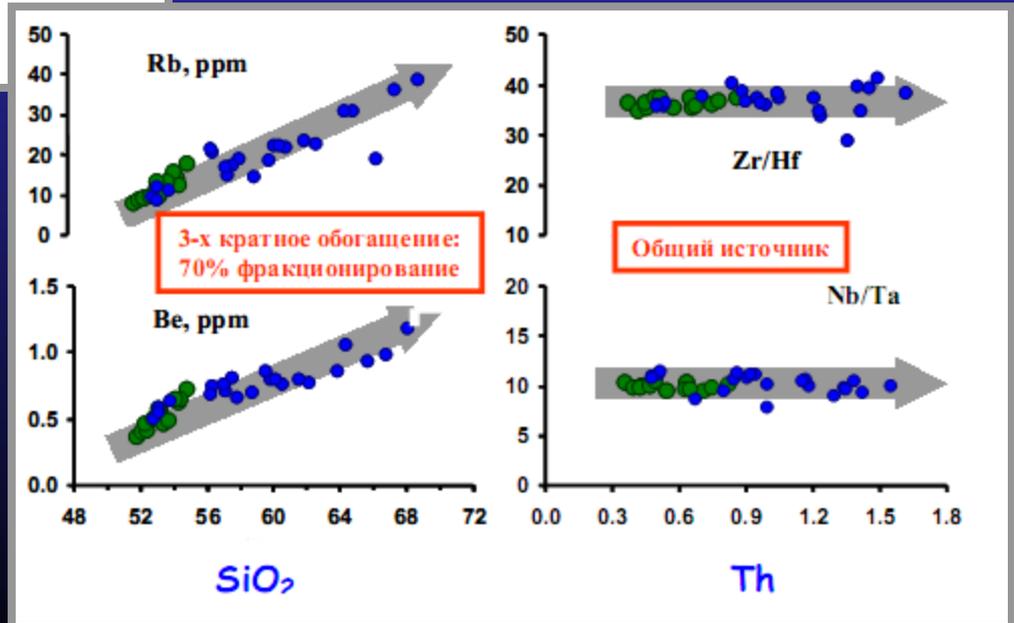
*Ассоциациям этого типа противопоставлялись породы пижонитовой серии, в основной массе которых присутствует Риг – “островодужные толеиты”.*

**Куно утверждал, что породы гиперстеновых серий являются продуктами кристаллизации высокоглиноземистой магмы, которую можно рассматривать как исходную для любых известково-щелочных ассоциаций пород.**

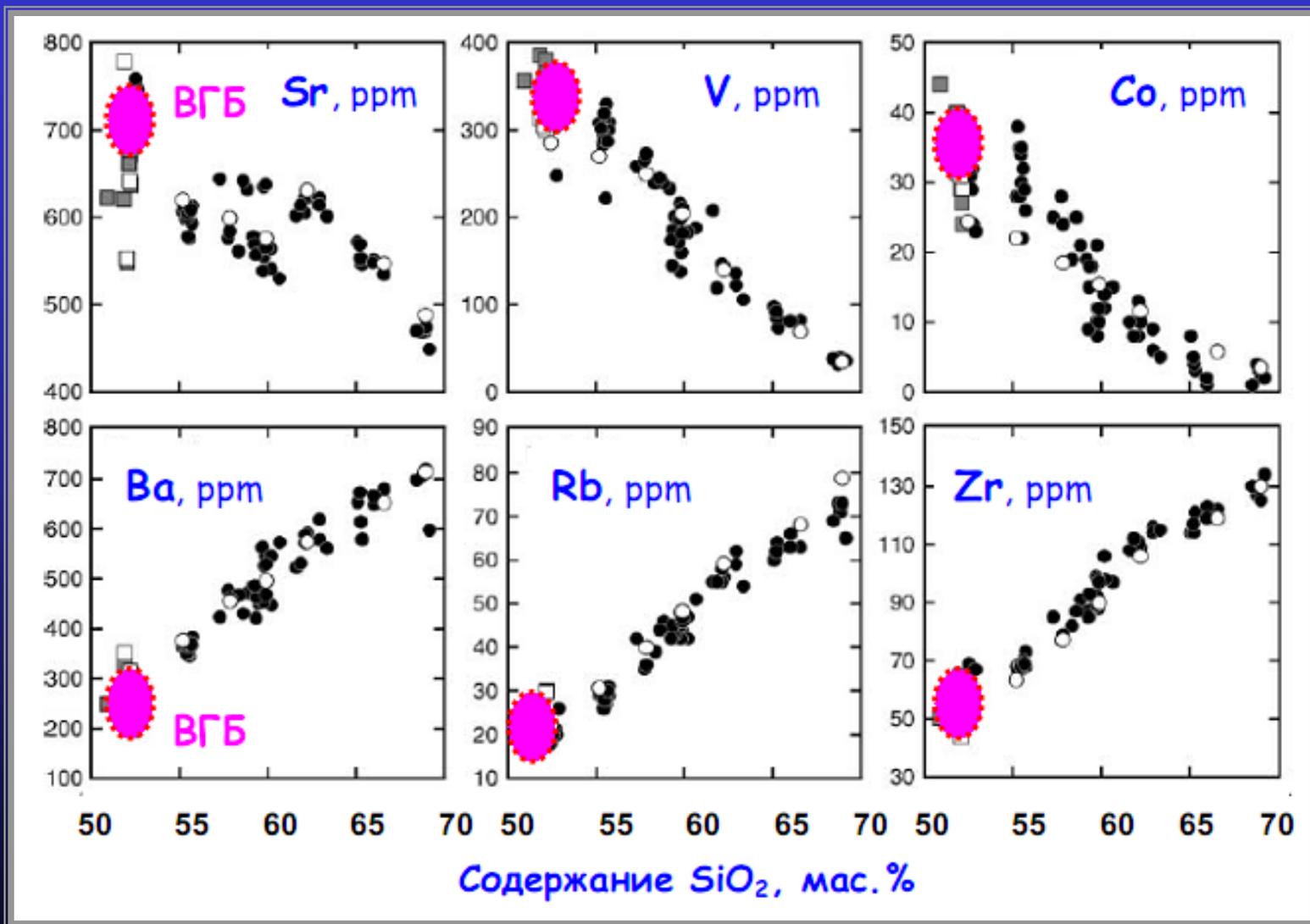
# Пример "полной" известково-щелочной серии



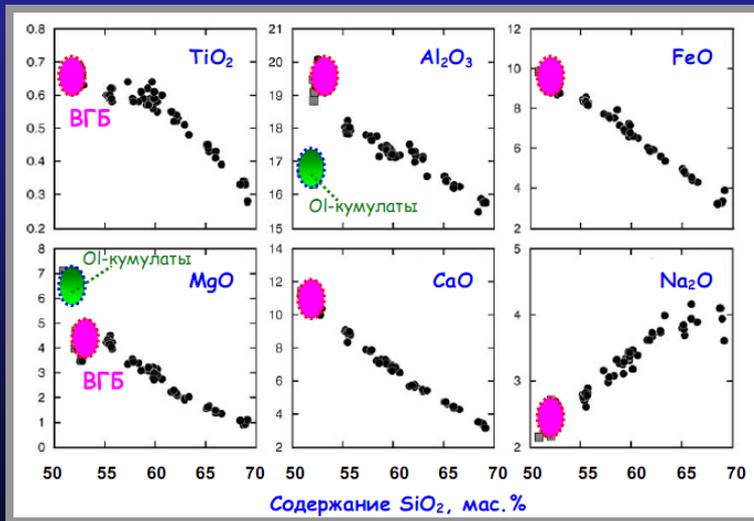
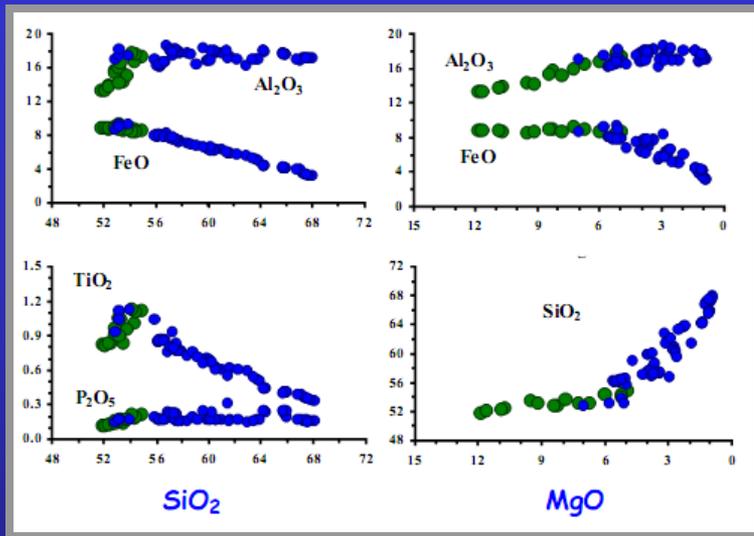
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ И ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНОЙ СЕРИИ ВУЛКАНОВ  
КЛЮЧЕВСКОЙ (●) И БЕЗЫМЯННЫЙ (●)



# Типичная известково-щелочная серия (вулкан Салина, Эоловая дуга, Сицилия)



# Значение высокомагнезиальных базальтов

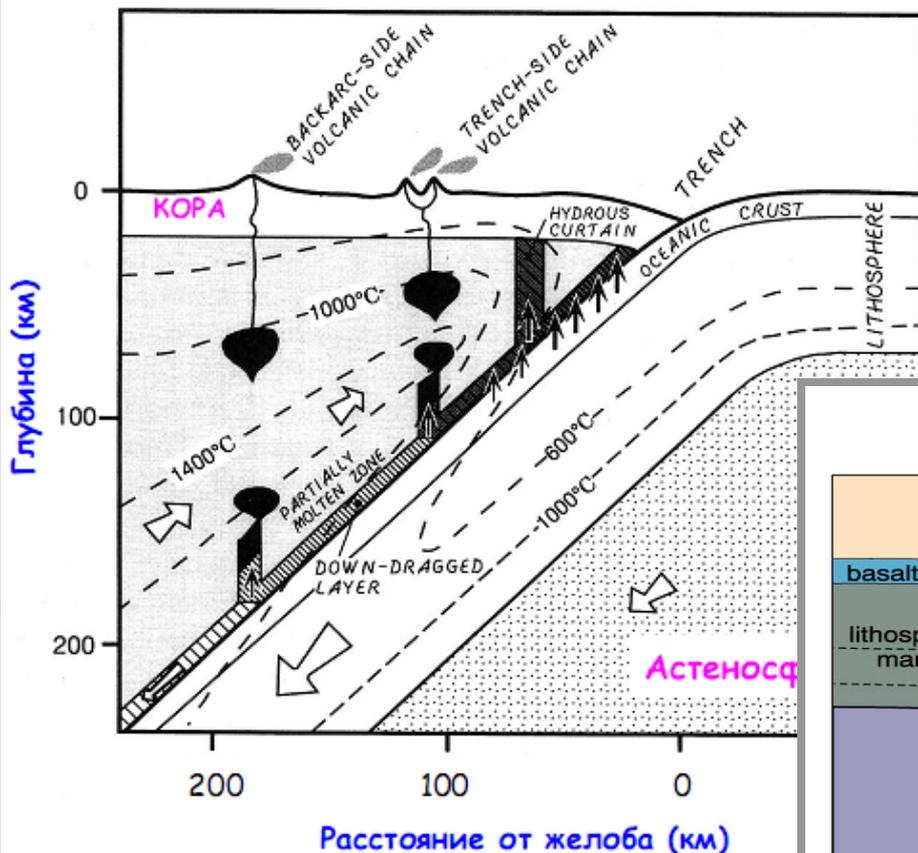


## ПРИМЕРЫ АССОЦИАЦИЙ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ И ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ БАЗАЛЬТОВ

