

Общая тема:

АКТИВНЫЕ ОКРАИНЫ КОНТИНЕНТОВ

Лекция № 25

**Природа магматизма и
происхождение андезит-базальтовых
серий и толеитов островных дуг
(на примере Восточной Камчатки)**

КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНЫХ СЕРИЙ КАМЧАТКИ



SR - Срединный хребет

CKD - Центрально-Камчатская депрессия

EVF - Восточный Вулканический фронт



Рассмотрим следующие вопросы...

- 1. *Высокоглиноземистые базальты и гиперстеновые серии***
- 2. *Значение высокомагнезиальных базальтов***
- 3. *Роль "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

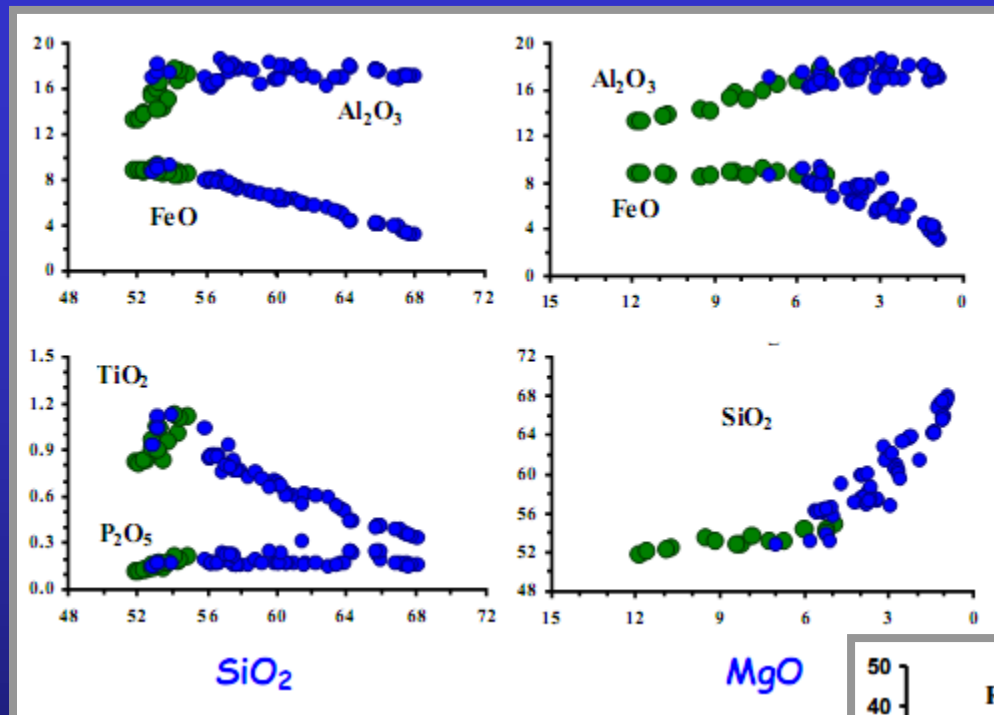
Породы этого типа характеризуются высоким содержанием глинозема (> 18 мас.% Al_2O_3) и присутствием ОРХ в основной массе.

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

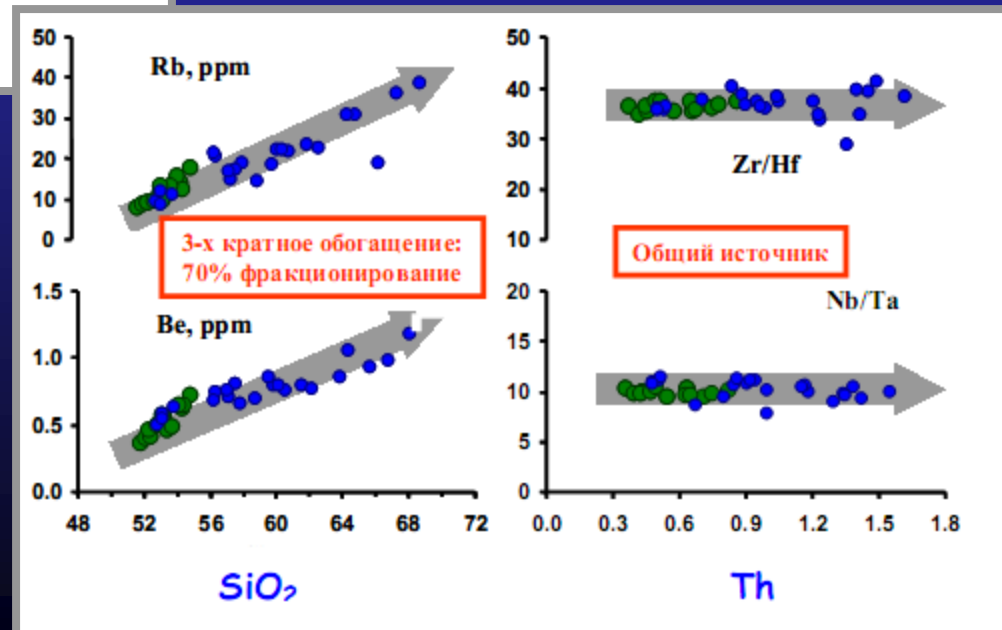
Альтернативой подобным ассоциациям являются базальты пижонитовой серии, в основной массе которых присутствует Риг – “островодужные толеиты”.

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

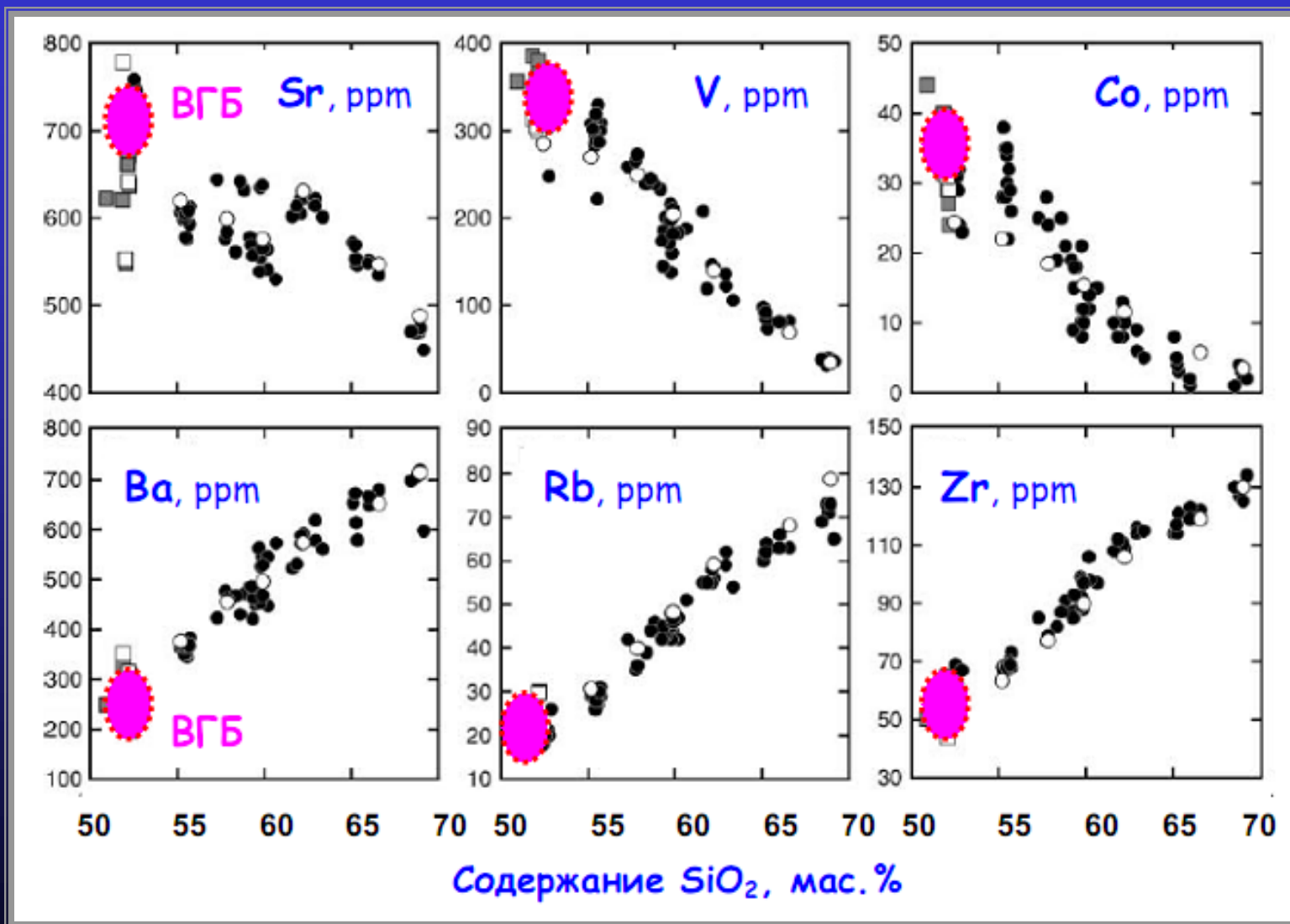


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ И ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНОЙ СЕРИИ ВУЛКАНОВ
КЛЮЧЕВСКОЙ (●) И БЕЗЫМАННОЙ (●)

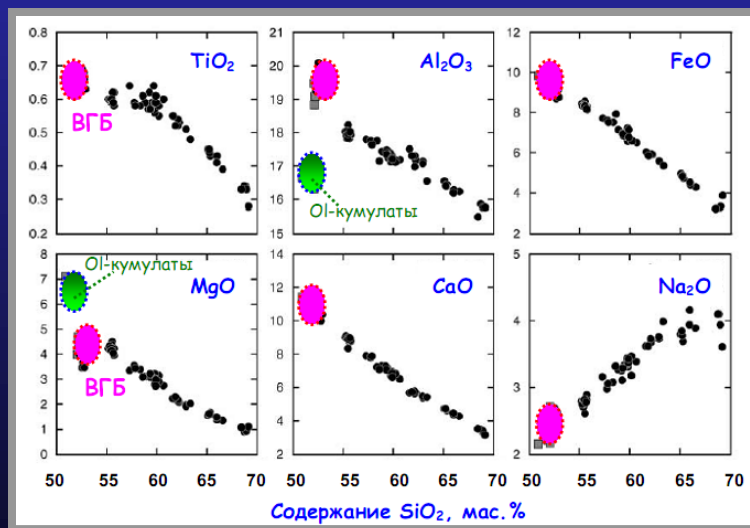
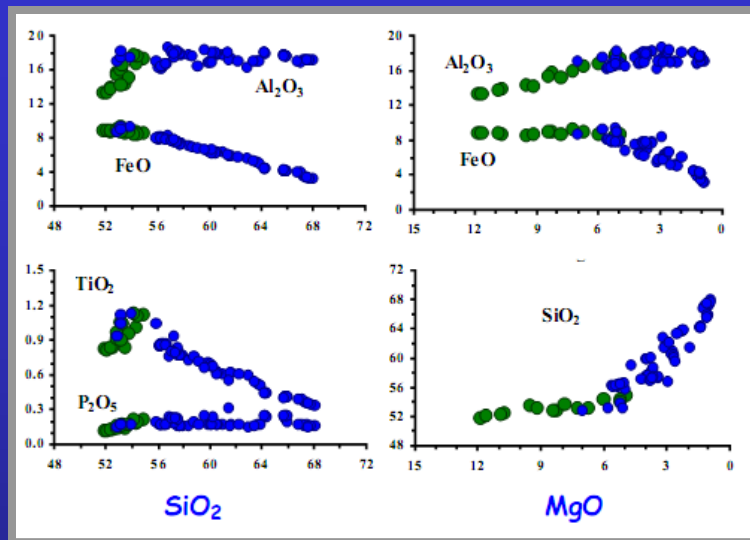


Данные Р.Р. Альмеева (2005)