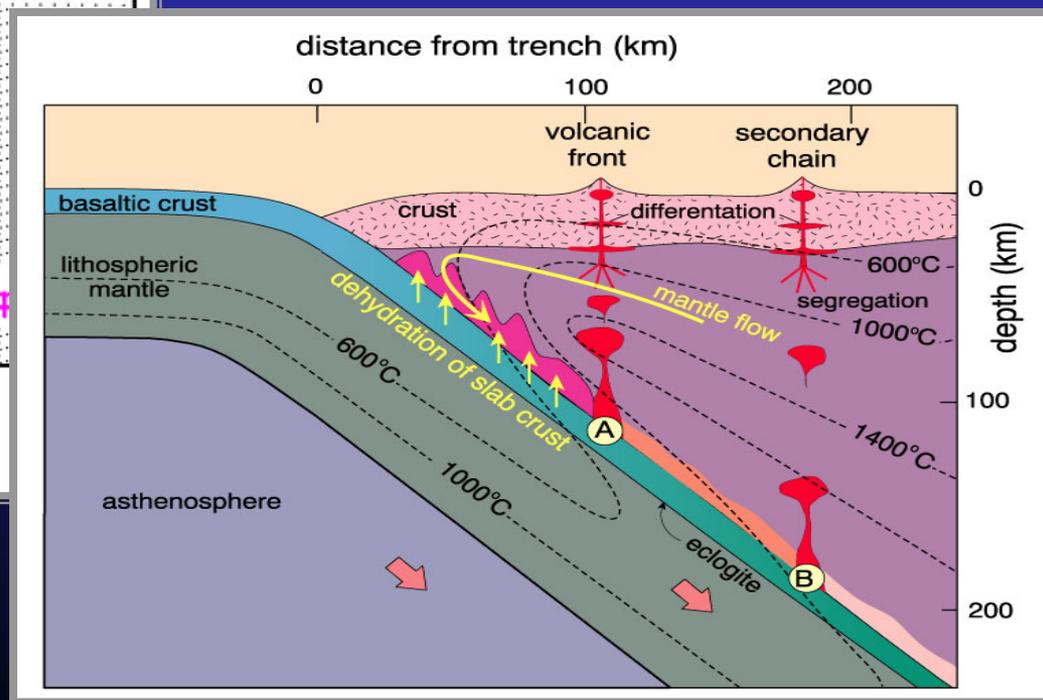
ОКСИДЫ	Алеутская дуга		Марианская дуга		Влк. Ключевской	
	Высоко- Mg	Высоко- Al	Высоко- Mg	Высоко- Al	Высоко- Mg	Высоко- Al
SiO <sub>2</sub>	48.50	50.13	48.83	50.15	51.76	53.50
TiO <sub>2</sub>	0.75	0.97	0.69	0.81	0.86	1.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.83	19.34	15.21	19.34	13.86	18.26
FeO	9.54	9.03	9.75	9.34	8.83	8.67
MnO	0.17	0.17	0.24	0.16	0.17	0.16
MgO	11.67	5.00	10.11	4.51	11.55	5.24
CaO	11.18	10.51	12.17	11.11	9.73	8.22
Na <sub>2</sub> O	2.04	2.88	1.68	2.47	2.47	3.45
K <sub>2</sub> O	0.65	0.71	0.58	0.72	0.63	1.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.18	0.10	0.15	0.15	0.20

# Гипотеза плавления "мантийного клина"

СХЕМА УСЛОВИЙ МАГМОГЕНЕРАЦИИ  
В СУБДУКЦИОННЫХ ЗОНАХ



Плавление мантийного вещества на глубинах около 100 км вблизи верхнего контакта погружающейся плиты могло привести к формированию высоко-Mg магм, которые явились исходными для менее примитивных высоко-Al расплавов.



**A** – разложение амфибола,  
**B** – разложение флогопита  
(Tatsumi, 1989)

# Земные геотермы и условия начального плавления мантийных перидотитов

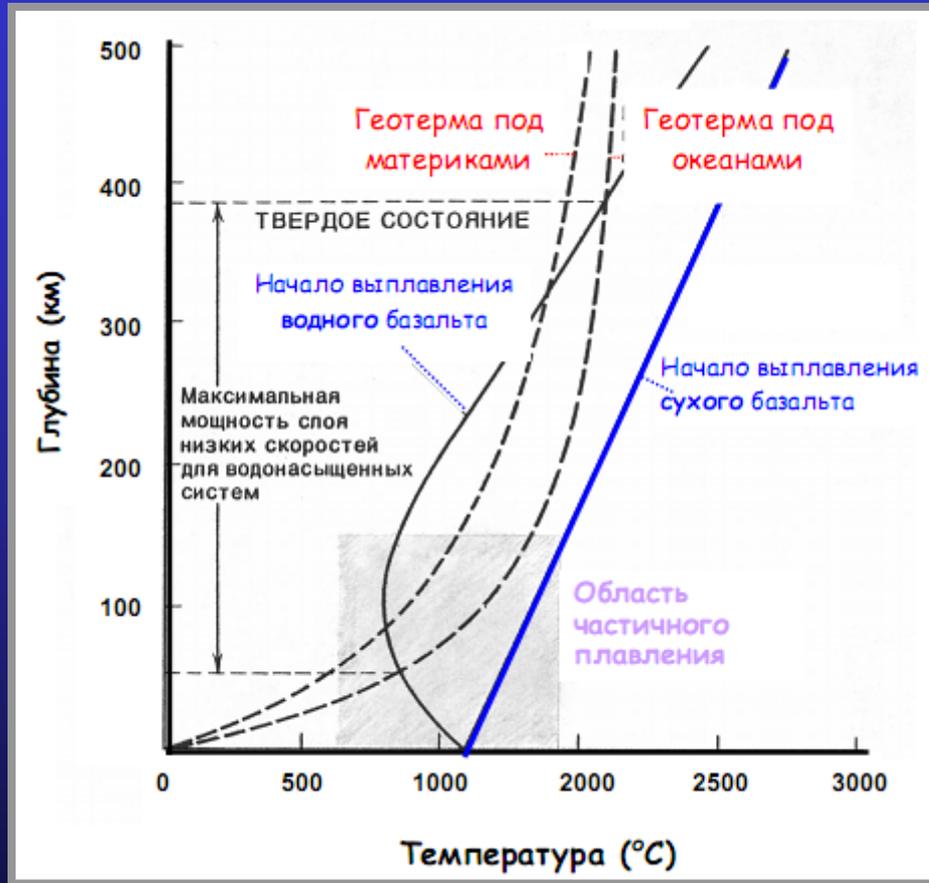
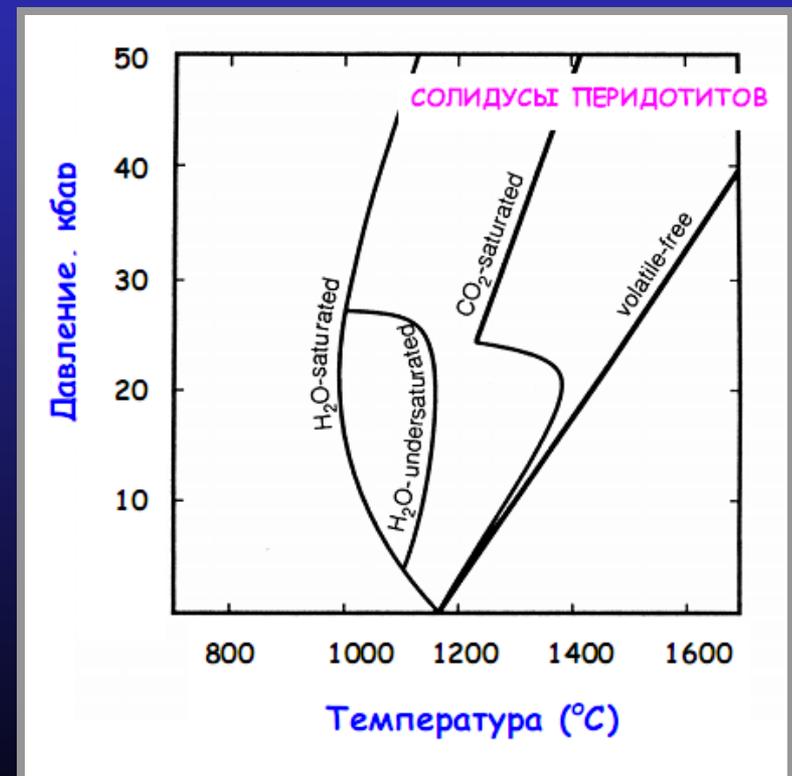


Схема влияния  $H_2O$  и  $CO_2$



# Присутствие летучих как главный фактор магмообразования

Именно “летучие” компоненты океанической плиты способствуют зарождению долгоживущих областей плавления мантийного клина.

В пределах этих зон идет генерация первичных магм высоко-Mg базальтов, **последующее фракционирование которых приводит к образованию дифференциатов высокоглиноземистого состава.**

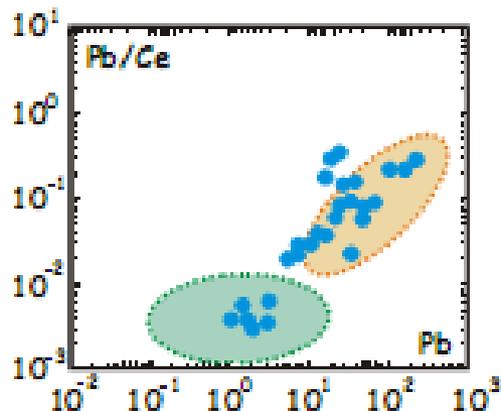
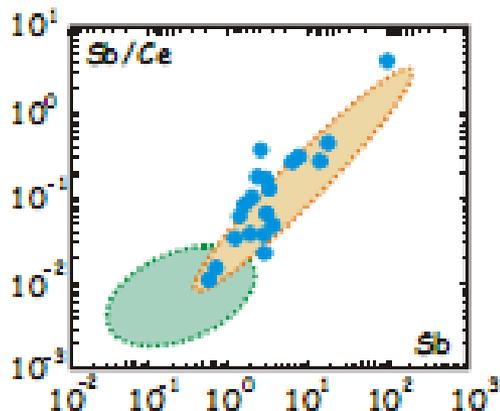
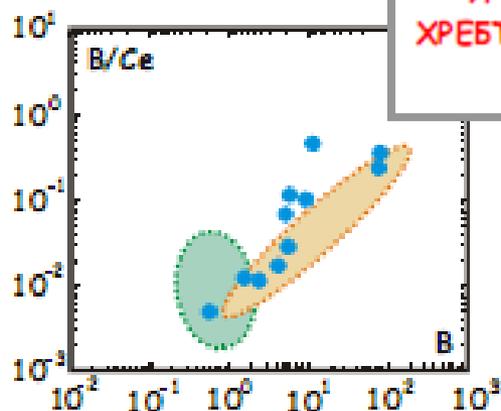
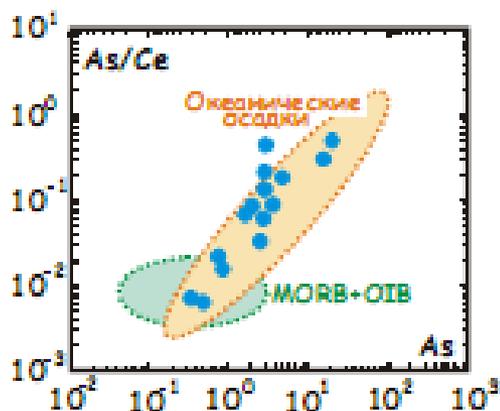
Эти обогащенные  $Al_2O_3$  производные магмы и более кислые продукты их кристаллизации достигают верхних горизонтов коры и извергаются на вулканах субдукционных зон.

А вот **исходные высоко-Mg расплавы – редкий гость на поверхности.** По-видимому, они практически нацело фракционируют при подъеме с глубин магмогенерации.