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



Значение высокомагнезиальных базальтов

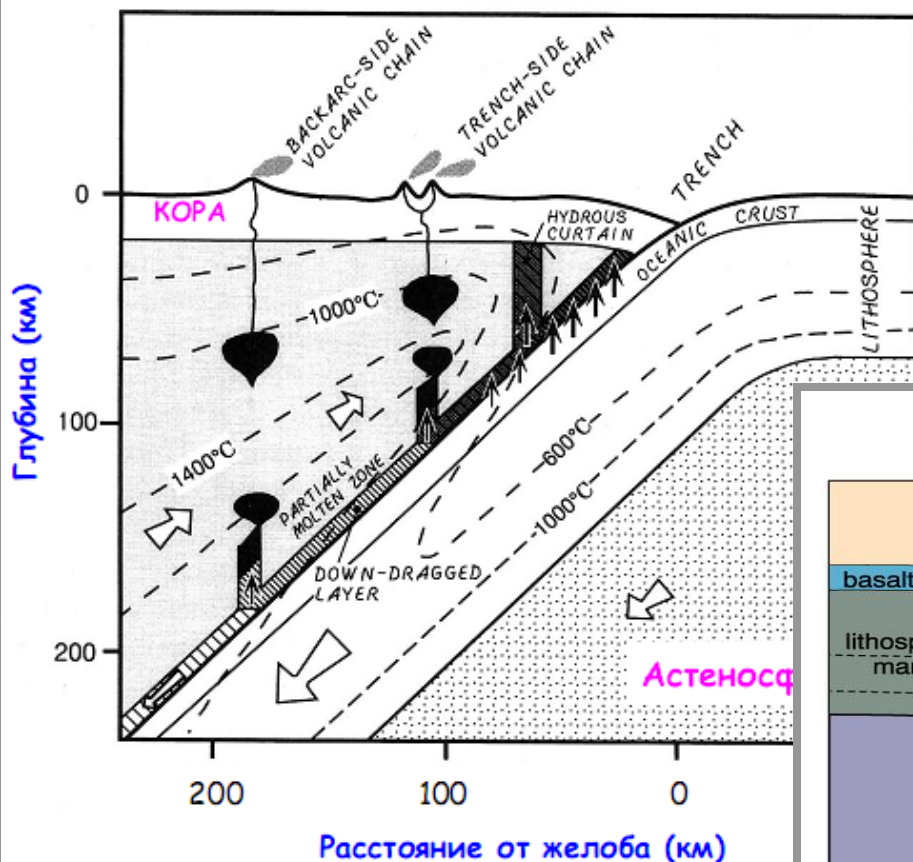


ПРИМЕРЫ АССОЦИАЦИЙ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ И ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ БАЗАЛЬТОВ

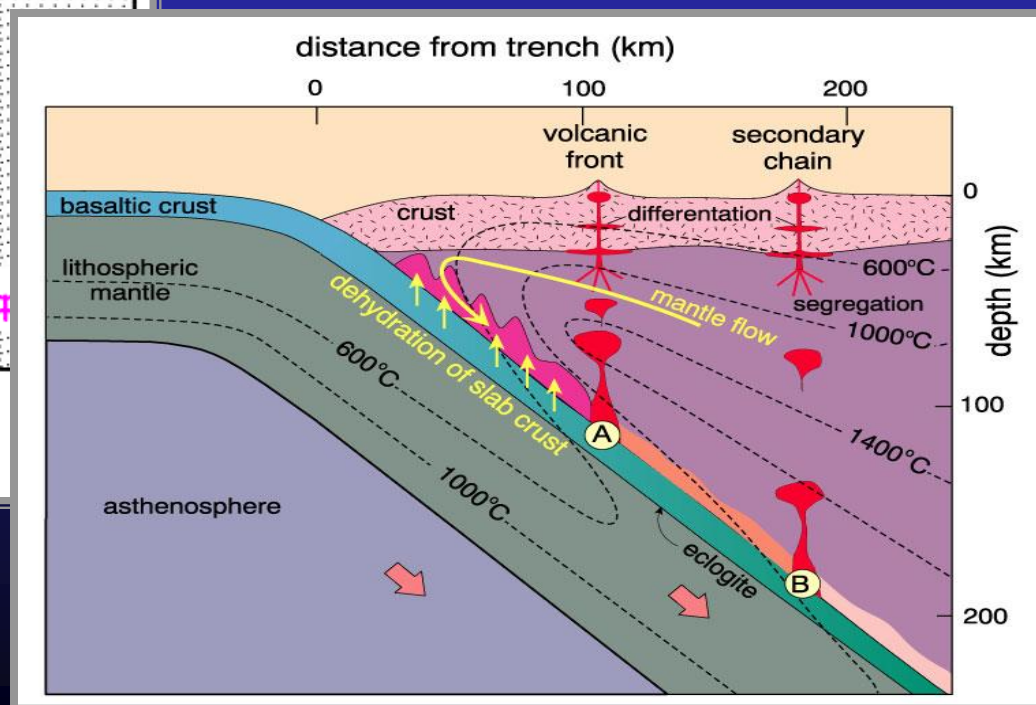
ОКСИДЫ	Алеутская дуга		Марианская дуга		Влк. Ключевской	
	Высоко- Mg	Высоко- Al	Высоко- Mg	Высоко- Al	Высоко- Mg	Высоко- Al
SiO_2	48.50	50.13	48.83	50.15	51.76	53.50
TiO_2	0.75	0.97	0.69	0.81	0.86	1.09
Al_2O_3	14.83	19.34	15.21	19.34	13.86	18.26
FeO	9.54	9.03	9.75	9.34	8.83	8.67
MnO	0.17	0.17	0.24	0.16	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_2O	2.04	2.88	1.68	2.47	2.47	3.45
K_2O	0.65	0.71	0.58	0.72	0.63	1.20
P_2O_5	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.



А – разложение амфибола,
В – разложение флогопита
(Tatsumi, 1989)

Присутствие летучих как главный фактор магмообразования

Именно поступление “летучих” компоненты из океанической плиты способствует зарождению долгоживущих областей плавления мантийного клина.

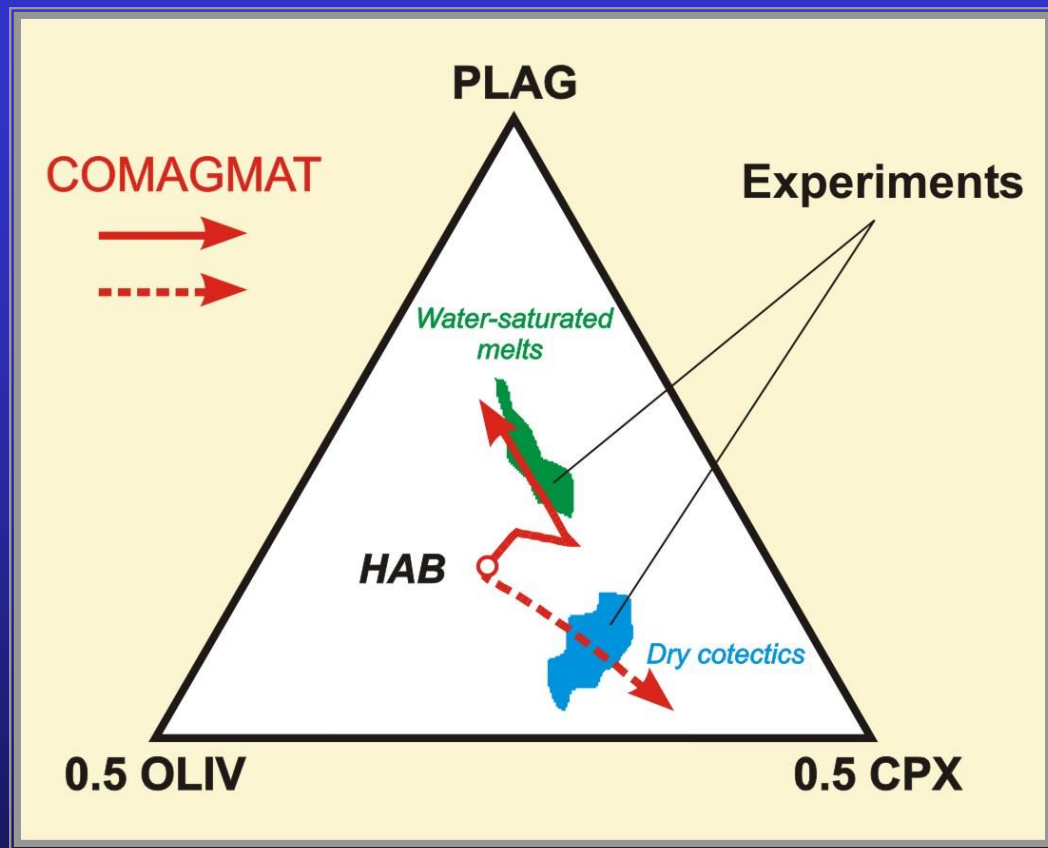
В пределах этих зон идет генерация первичных магм высоко-Mg базальтов, **последующее фракционирование которых приводит к образованию дифференциатов высокоглиноземистого состава.**

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 фенокристы и микровключения высоко-Mg оливинов, пироксенов и Cr-шпинели, а также геохимические соотношения малоподвижных элементов (РЗЭ) и изотопная систематика пород.

Роль воды в образовании высоко-Al магм

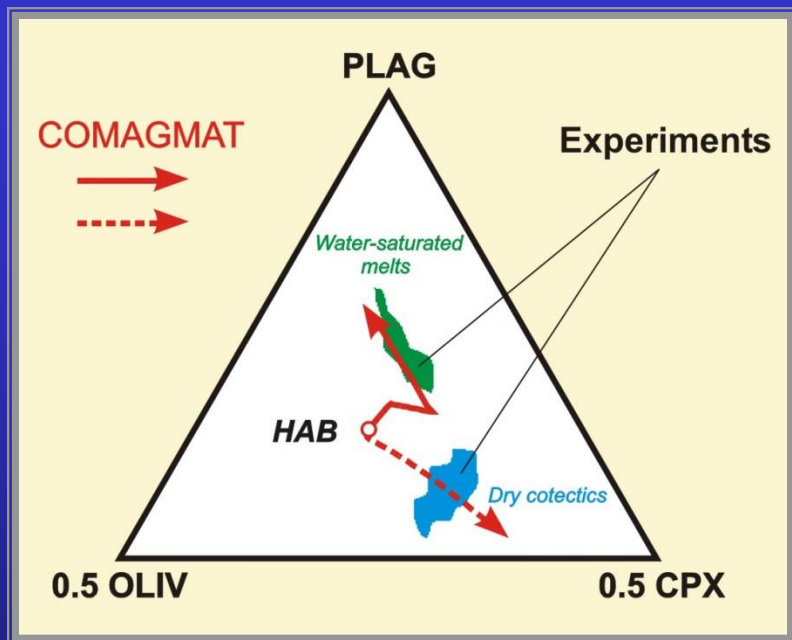


Проекция составов расплавов
на диаграмму OLIV-PLAG-CPX

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

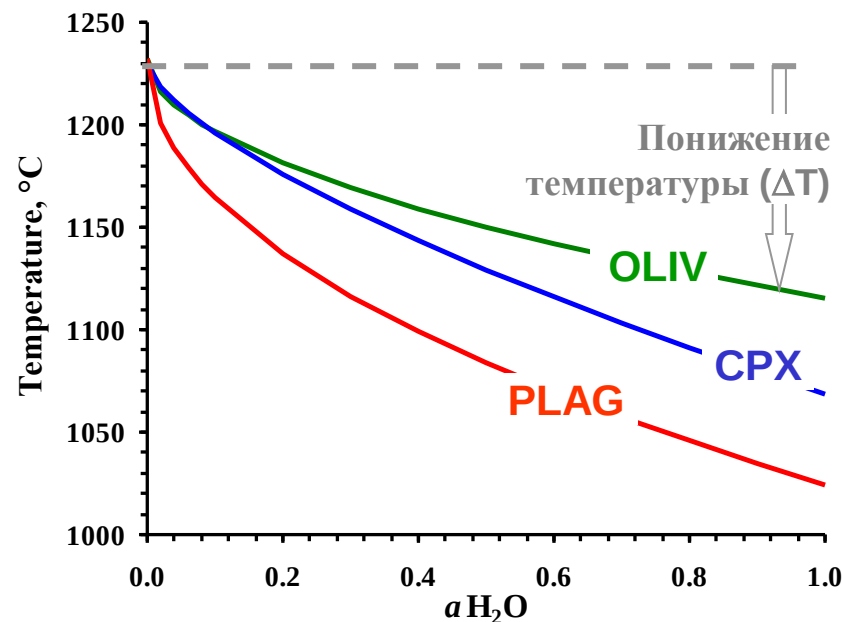
Эволюция “сухих” расплавов
приводит в поле обедненных
 Al_2O_3 котектик; “водный
тренд” направлен в область
высоко-Al и водонасыщенных
систем.

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.



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

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

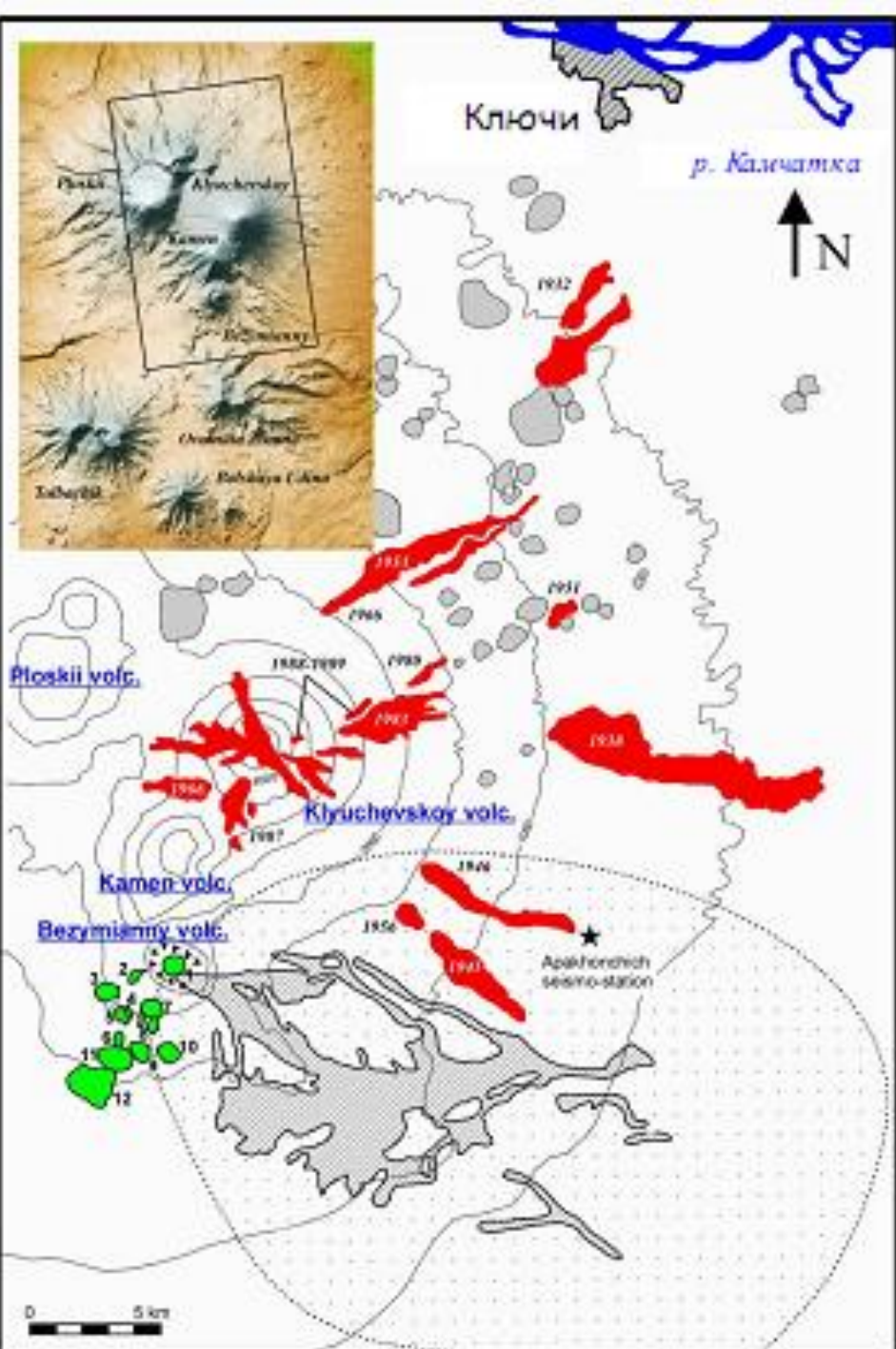
$$\Delta T^{PL} = 207 \cdot a_{H_2O}^{0.49}$$

a_{H_2O} рассчитана по модели Бернэма

Вулканы Ключевской, Безымянный и Камень

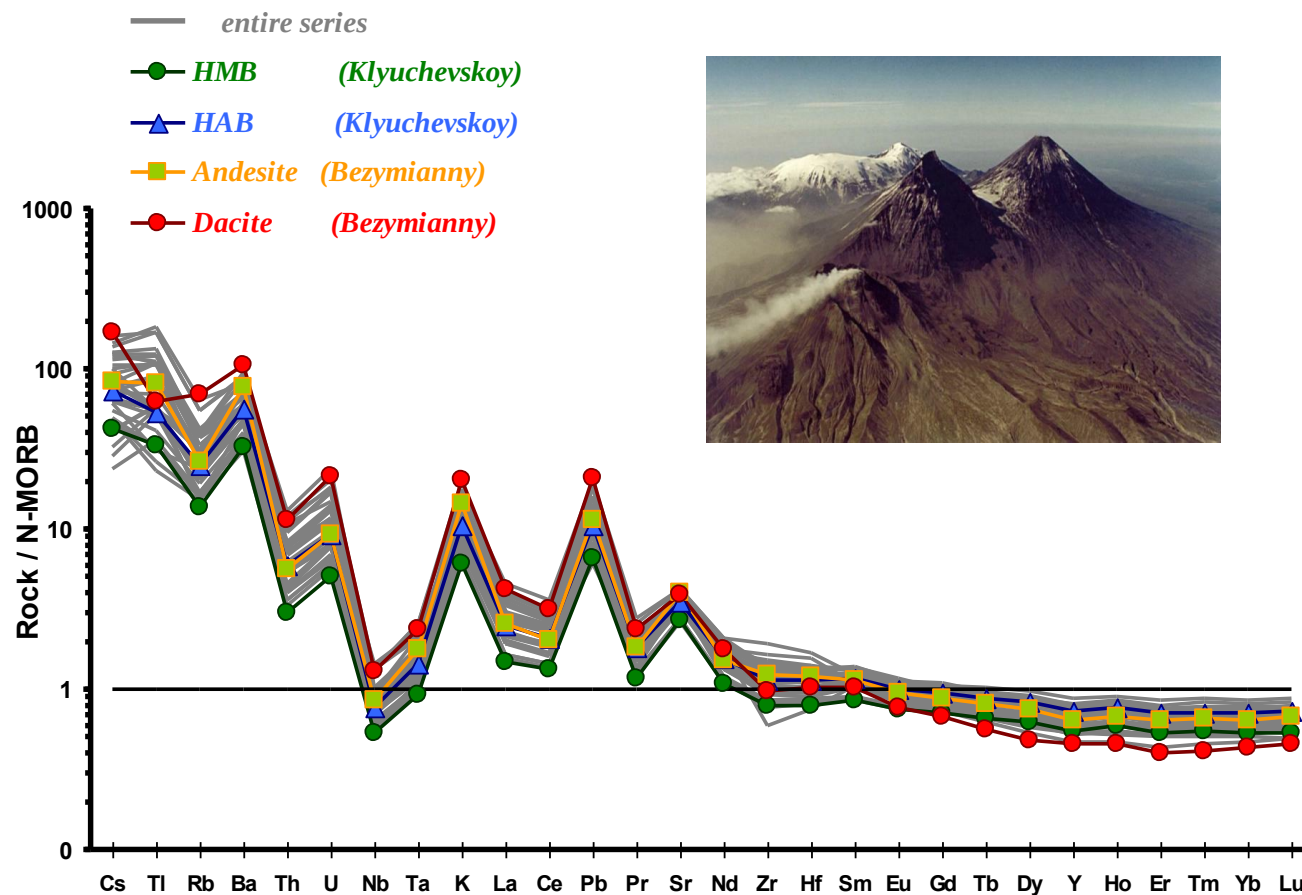


Схема извержений влк. Ключевской и Безымянный



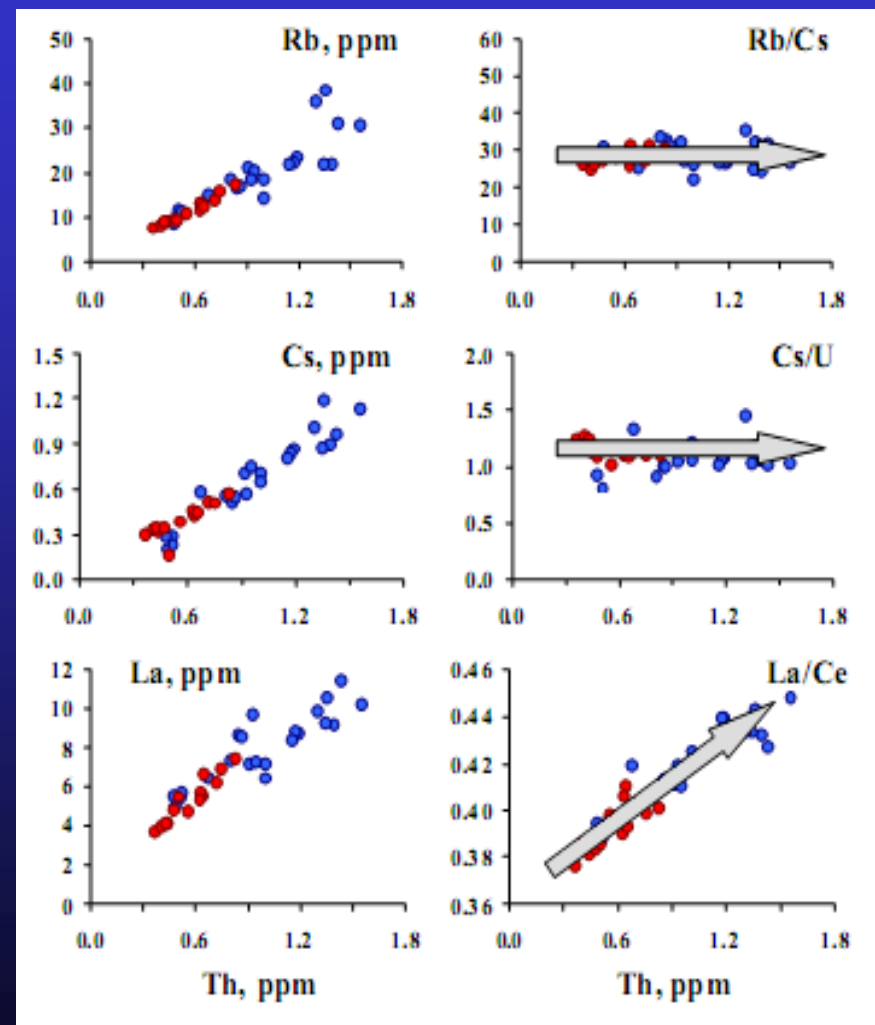
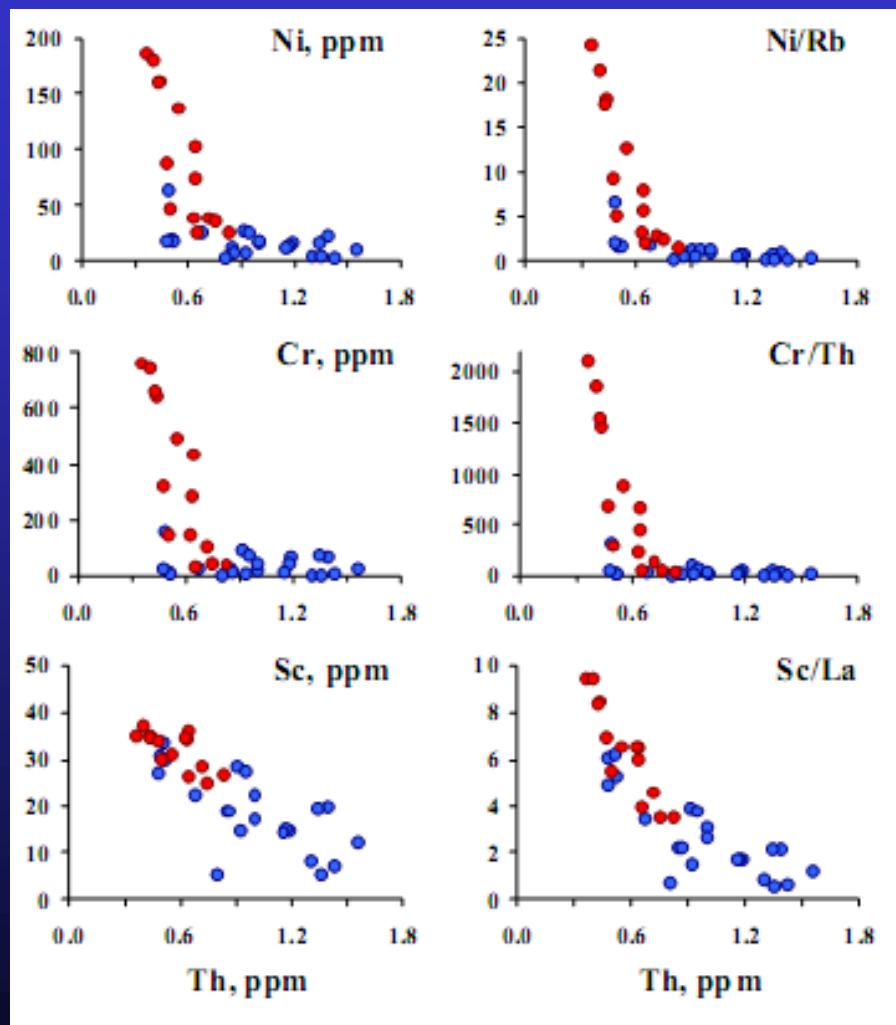
- 1 - кальдера влк. Безымянный, 2 - побочные прорывы,
- 3 - паразитические конуса, 4 - экструзивные купола,
- 5 - пирокластический поток 1956 г., 6 - отложения 1956 г.