**“Память” о мантийной предыстории несут лишь отдельные фенокристаллы и микровключения высоко-Mg оливинов, пироксенов и хромистой шпинели.**

# Признаки присутствия компонентов осадочного материала в источнике магм

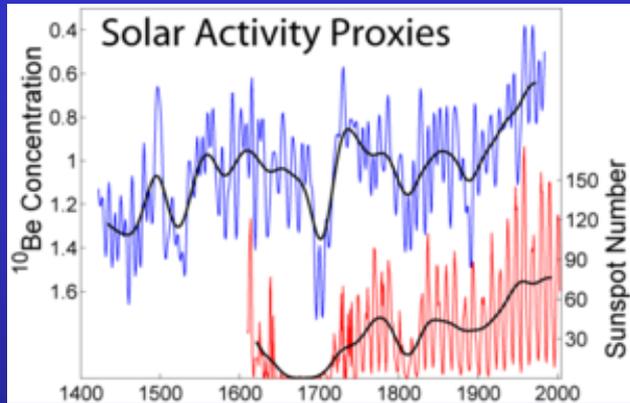
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ AS, B, SB И PB В МЕТАОСАДКАХ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОДАХ СРЕДИННЫХ ХРЕБТОВ (MORB), ОКЕАНИЧЕСКИХ О-ВОВ (OIB) И ОСТРОВНЫХ ДУГ (●)



**B – подвижный элемент**

- в современных осадках 50-150 г/т
- в измененной океанической коре 10-300 г/т
- в MORB и OIB редко выше 2-3 г/т

# Признаки присутствия компонентов осадочного материала в источнике магм



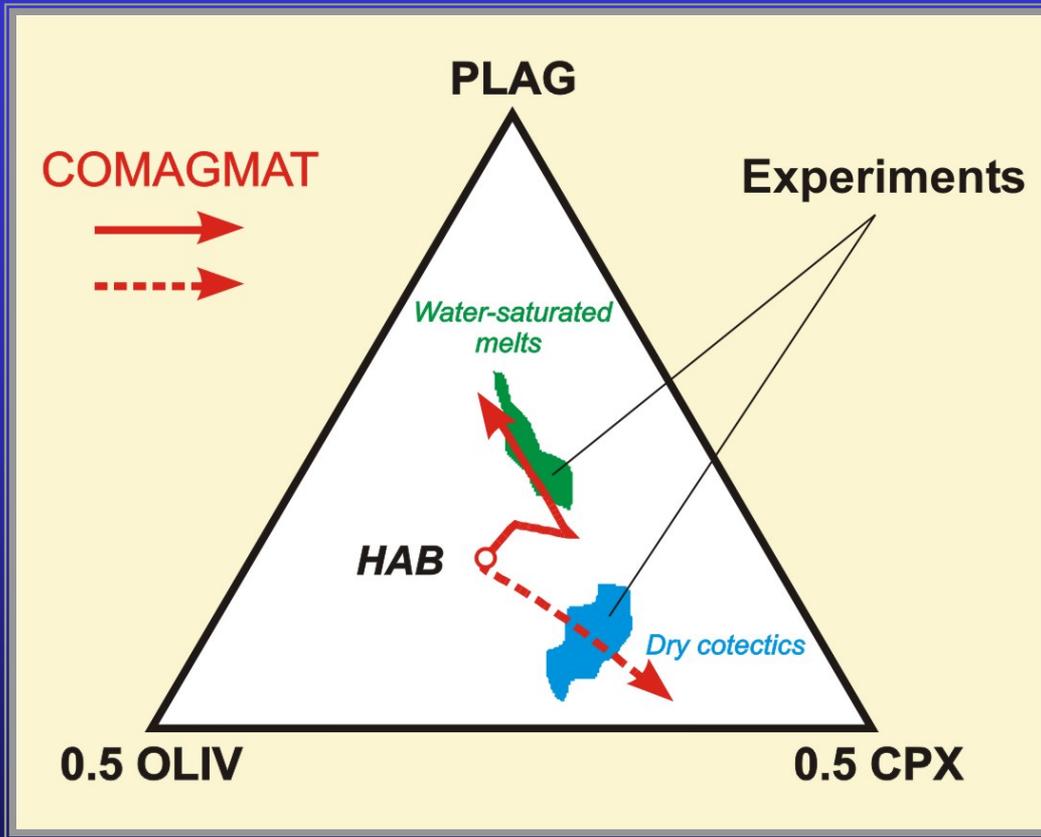
Plot showing variations in solar activity, including variation in  $^{10}\text{Be}$  concentration which varies inversely with solar activity. (Note that the beryllium scale is inverted, so increases on this scale indicate lower beryllium-10 levels).



Beryllium-10 has a half-life of  $1.39 \times 10^6$  years

- $^{10}\text{Be}$  - продукт воздействия космических лучей на кислород и азот верхних слоев атмосферы
- концентрируется в глинистых глубоководных осадках ( $^{10}\text{Be}/^9\text{Be} = 5000 \times 10^{-11}$ )
- полураспад - 1.5 млн лет (через 10 млн лет - ниже предела обнаружения)
- в MORB и OIB:  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be} < 5 \times 10^{-14}$

# Роль воды в образовании высоко-Al магм

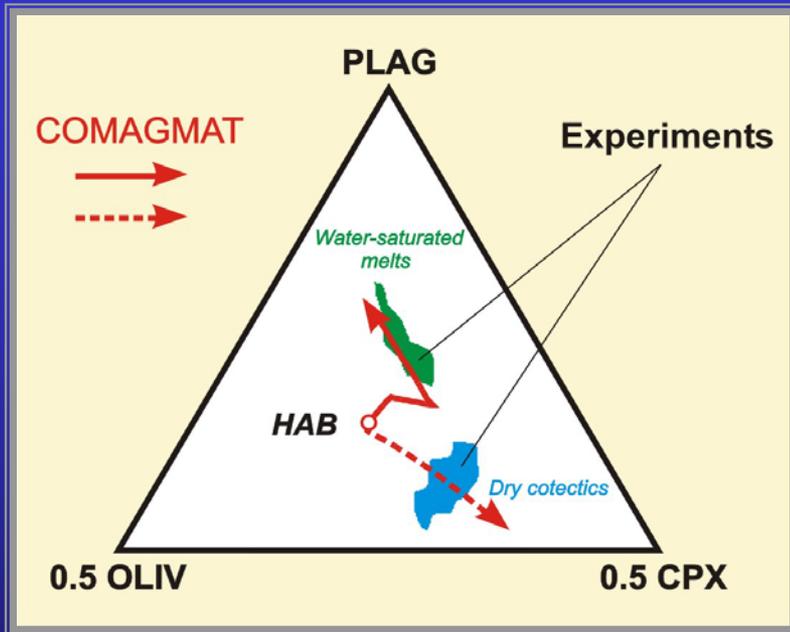


Проекция составов расплавов  
на диаграмму OLIV-PLAG-CPX

Две модельные линии -  
результаты расчетов  
равновесной кристаллиза-  
ции высокоглиноземистого  
базальта в “сухих” и  
“водных” условиях (при  
 $P=2$  кбар).

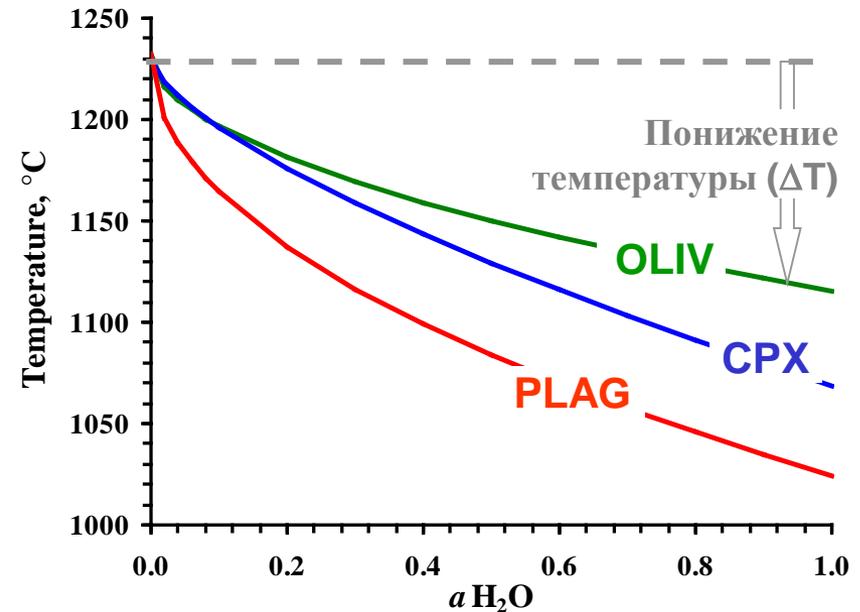
Эволюция “сухих” расплавов  
приводит в поле обедненных  
 $Al_2O_3$  котектик; “водный  
тренд” направлен в область  
высоко-Al и водонасыщенных  
систем.

# Экспериментальные исследования водосодержащих базальтовых расплавов (Р.Р.Альмеев, 1996-2011)



Добавление воды понижает температуру кристаллизации  $P$  значительно сильнее, чем для оливина и пироксенов.

Это понижение составляет порядка 50-100°C на 1% растворенной в расплаве воды.



$$\Delta T^{OL} = 116 \cdot a_{H_2O}^{0.52}$$

$$\Delta T^{CPX} = 161 \cdot a_{H_2O}^{0.68}$$

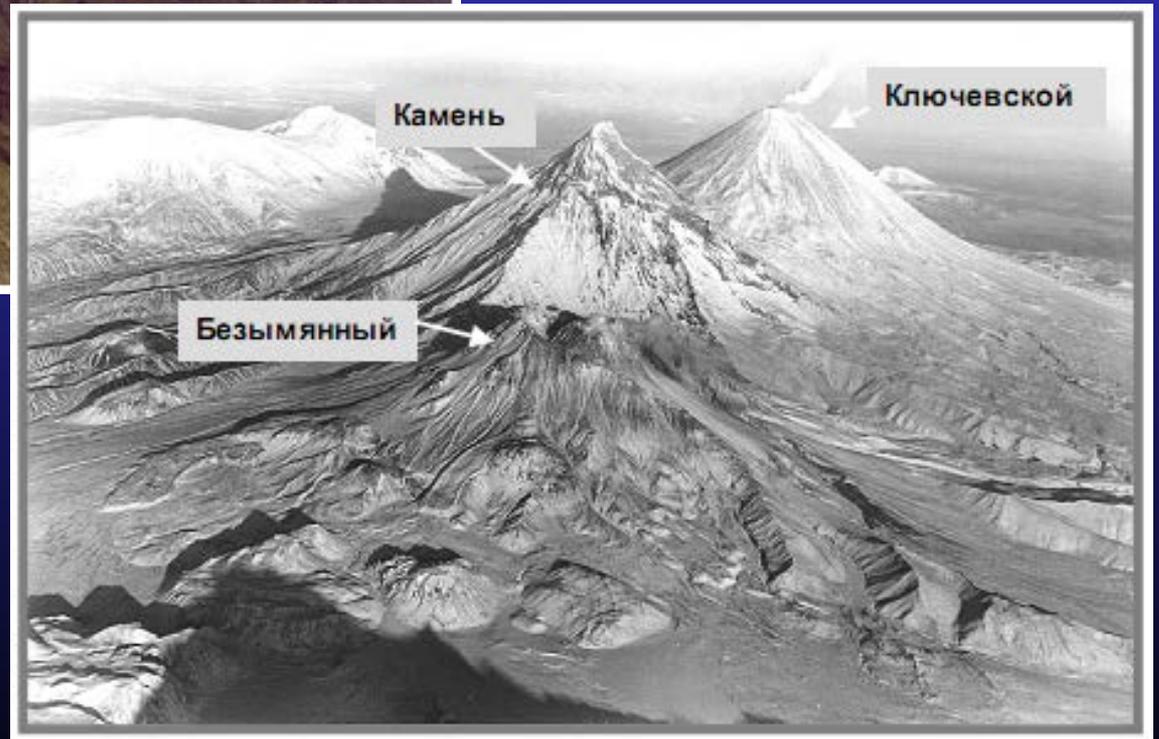
$$\Delta T^{PL} = 207 \cdot a_{H_2O}^{0.49}$$