СПАЙДЕРГРАММА БАЗАЛЬТОВ И АНДЕЗИТОВ ВУЛКАНОВ КЛЮЧЕВСКОЙ И БЕЗЫМЯННОЙ



Данные Р.Р. Альмеева (2005)

Примеры трендов фракционирования исходной магмы вулканов Ключевской и Безымянный

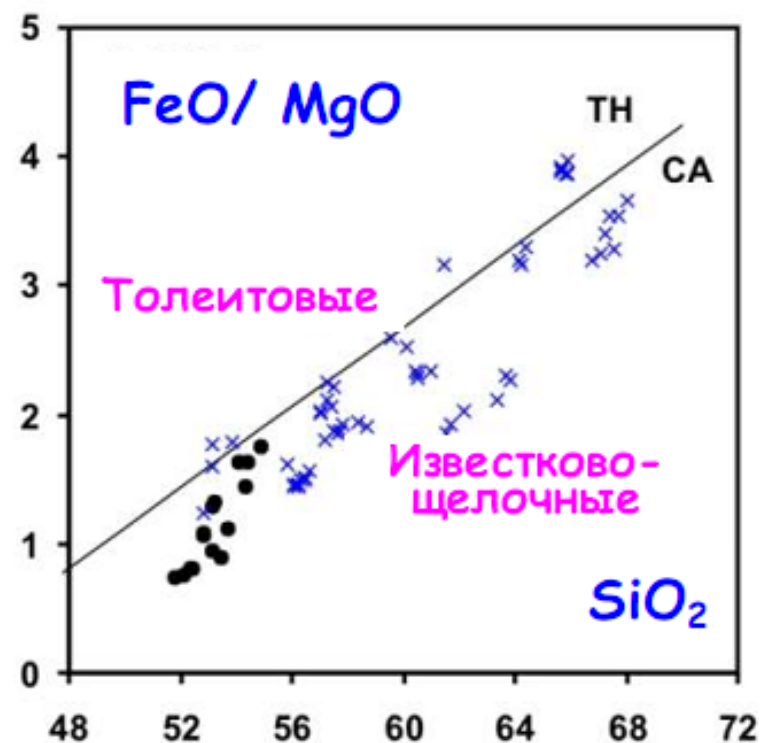
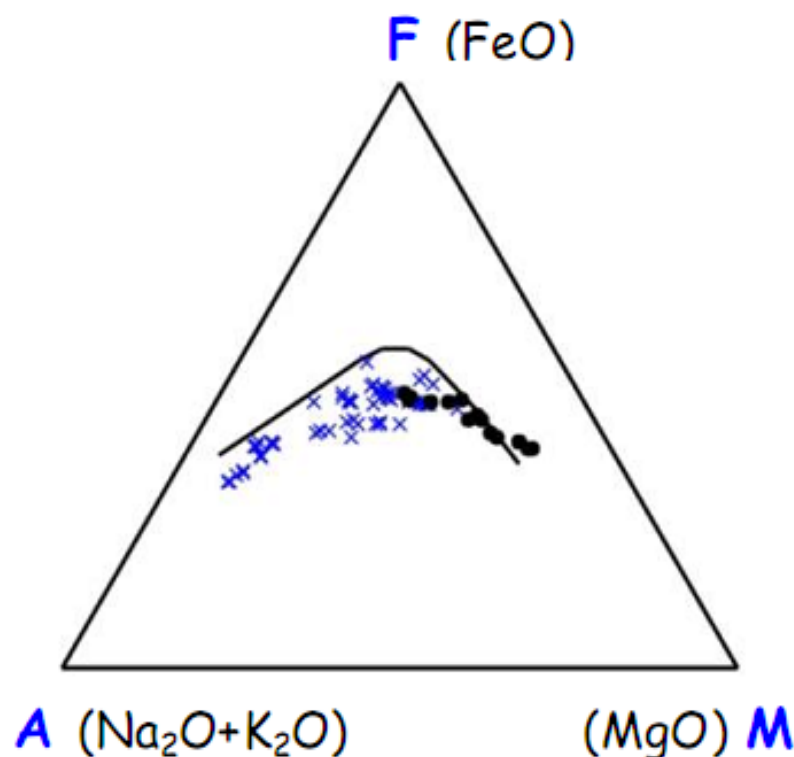


Соотношения совместных и несовместимых элементов

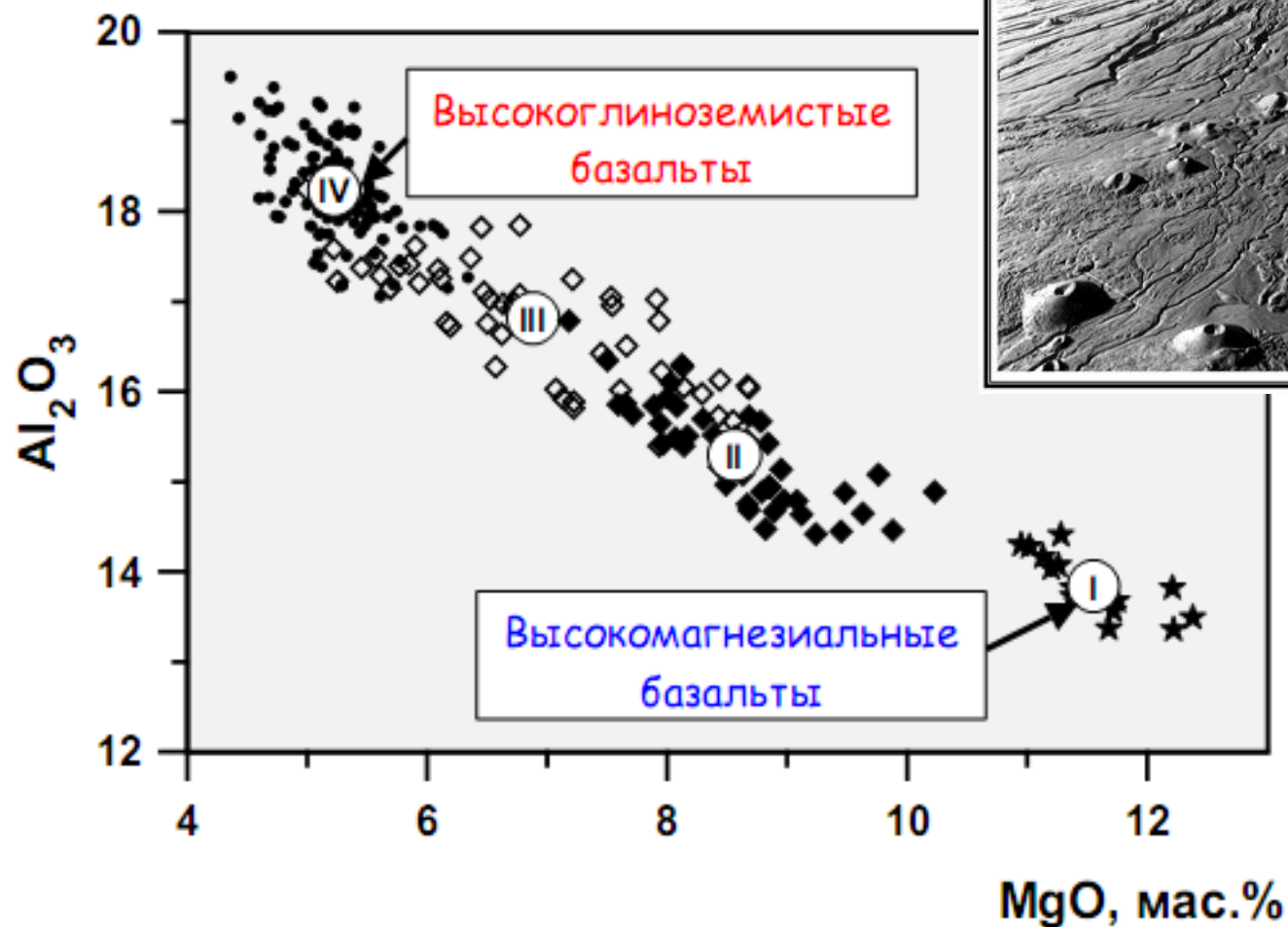
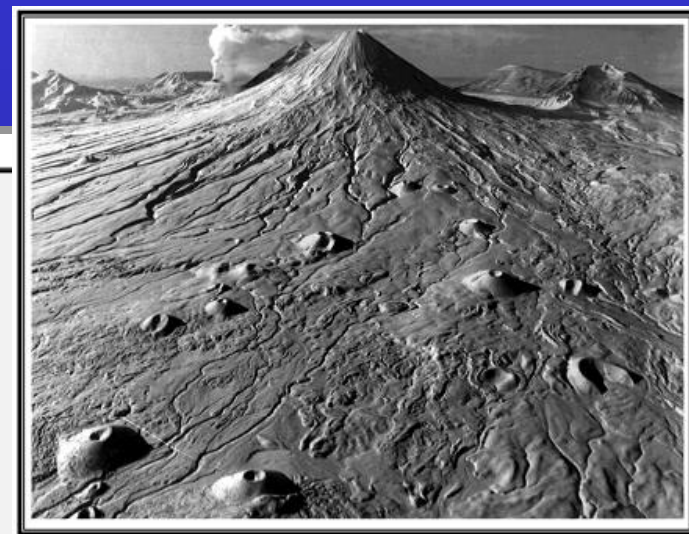
Несовместимые элементы и их отношения

Известково-щелочная серия вулканов Ключевской и Безымянный

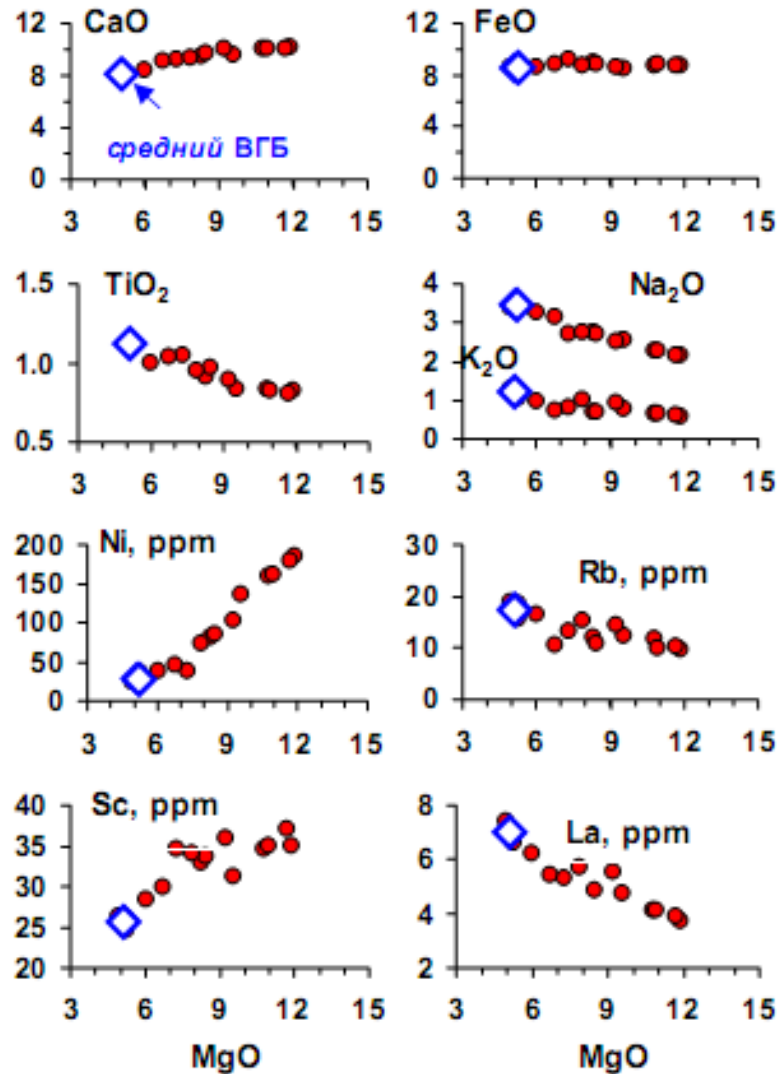
СОСТАВЫ ПОРОД ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНЫХ СЕРИЙ
НА ДИСКРИМИНАЦИОННЫХ ДИАГРАММАХ
(на примере лав вулканов Ключевской и Безымянный)



Эволюция содержаний MgO и Al_2O_3 в базальтах Ключевского вулкана

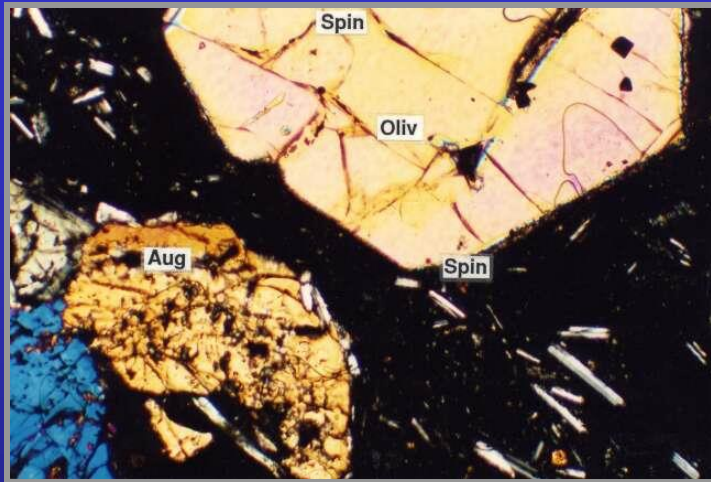


Химический и нормативный состав базальтов Ключевского вулкана

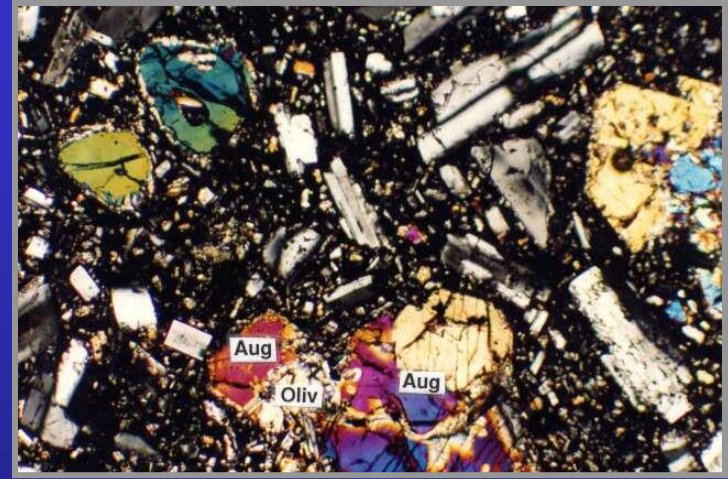


Тип	Высоко-Mg (I)	Магнези- альный (II)	Глинозе- мистый (III)	Высоко-Al (IV)
n	15	46	50	131
SiO ₂	51.76	53.39	53.22	53.50
TiO ₂	0.86	0.84	0.95	1.09
Al ₂ O ₃	13.86	15.29	16.79	18.26
FeO	8.83	8.52	8.83	8.67
MnO	0.17	0.17	0.17	0.16
MgO	11.55	8.58	6.89	5.24
CaO	9.73	9.41	8.91	8.22
Na ₂ O	2.47	2.72	3.11	3.45
K ₂ O	0.63	0.90	0.96	1.20
P ₂ O ₅	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

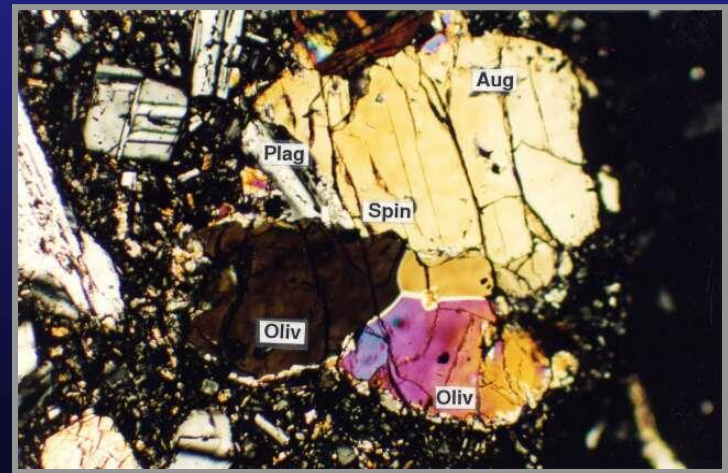
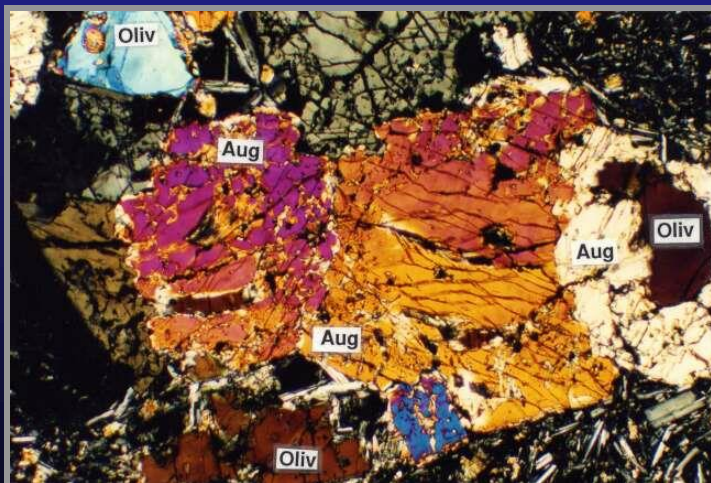
Структуры высоко-Mg и высоко-Al базальтов Ключевского вулкана



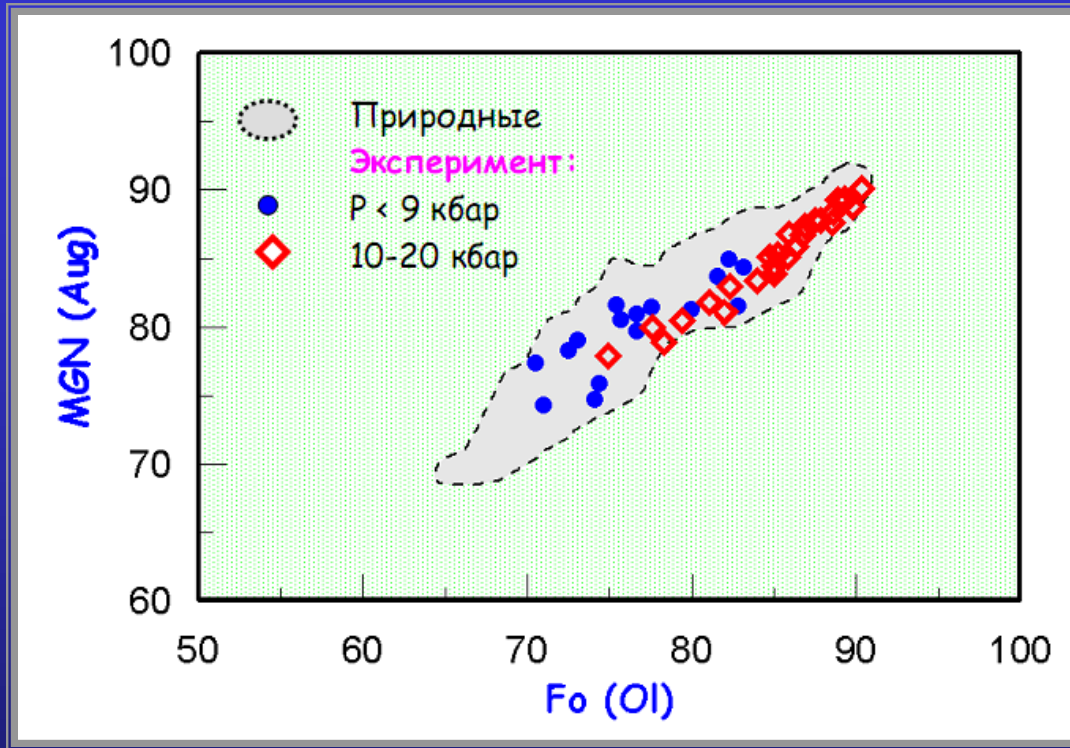
Высокомагнезиальные базальты



Высокоглиноземистые базальты

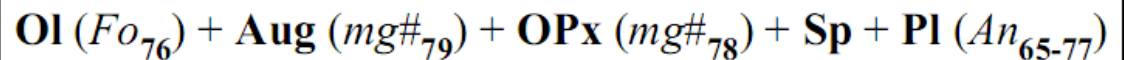
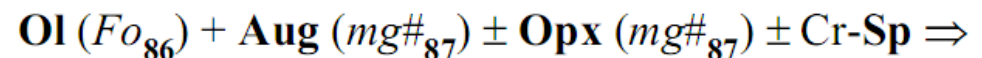
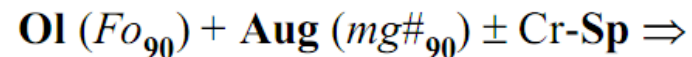


Эволюция составов породообразующих минералов

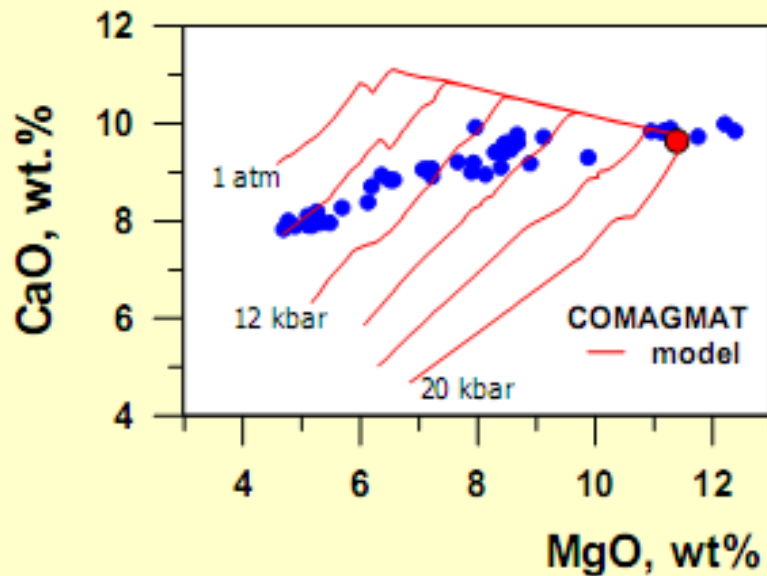
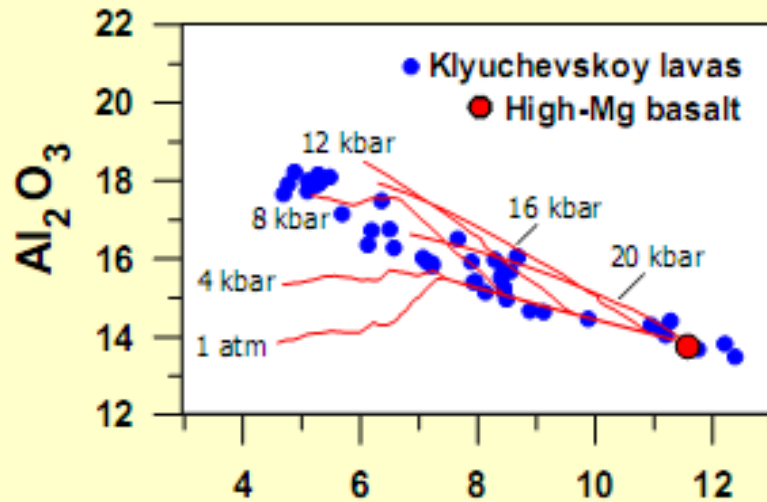