$a_{H_2O}$  рассчитана по модели Бернэма

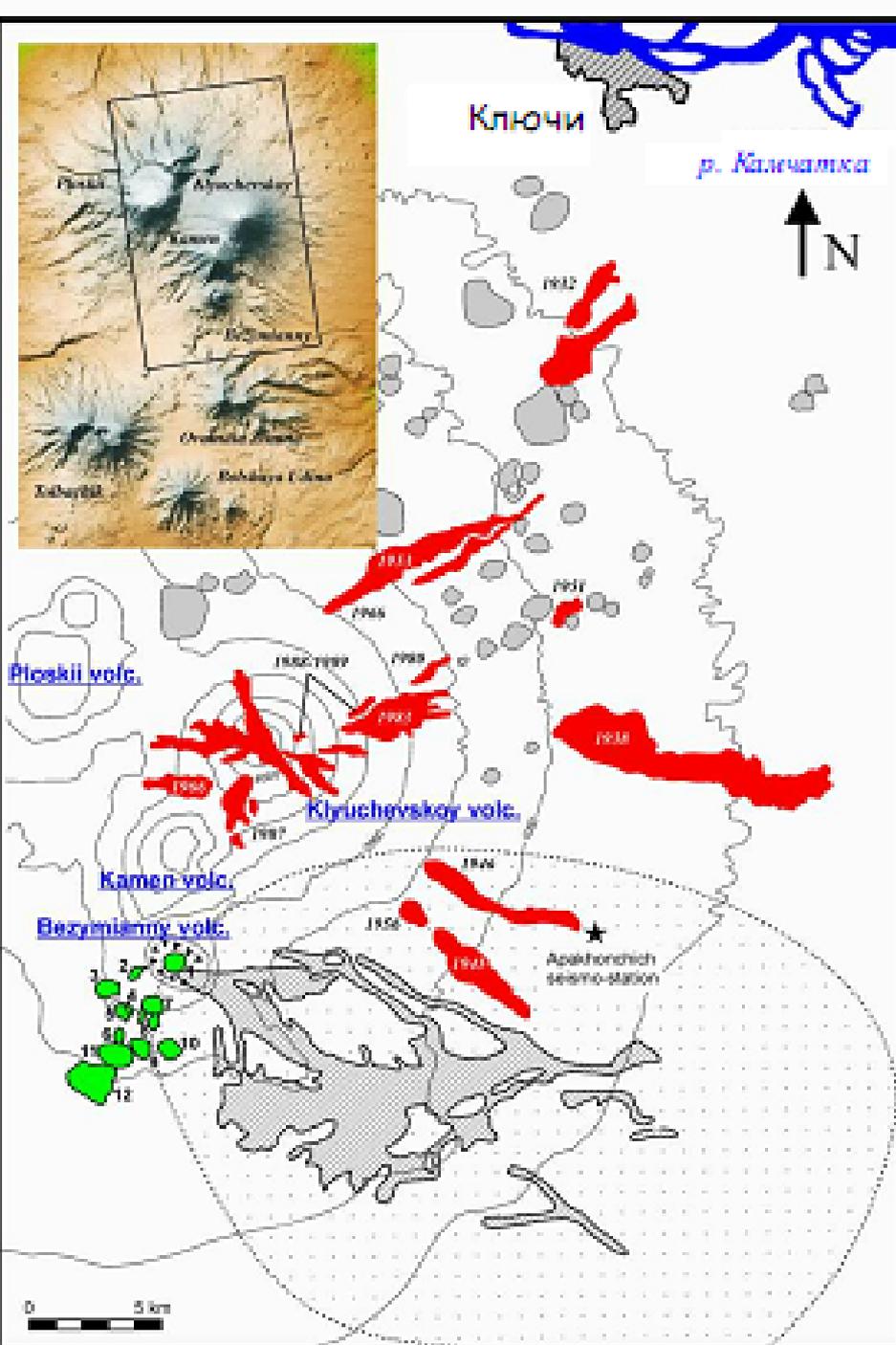
# Формирование андезит-базальтовой серии вулканов Ключевской и Безымянный



# Вулканы Ключевской, Безымянный и Камень

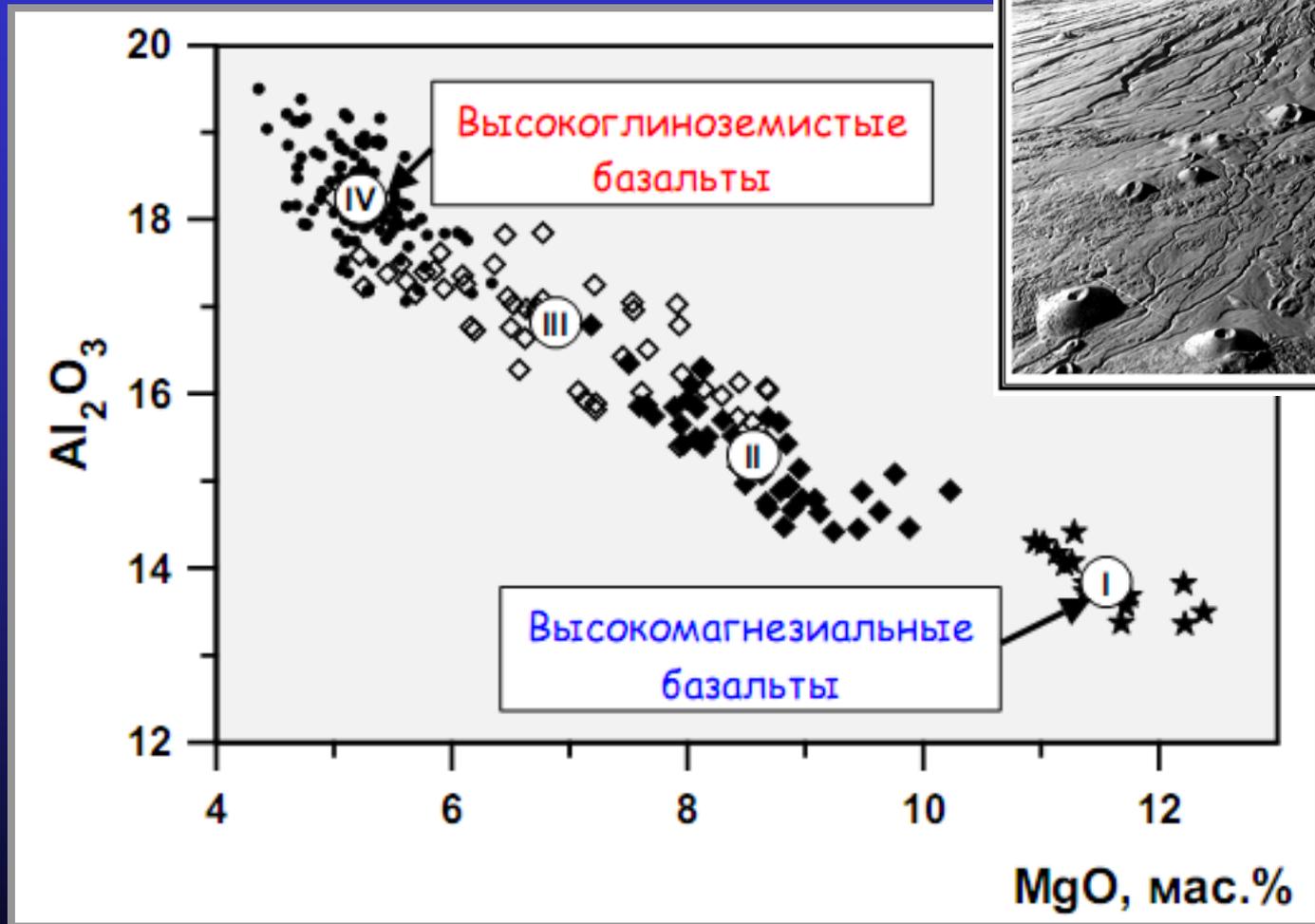
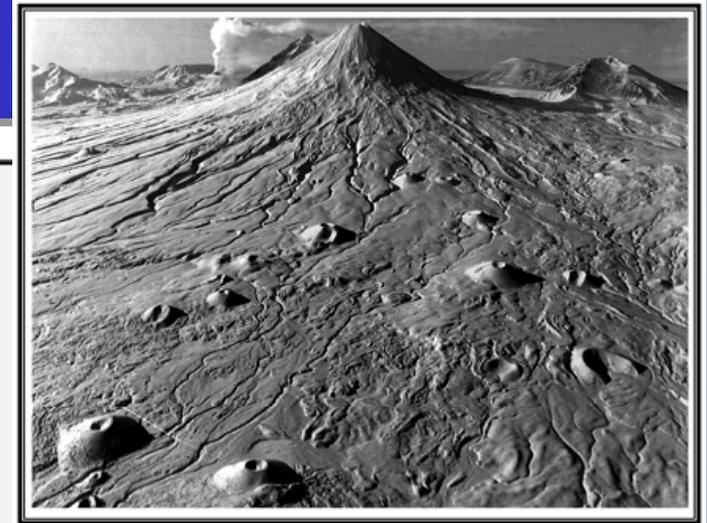


# Схема извержений влк. Ключевской и Безымянный

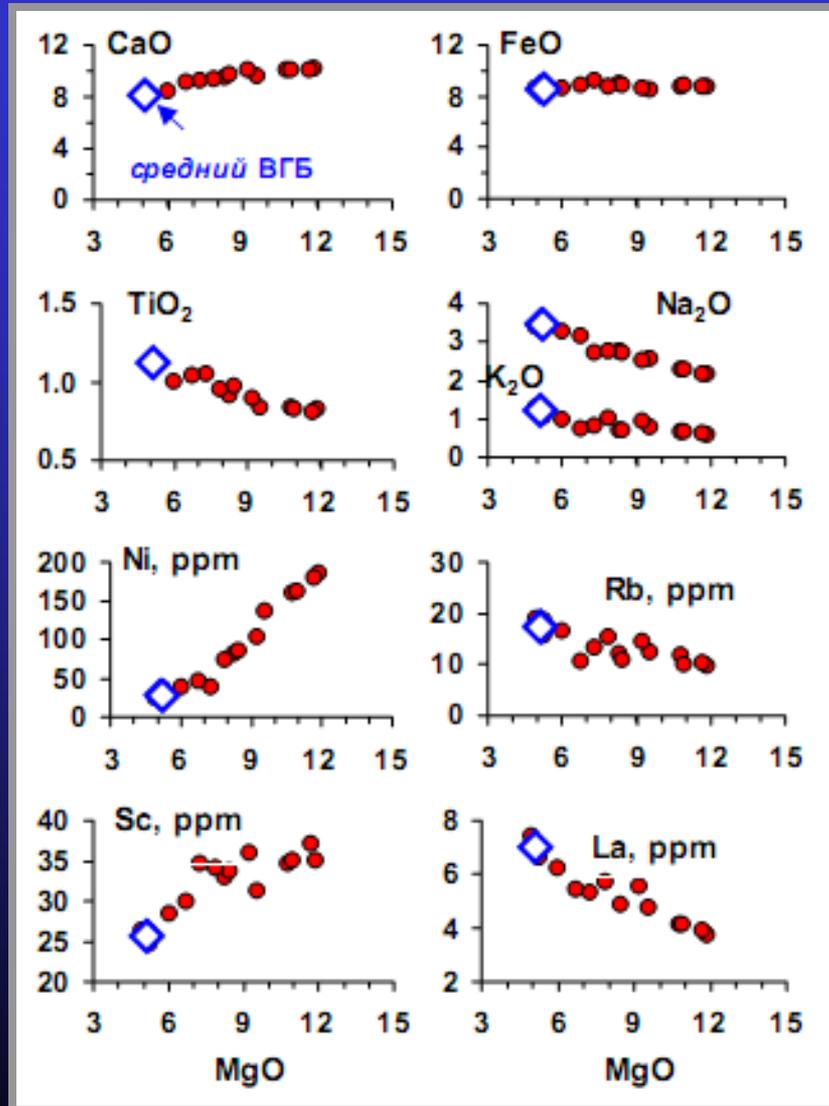


- 1 - кальдера влк. Безымянный, 2 - побочные прорывы,
- 3 - паразитические конуса, 4 - экструзивные купола,
- 5 - пирокластический поток 1956 г., 6 - отложения 1956 г.