*Составы природных
и экспериментальных
Ol и Crx*

*Последовательность
кристаллизации
ключевских магм*

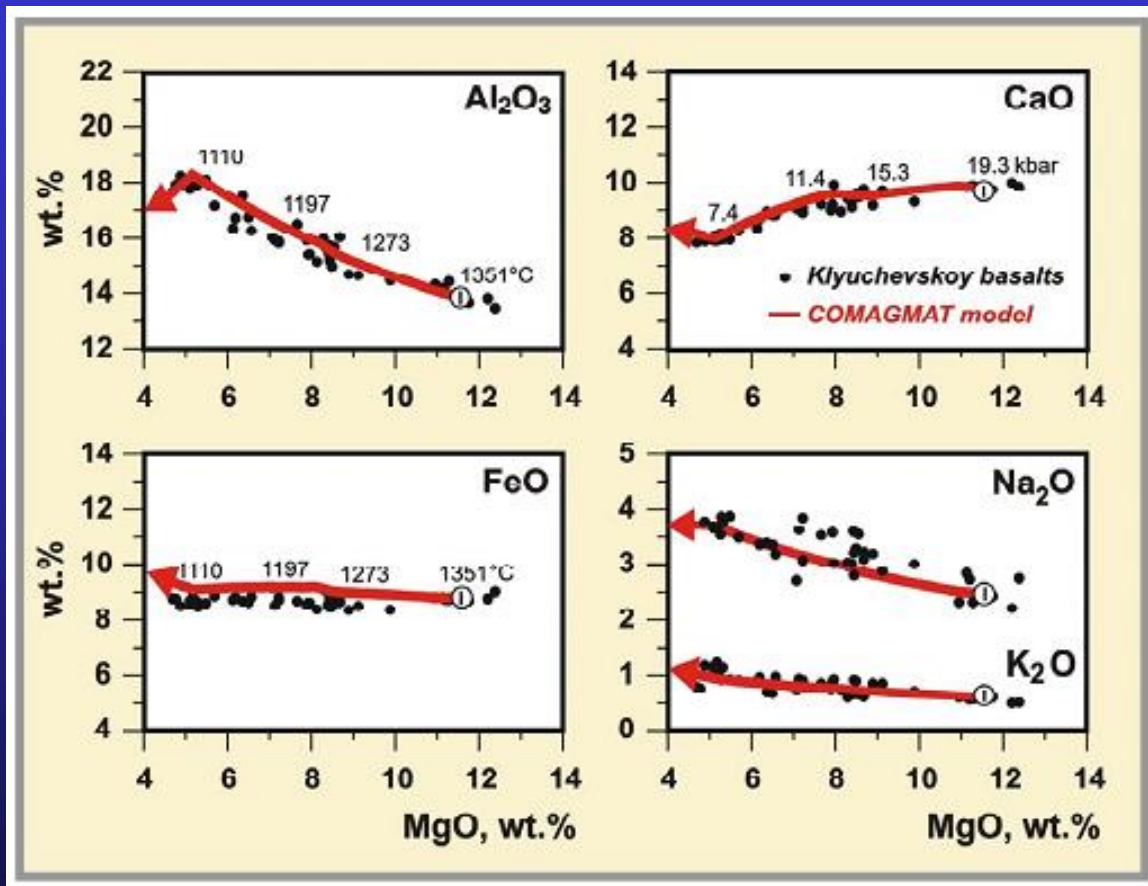


Численное моделирование изобарической фракционной кристаллизации расплава высоко-Мg базальта при разных давлениях



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

Оптимальная модель декомпрессионного фракционирования



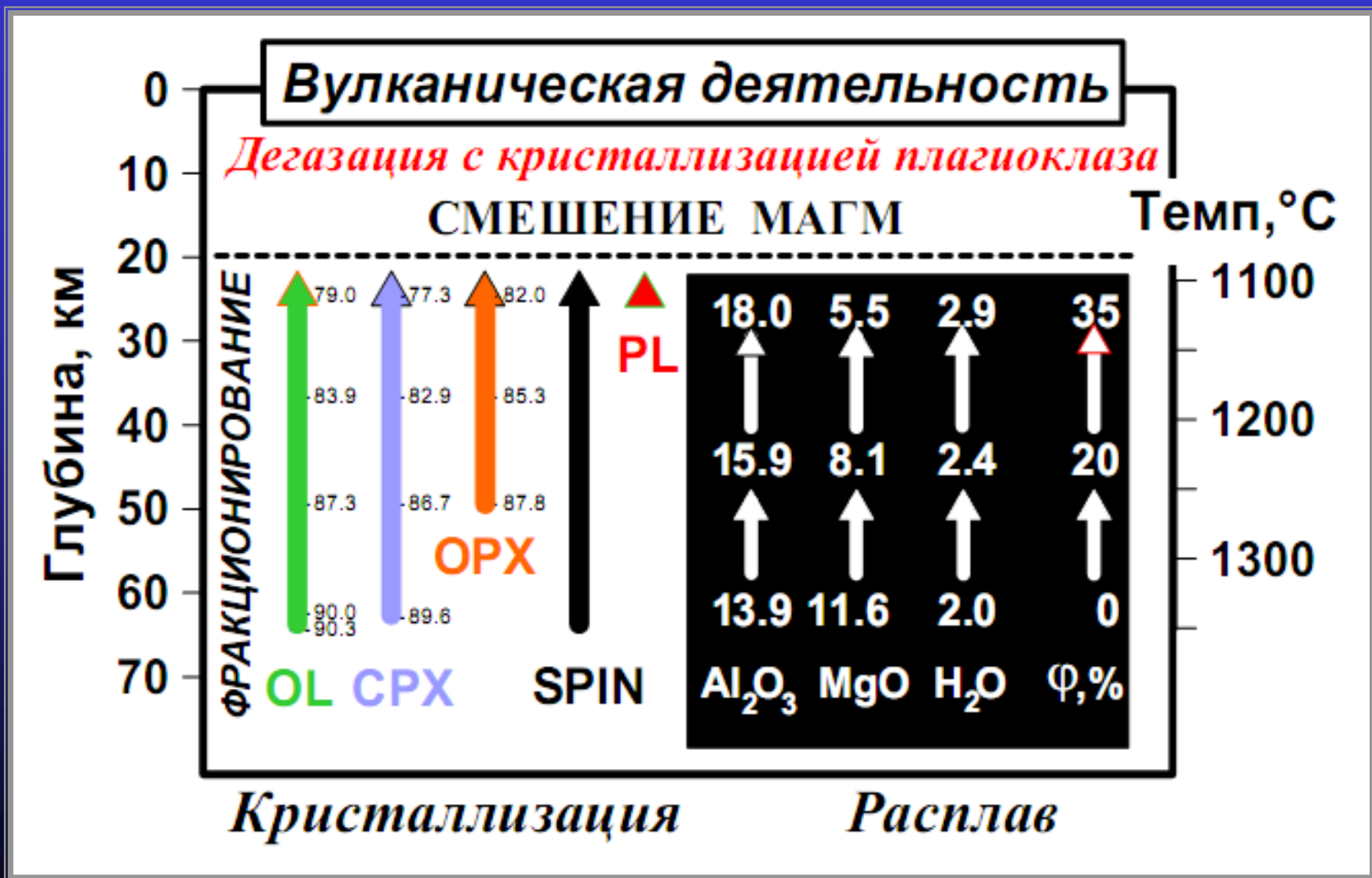
Переход высоко-Mg в высоко-Al базальты отвечает ~40% фракционированию ассоциации Ol-Aug-Sp в интервале давлений от 19 до 7 кбар.

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

Содержание воды в исходном расплаве составляло 2 мас. %.

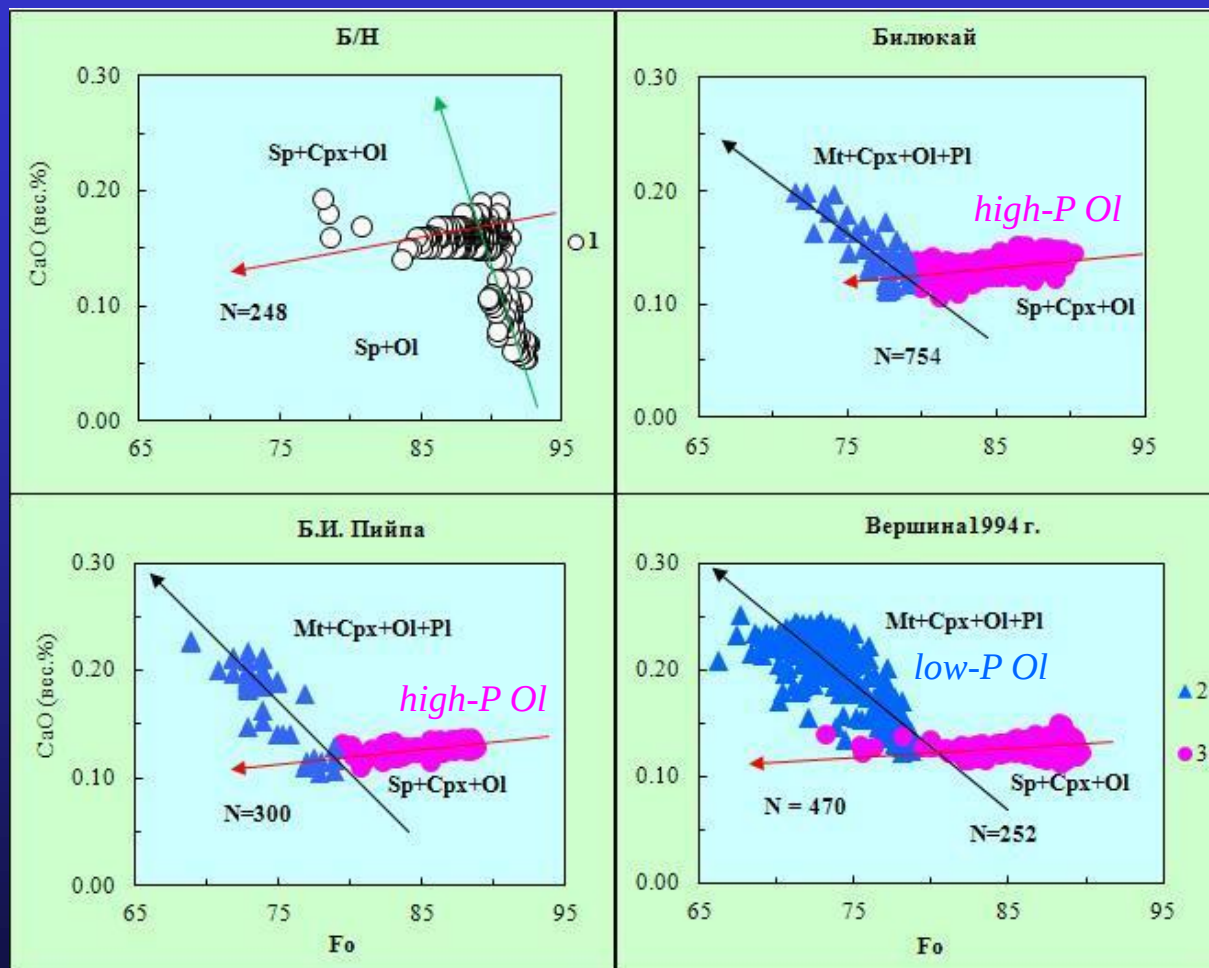
Накопление воды в расплаве по мере кристаллизации привело к значительной задержке кристаллизации Pl и образованию высокоглиноземистых дифференциатов, содержащих > 18 мас. % Al₂O₃

Схема химической и фазовой эволюции магматизма Ключевского вулкана (Озеров и др., 1996)



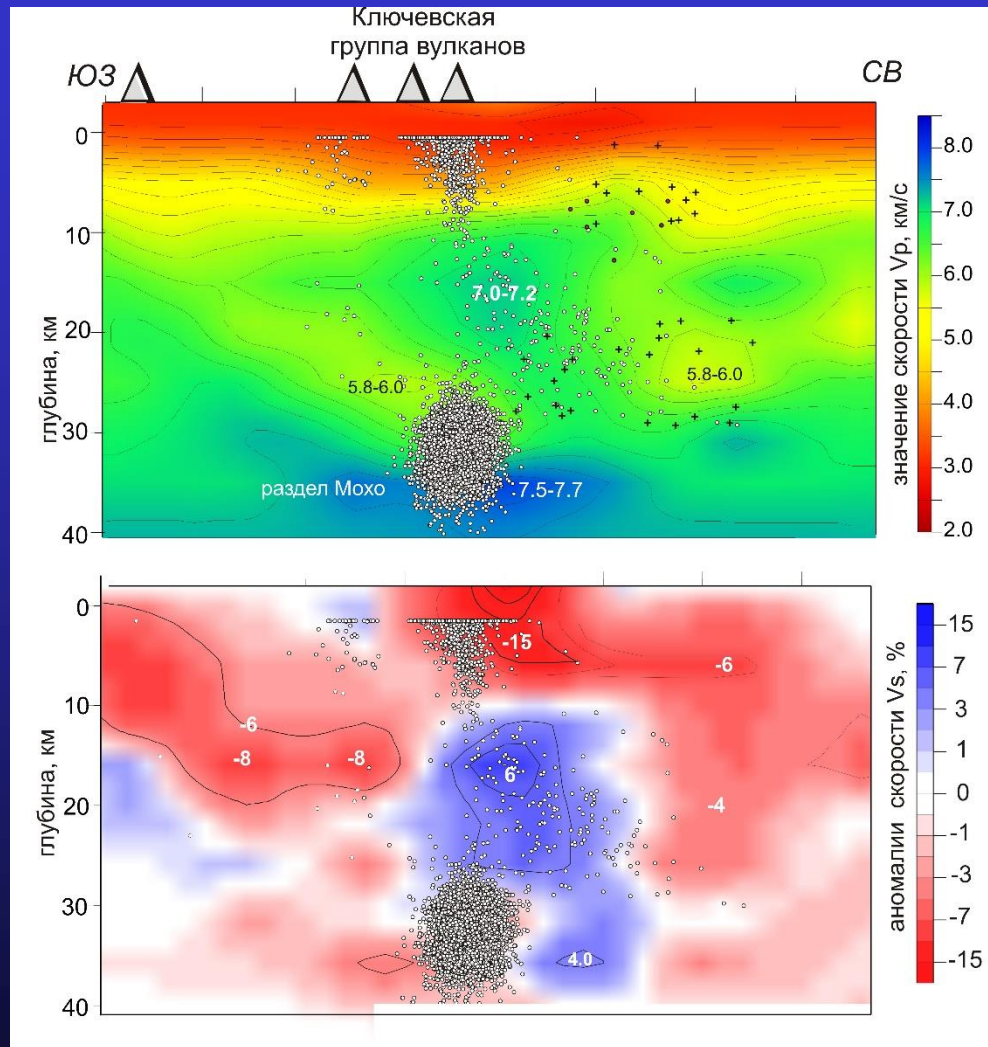
Са в ключевских оливинах – как свидетельство полибарического фракционирования !?

- Исследовано несколько тысяч составов ОI и Срх из магнезиальных и высоко-АI базальтов влк. Ключевской.
- Бимодальность распределения СаО в ОI указывает 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.



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

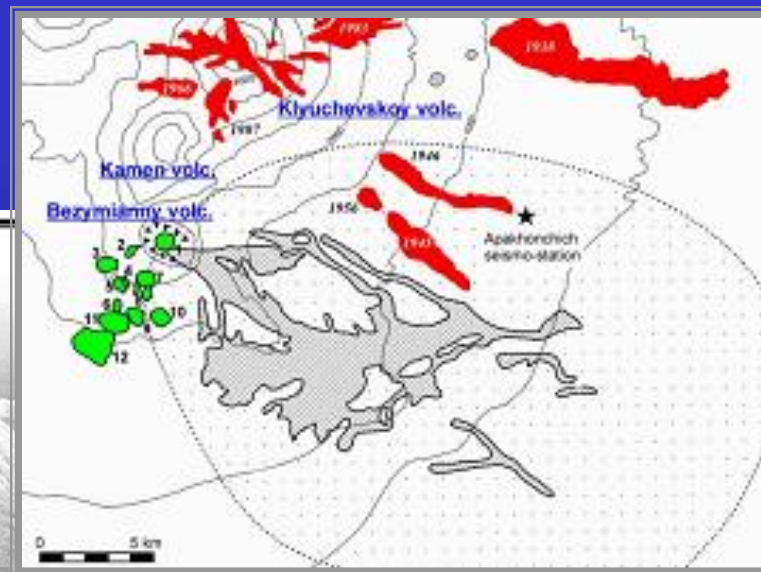
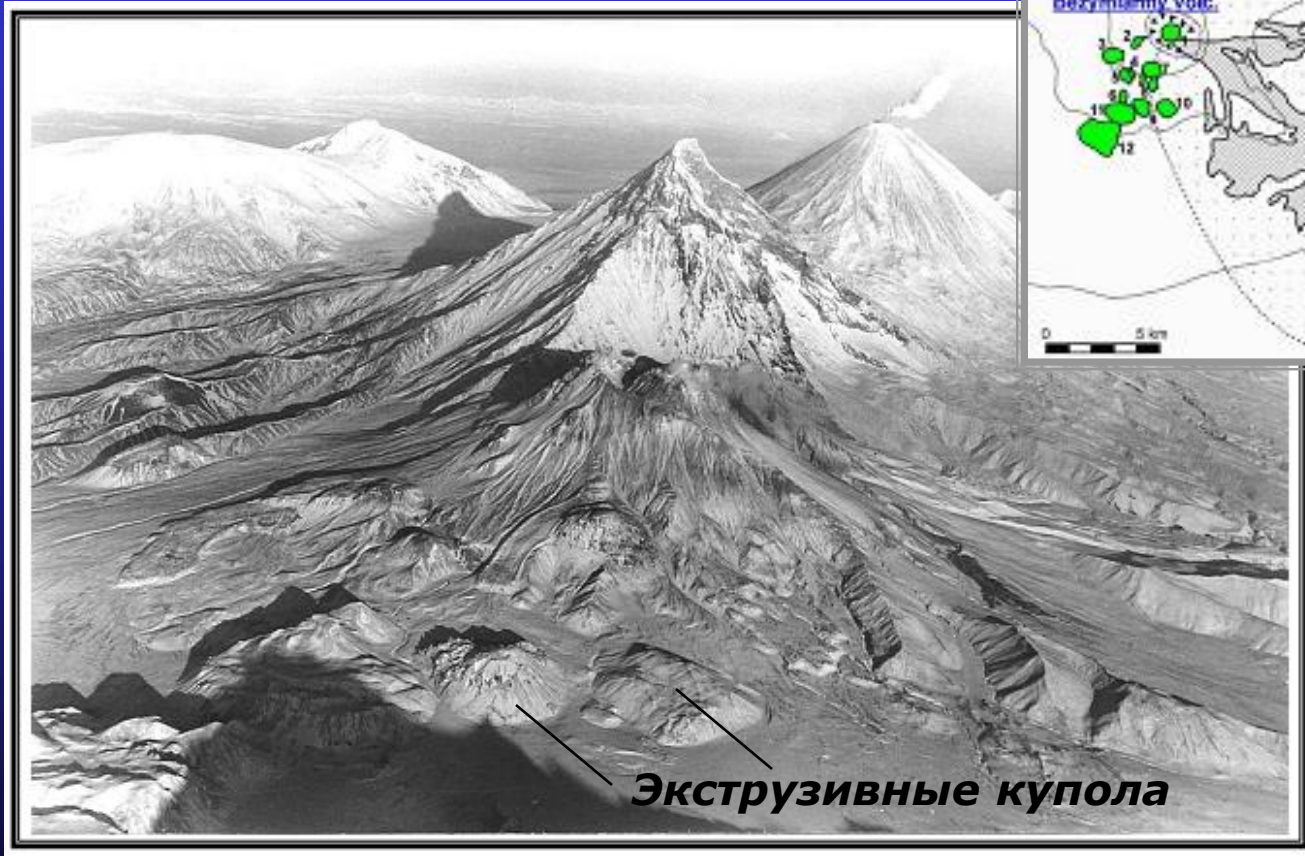
Вертикальный разрез земной коры в аномалиях V_p и V_s под Ключевской группой вулканов



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

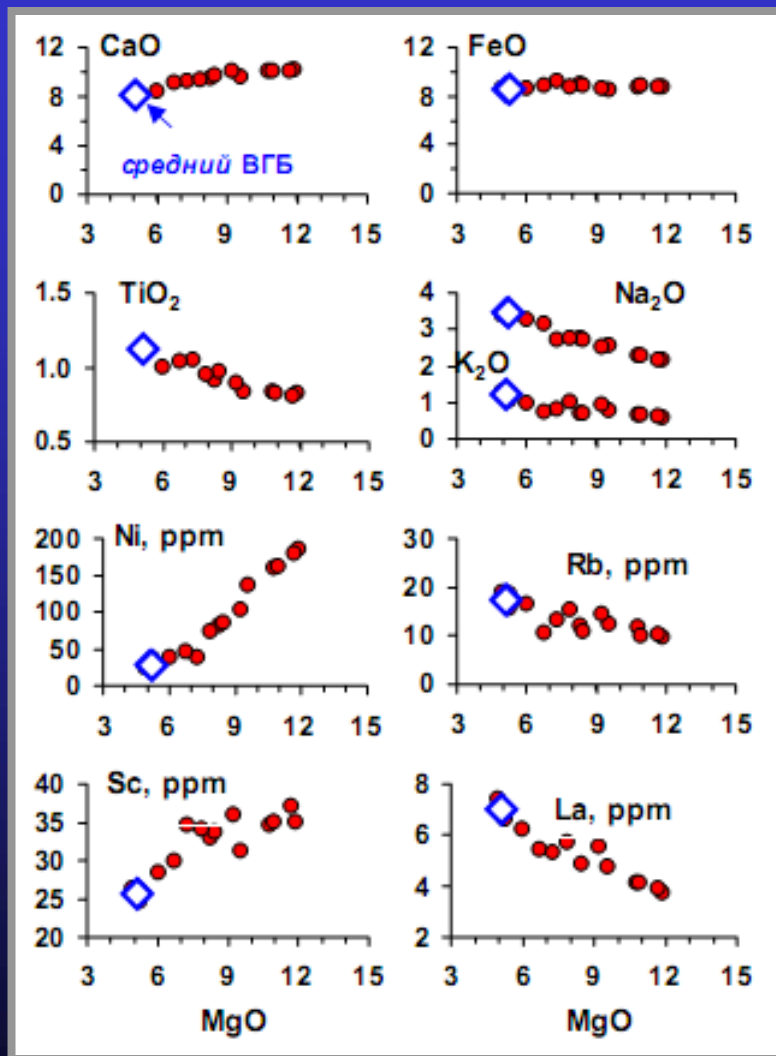
С.А. Хубуня, Л.И. Гонтовая, А.В. Соболев, В.С. Хубуня «К вопросу о магматических очагах под вулканом Ключевской (Камчатка). Вулканология и сейсмология, № 2, 2018 г.