# Эволюция содержаний $MgO$ и $Al_2O_3$ в базальтах Ключевского вулкана

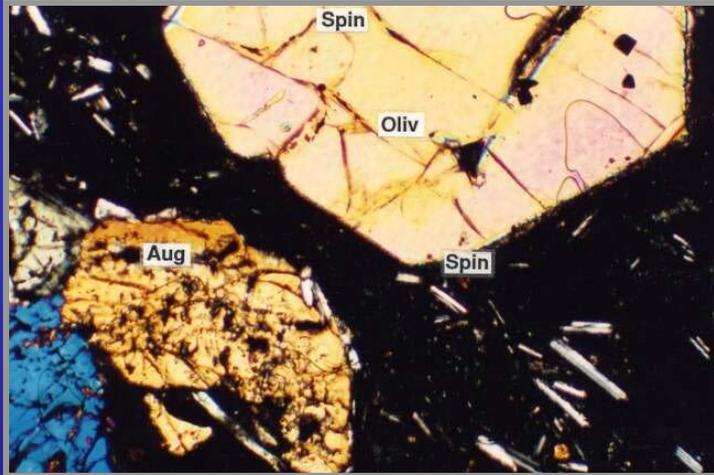


# Химический и нормативный состав базальтов Ключевского вулкана

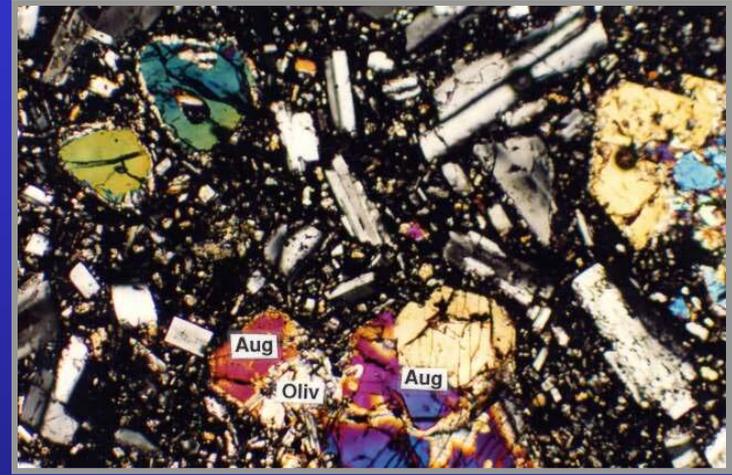


Тип	Высоко-Mg (I)	Магнези- альный (II)	Глинозе- мистый (III)	Высоко-Al (IV)
n	15	46	50	131
SiO <sub>2</sub>	51.76	53.39	53.22	53.50
TiO <sub>2</sub>	0.86	0.84	0.95	1.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.86	15.29	16.79	18.26
FeO	8.83	8.52	8.83	8.67
MnO	0.17	0.17	0.17	0.16
MgO	11.55	8.58	6.89	5.24
CaO	9.73	9.41	8.91	8.22
Na <sub>2</sub> O	2.47	2.72	3.11	3.45
K <sub>2</sub> O	0.63	0.90	0.96	1.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.18	0.18	0.20
Mg/(Mg+Fe)	0.699	0.641	0.580	0.517
Ca/(Ca+Al)	0.561	0.528	0.491	0.450
CIPW, мас. %				
Or	3.72	5.32	5.67	7.09
Ab	20.90	23.01	26.31	29.19
An	24.88	26.86	29.02	30.80
Di	18.18	15.24	11.54	7.20
Hy	17.93	25.04	21.96	21.15
Ol	12.42	2.52	3.28	2.02
Ilm	1.63	1.60	1.80	2.07
Ap	0.36	0.43	0.43	0.47

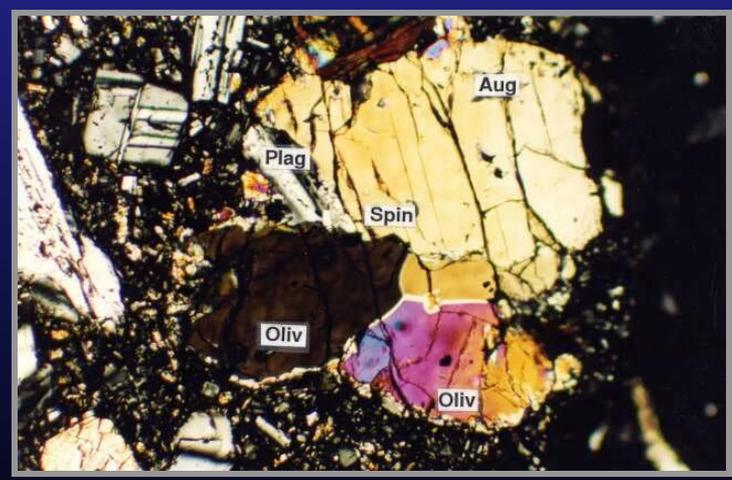
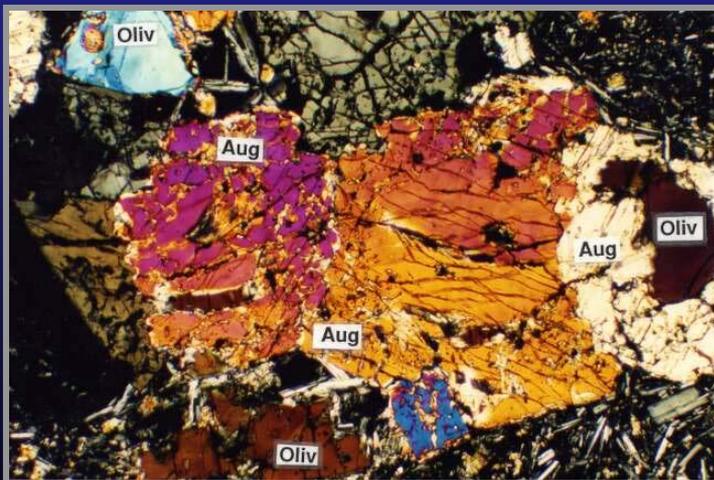
# Структуры высоко-Mg и высоко-Al базальтов Ключевского вулкана



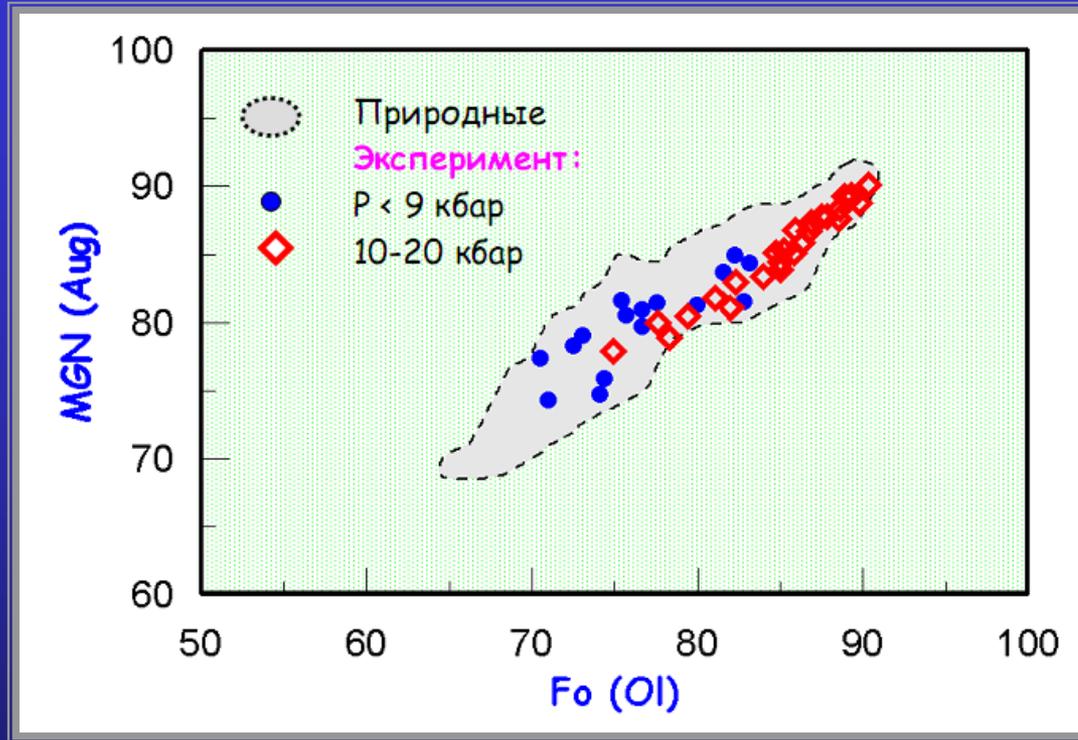
*Высокомagneзиальные базальты*



*Высокоглиноземистые базальты*

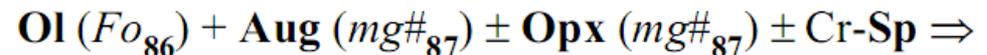
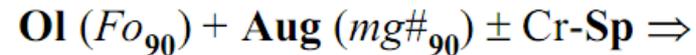


# Эволюция составов породообразующих минералов

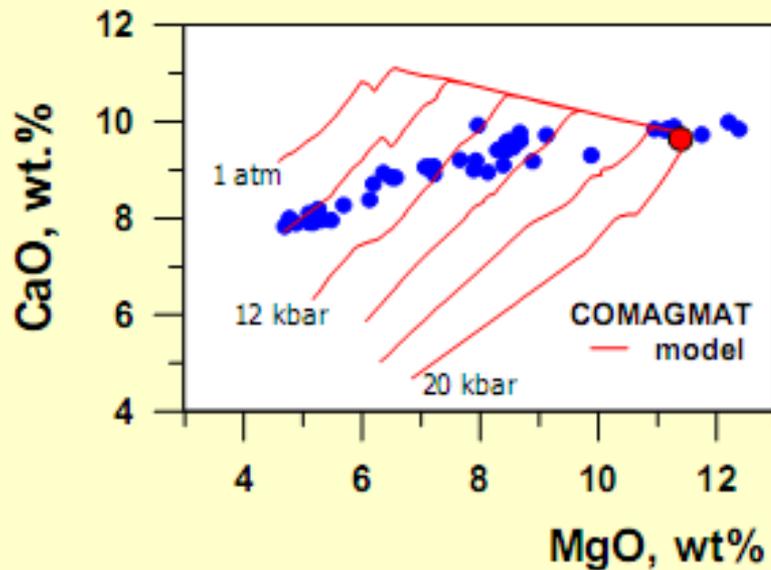
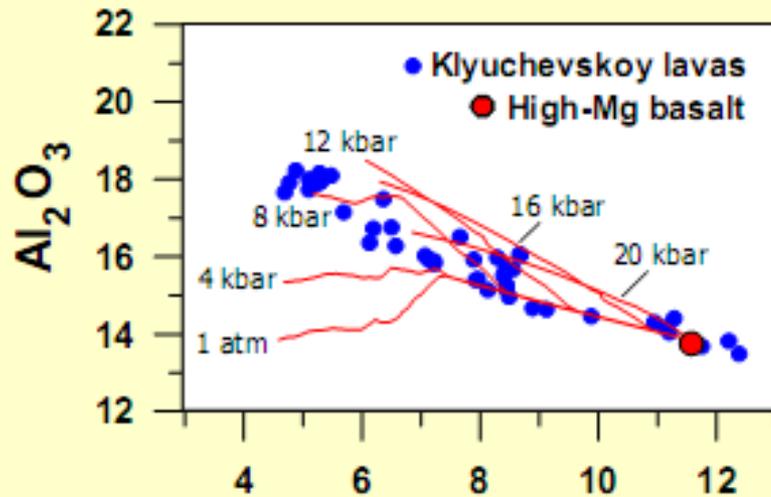


Составы природных  
и экспериментальных  
Ol и Crx

Последовательность  
кристаллизации  
ключевских магм

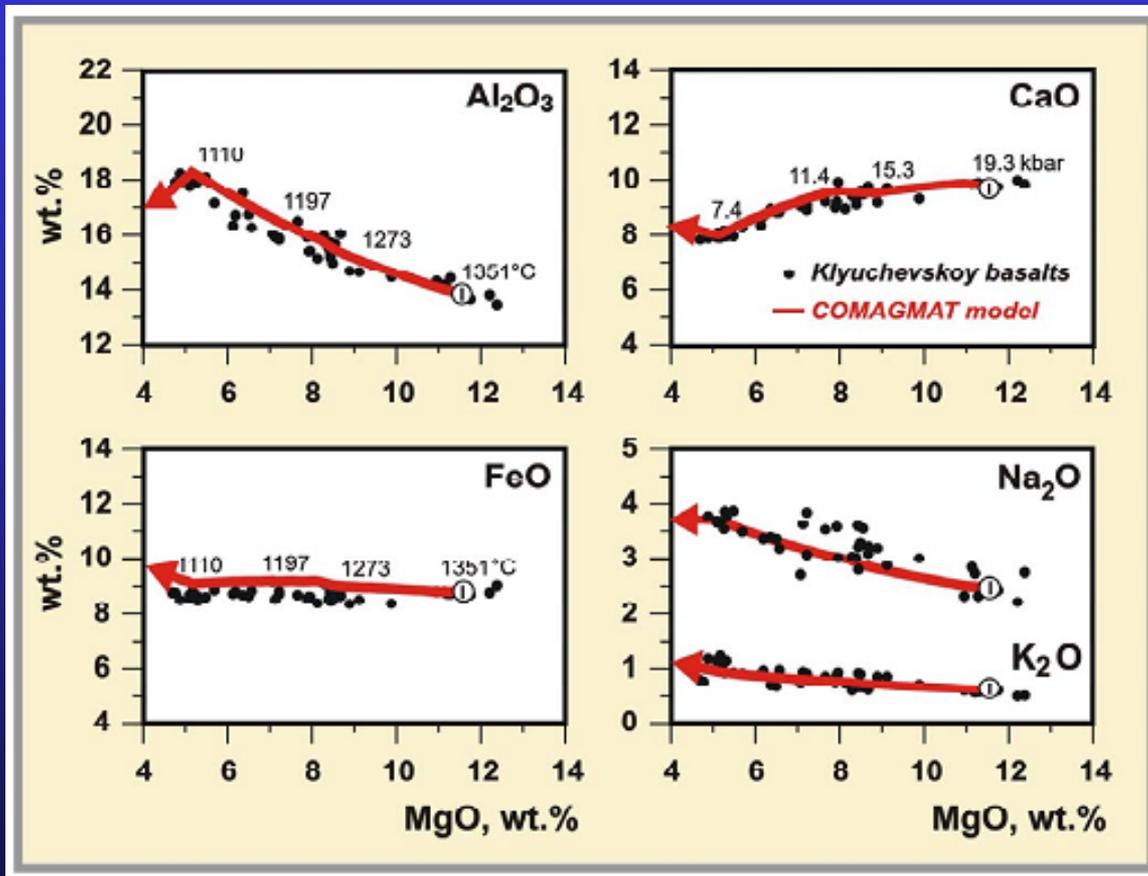


# Численное моделирование изобарической фракционной кристаллизации расплава высоко-Мg базальта при разных давлениях



*Природный петрохимический тренд пересекает модельные линии изобарической кристаллизации исходного расплава в интервале давлений 1 атм – 20 кбар*

# Оптимальная модель декомпрессионного фракционирования



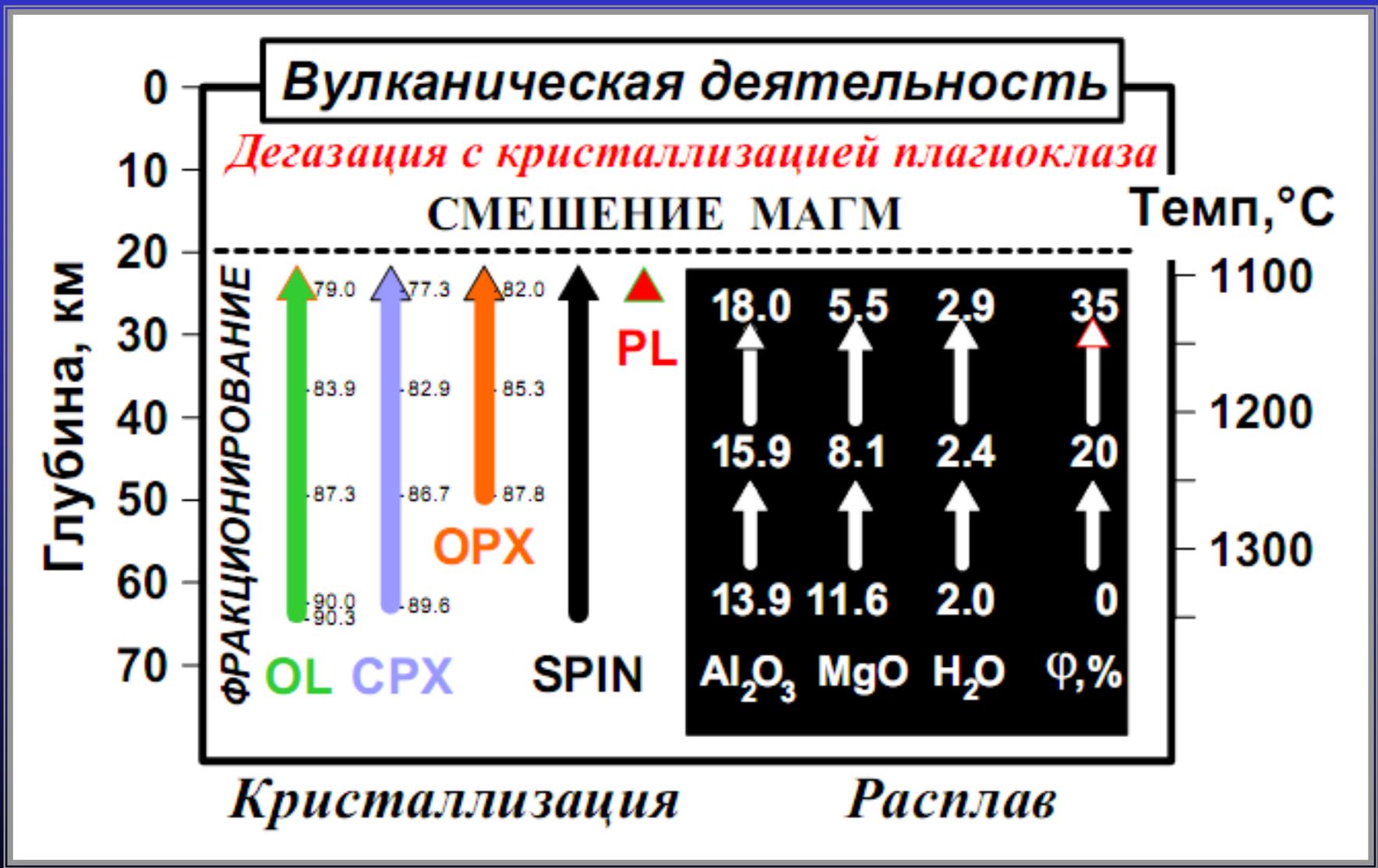
Переход высоко-Mg в высоко-Al базальты отвечает ~40% фракционированию ассоциации Ol-Aug-Sp в интервале давлений от 19 до 7 кбар.

При этом температура магмы понижалась от 1350 до 1100°C.

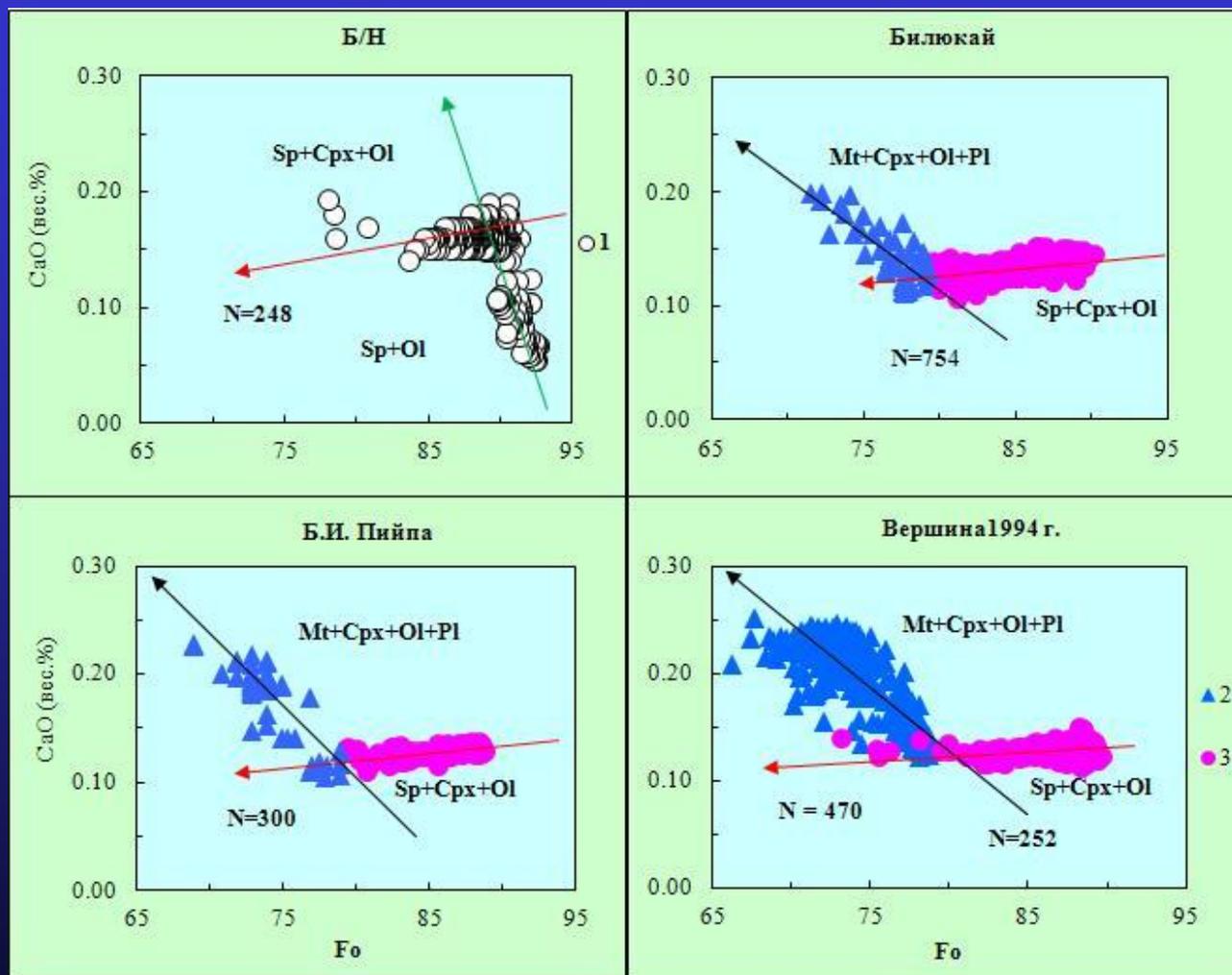
Содержание воды в исходном расплаве составляло 2 мас.%.

Накопление воды в расплаве по мере кристаллизации привело к значительной задержке кристаллизации Pl и образованию высокоглиноземистых дифференциатов, содержащих > 18 мас.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

# Схема химической и фазовой эволюции магматизма Ключевского вулкана



# Са в ключевских оливинах – как свидетельство полибарического фракционирования !?

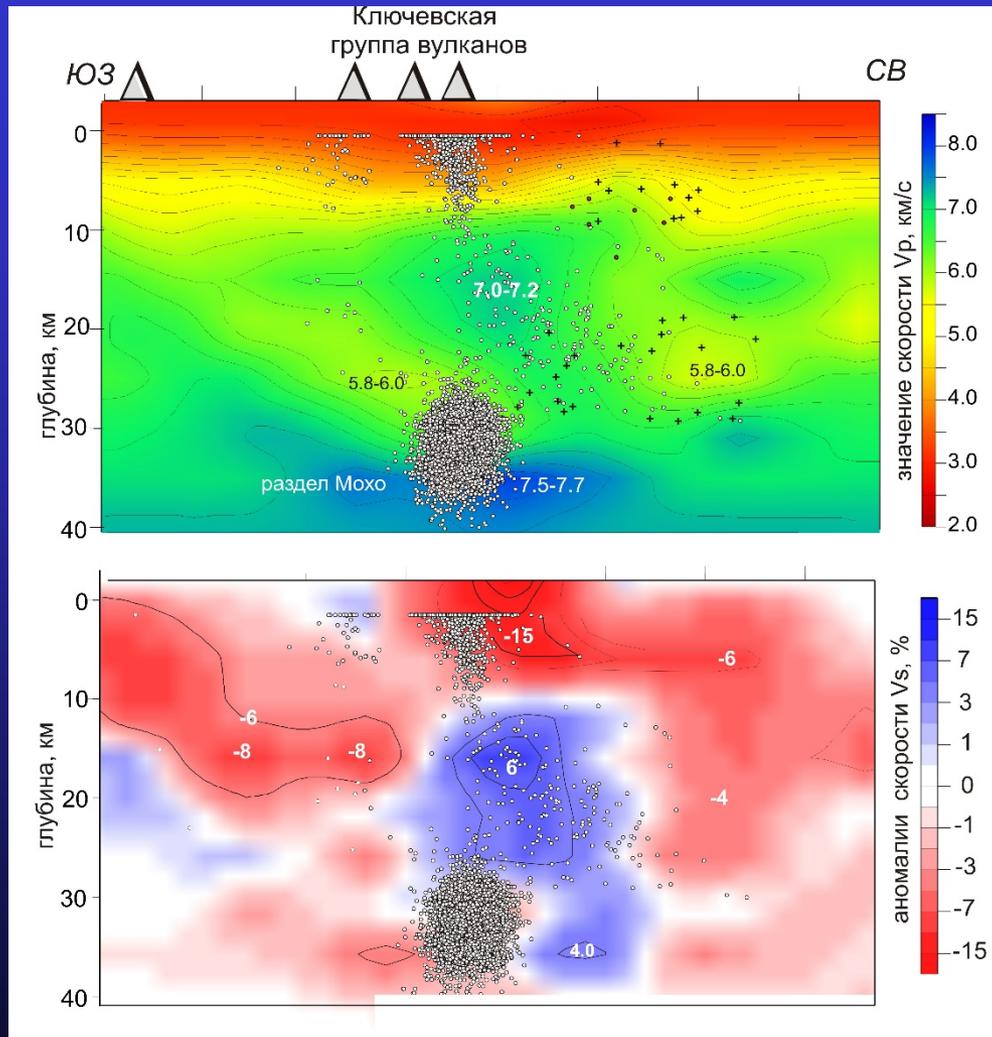


- Исследовано несколько тысяч составов Ol и Cpx из магнезиальных и высоко-Al базальтов и андезибазальтов вулкана Ключевской.

- Дуализм распределения CaO и  $Al_2O_3$  в оливинах указывают на внедрение магнезиальной магмы из глубинного очага в малоглубинную "высокоглиноземистую" камеру.

- Петрологические данные находятся в соответствии с сейсмическими данными о строении земной коры под вулканами.

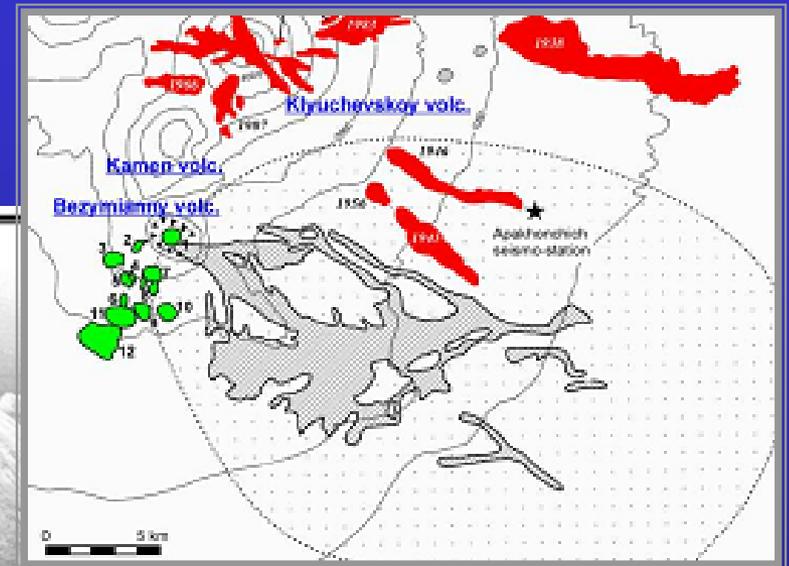
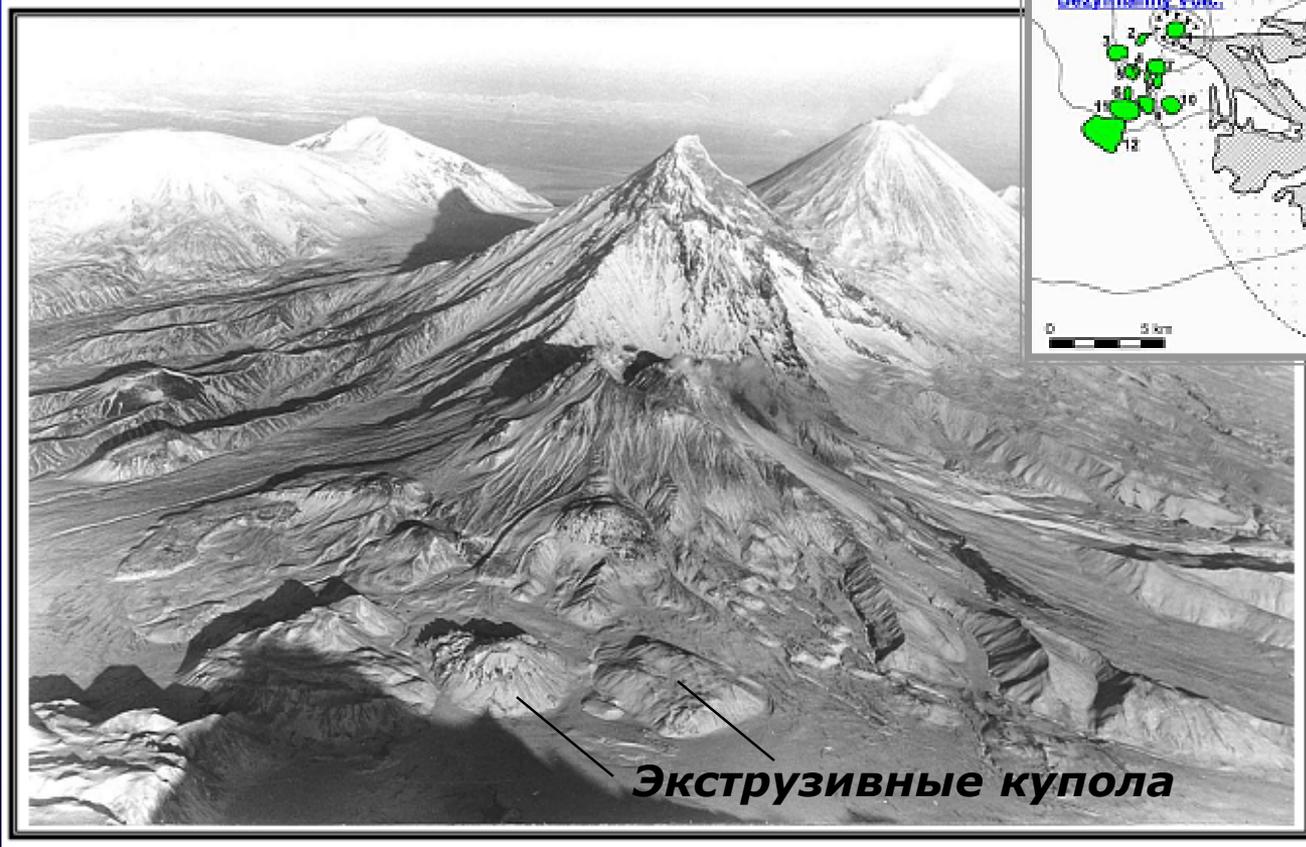
# Вертикальный разрез земной коры в аномалиях $V_p$ и $V_s$ под Ключевской группой вулканов



Изолинии абсолютных значений сейсмических скоростей и (кружками) гипоцентры вулканотектонических землетрясений

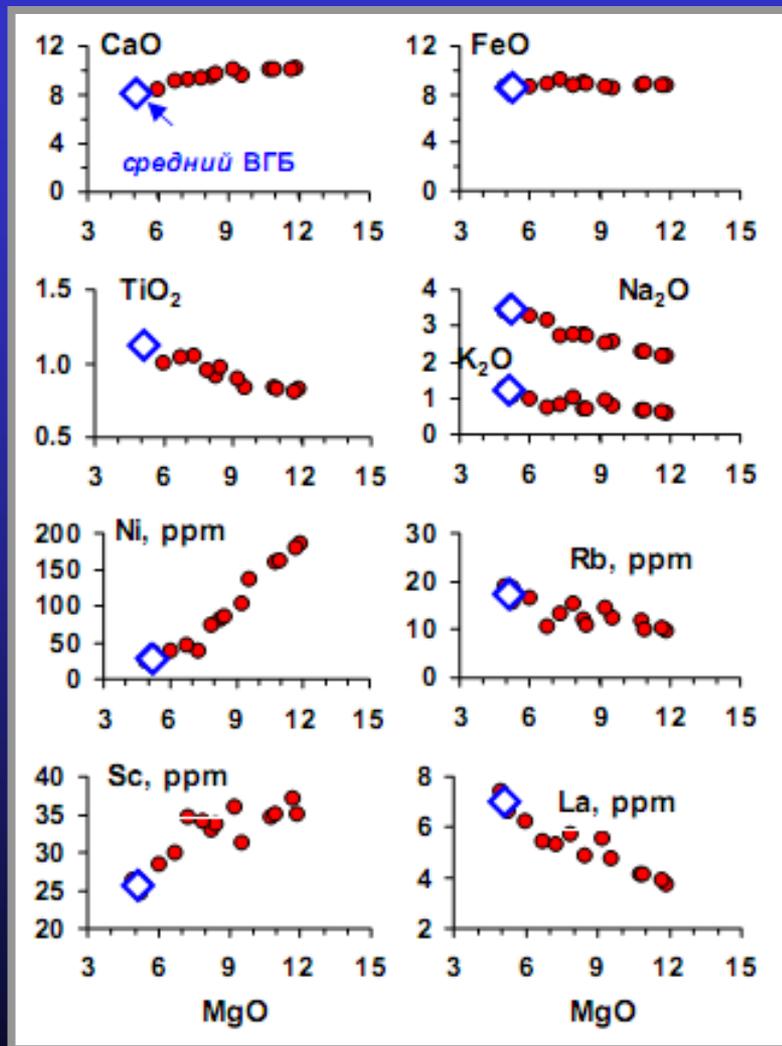
С.А. Хубуня, Л.И. Гонтовая, А.В. Соболев, В.С. Хубуня «К вопросу о магматических очагах под вулканом Ключевской (Камчатка). Вулканология и сейсмология, № 2, 2018 г.

# Эволюция магматизма вулкана Безымянный

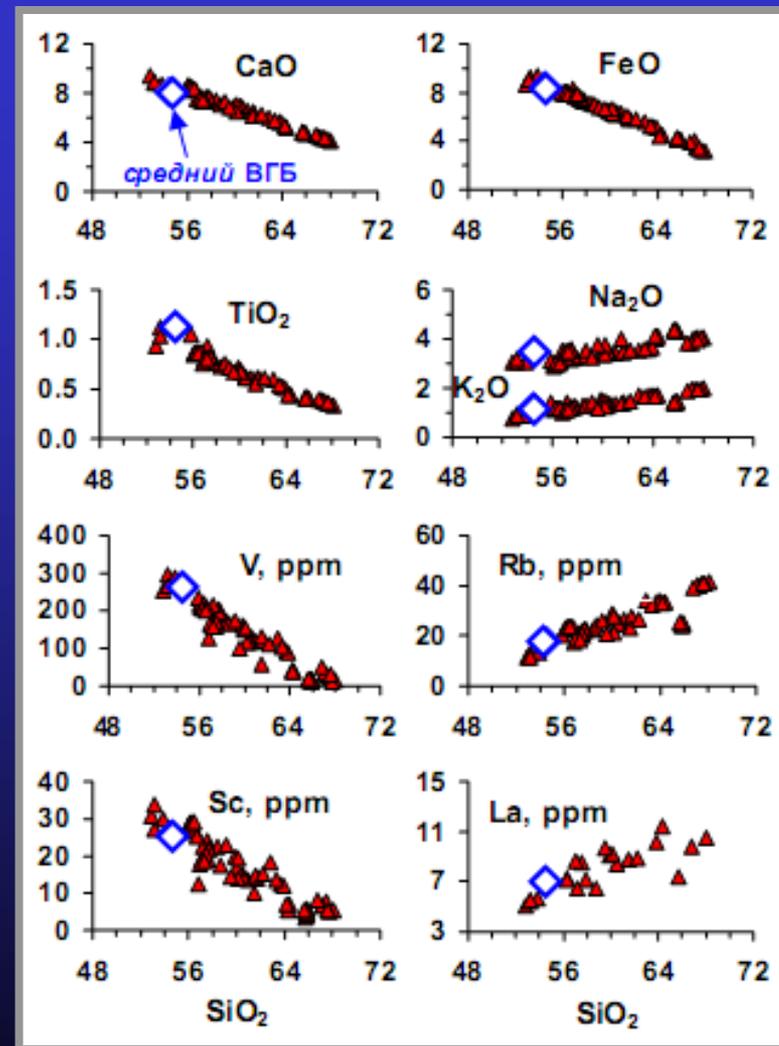


**Общий вид вулкана Безымянный**

# Вариации химического состава базальтов Ключевского и лав вулкана Безымянный

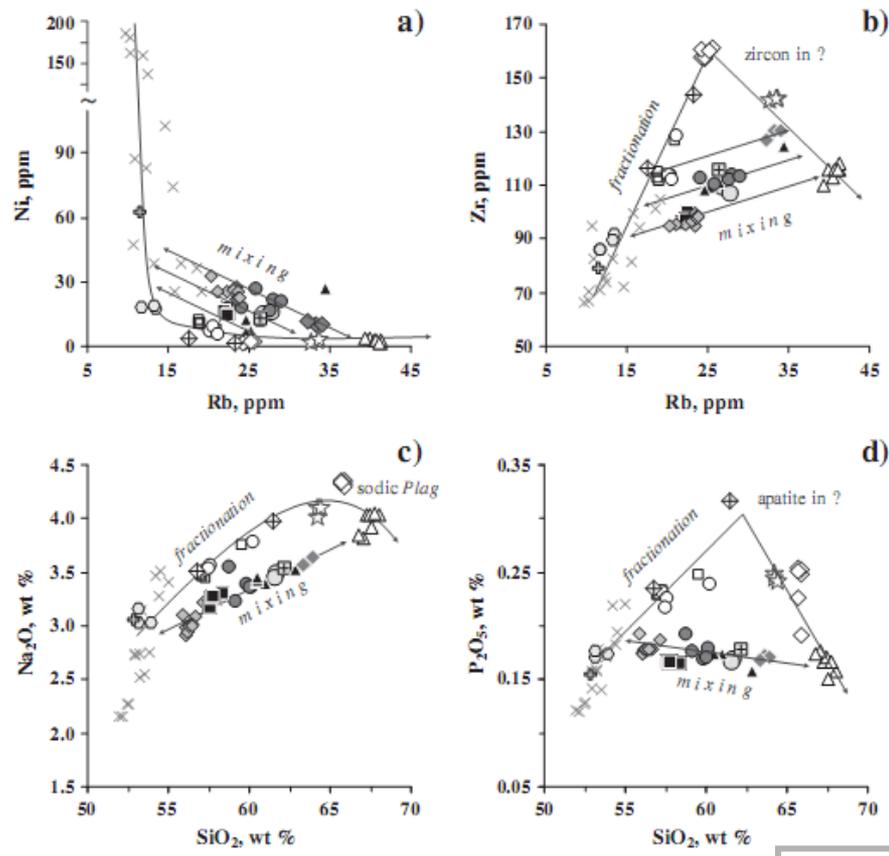


Влк. Ключевской



Влк. Безымянный

# Вариации химического состава вулканитов Ключевского Безымянного – признаки смешения



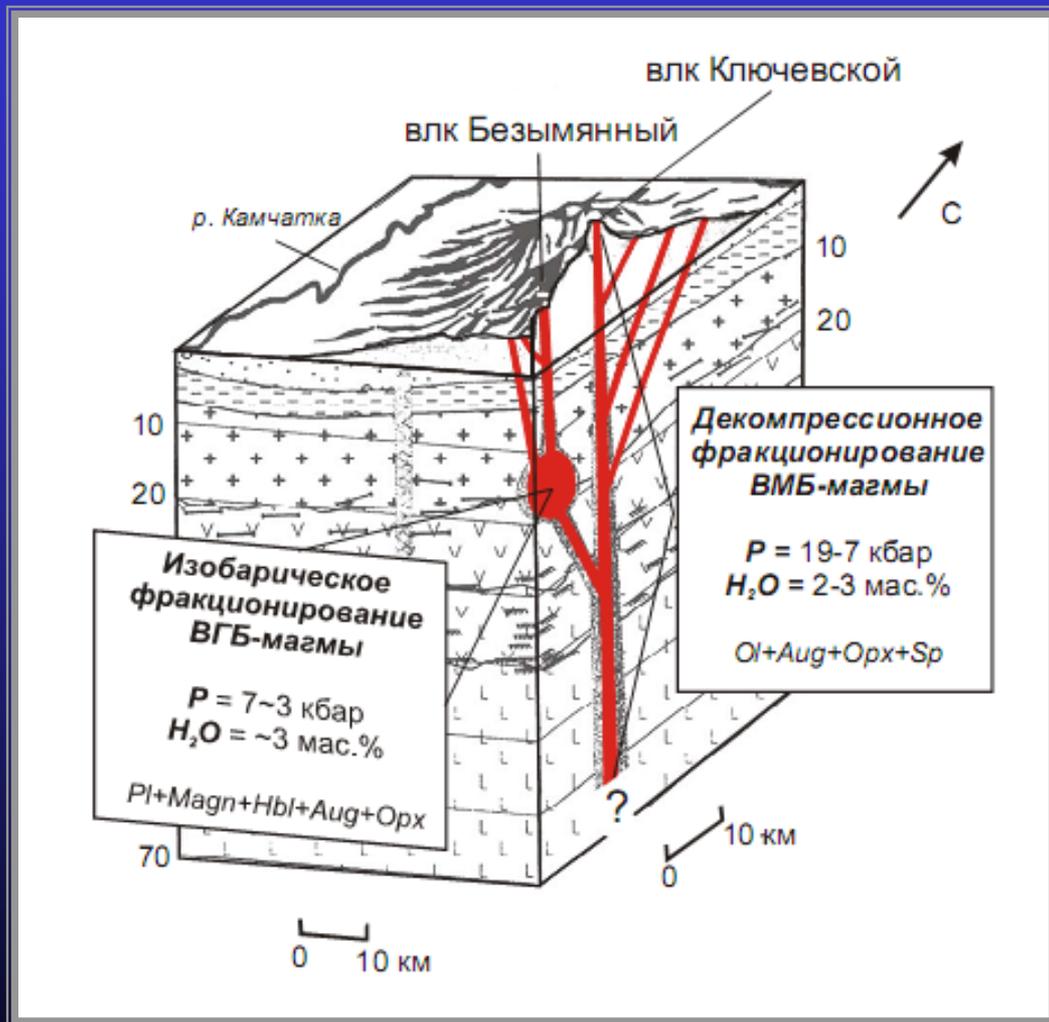
Decoding crystal fractionation in calc-alkaline magmas from the Bezymianny Volcano (Kamchatka, Russia) using mineral and bulk rock compositions  
Renat R. Almeev <sup>a,\*</sup>, Jun-Ichi Kimura <sup>b</sup>, Alexei A. Ariskin <sup>c</sup>, Alexey Yu. Ozerov <sup>d</sup>

× HMBs-HABs, Kлючевskoi

◆ basalt, Kamen

× HMBs-HABs, Kлючевskoi	◆ basalt, Kamen	
<b>pre-Bezymianny (&gt;10-11 ky)</b>		
□ Plotina Dome	○ Stupenchaty Dome	
⊕ Dvuglavy Dome	◇ Pravilny and Gladkii Domes	
△ Raschlenenny Dome		
<b>Bezymianny (&lt; 4.7 ky)</b>		
<b>B-I</b>	<b>B-II</b>	<b>B-III</b>
◆ LF-II	● LF-IV	■ PF-1997
⊕ Greben Dome	◆ Lokhnaty Dome	▲ LF-VI
☆ Treugolny Zub Dome	○ Expedition Dome	
○ basaltic andesites		

# Гипотетическая схема питания вулканов Ключевской и Безымянный



Высокоглиноземистые магмы как продукты фракционирования мантийного источника ключевских магм являются родительскими для более кислых андезитов вулкана Безымянный.

По Озерову и Альмееву с дополнениями (1995)

# ОБЩИЕ ВЫВОДЫ О ПРИРОДЕ

## андезит-базальтового магматизма островных дуг

### Высокие содержания $H_2O$ в исходных магмах

- > эксплозивность извержений
- > атр фенокристы
- > высокая глиноземистость выплавок
- > связь с  $f_{O_2}$  - ранняя кристаллизация Ti-Mt

**ИЩ тренды** – результат фракционной кристаллизации высоко-Mg и высоко-Al магм

**Высокие LILE/HFSE** – плавление в условиях “мантийного клина” (надсубдукционной мантии)

**$^{10}Be$ , B** – присутствие “субдукционного компонента”

**Поперечная зональность** - связь с глубиной очага + снижение степени плавления (от желоба)