Эволюция магматизма вулкана Безымянный

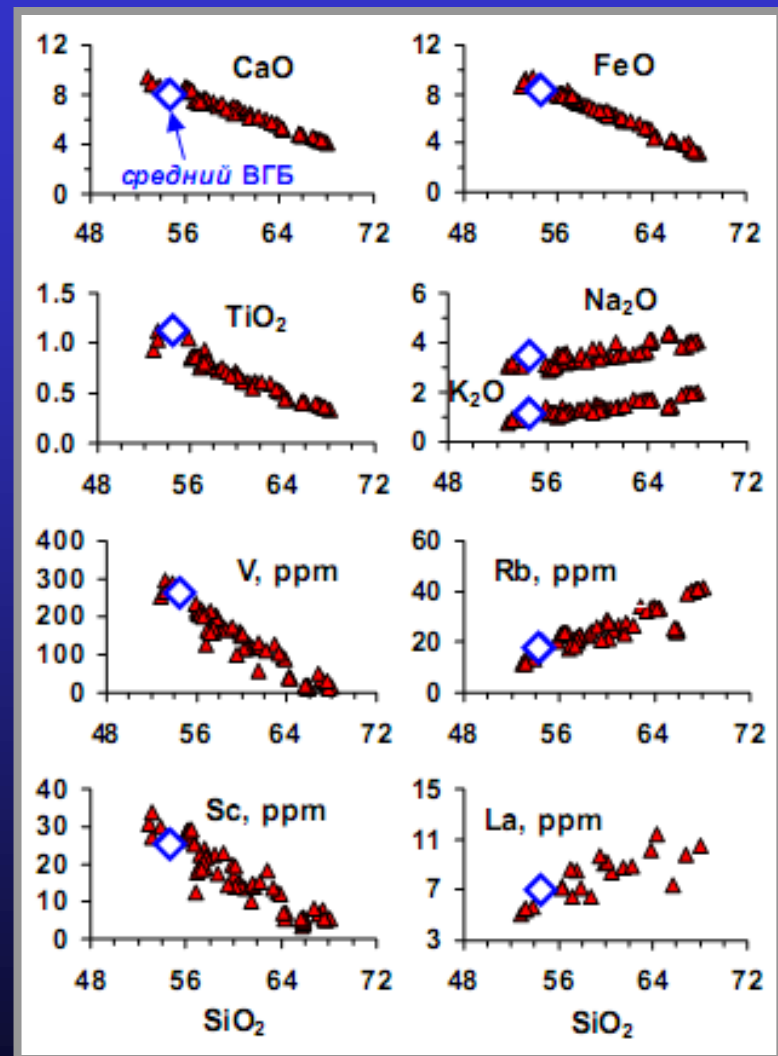


Общий вид вулкана Безымянный

Вариации химического состава базальтов Ключевского и лав вулкана Безымянный

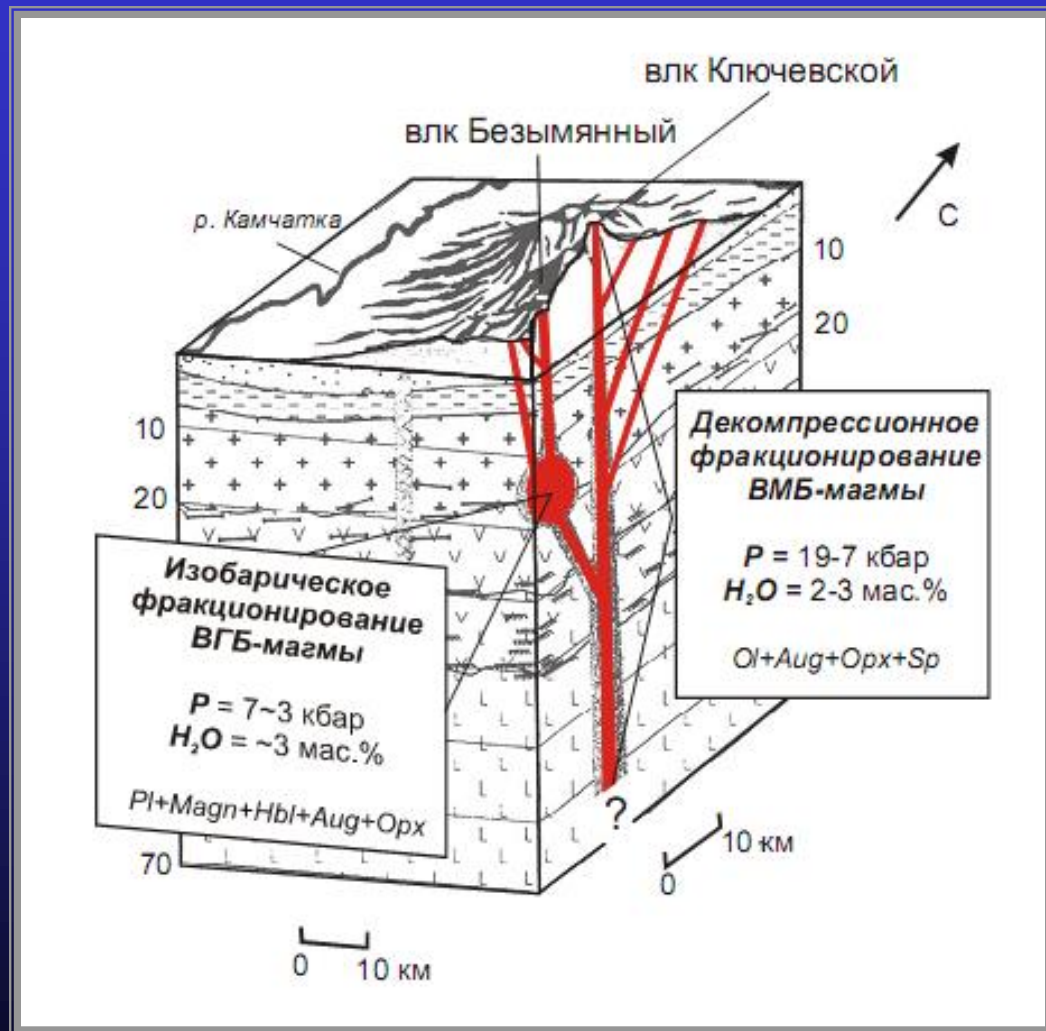


Влк. Ключевской



Влк. Безымянный

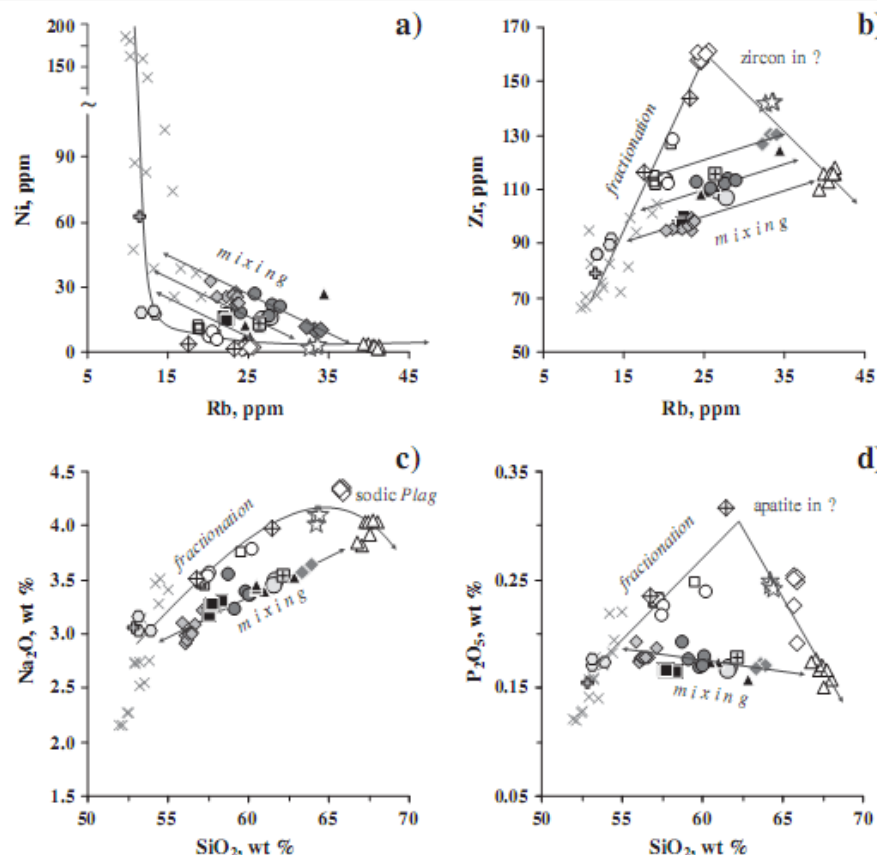
Гипотетическая схема питания вулканов Ключевской и Безымянный



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

По Озерову и Альмееву
с дополнениями (1995)

Вариации химического состава вулканитов Ключевского Безымянного – признаки смешения



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Volcanology and Geothermal Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jvolgeores



Decoding crystal fractionation in calc-alkaline magmas from the Bezymianny Volcano (Kamchatka, Russia) using mineral and bulk rock compositions

Renat R. Almeev ^{a,*}, Jun-Ichi Kimura ^b, Alexei A. Ariskin ^c, Alexey Yu. Ozerov ^d

× HMBs-HABs, Kлючевskoi

◆ basalt, Kamen

× HMBs-HABs, Kлючевskoi

◆ basalt, Kamen

pre-Bezymianny (>10-11 ky)

Bezymianny (<4.7 ky)

- Plotina Dome
- Stupenchaty Dome
- ◆ Dvuglavy Dome
- ◇ Pravilny and Gladkii Domes
- △ Raschlenenny Dome

- B-I
- ◆ LF-II
- ▣ Greben Dome
- ☆ Treugolny Zub Dome
- Expedition Dome
- basaltic andesites

- B-II
- LF-IV
- ◆ Lokhnaty Dome
- B-III
- PF-1997
- ▲ LF-VI

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)

ВКЛЮЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД В ВУЛКАНИТАХ КУРИЛО- КАМЧАТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

Гомеогенные (родственные) включения

По составу делятся на:

- **алливалиты-эвкриты** - в низкокалиевых толеитах

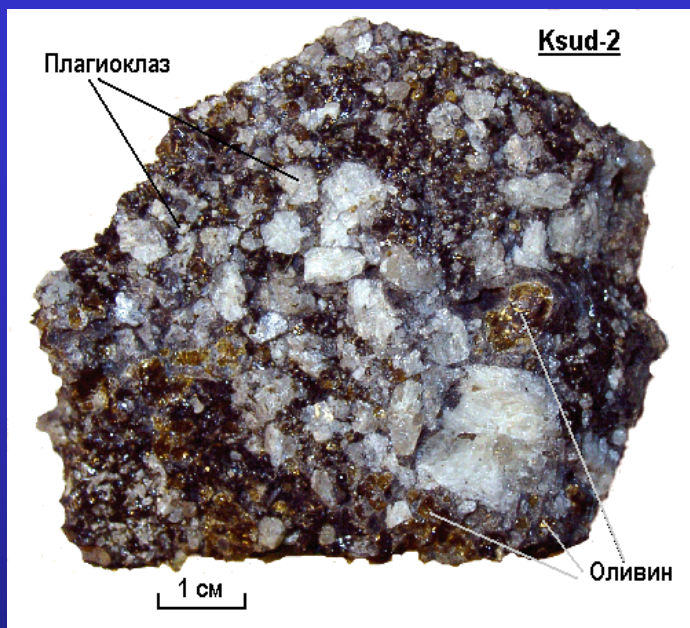


- **верлит-кортландит-пироксенит-габбро** - ИЩ и СЩ



Причины различий - разница в P_{H_2O}

Гомеогенные (родственные) включения



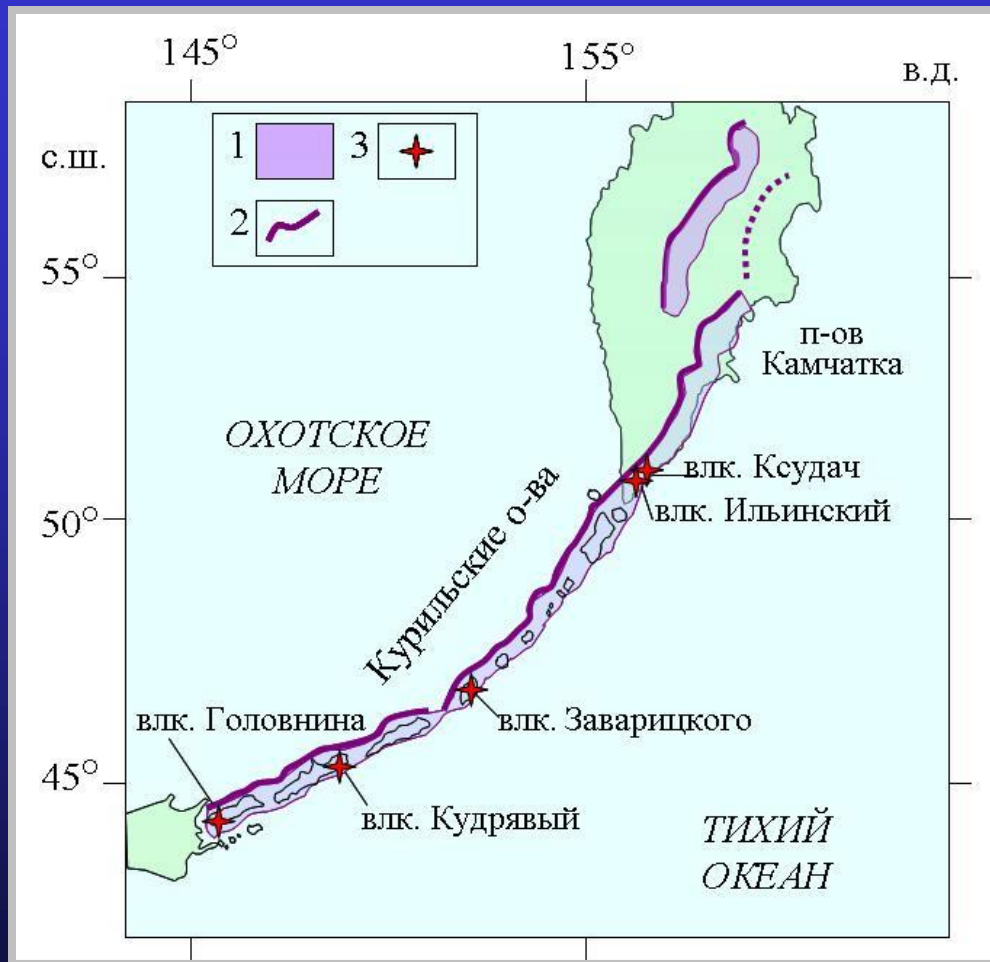
Алливалит, Камчатка



Алливалит, о.Рам

- **Алливалиты** – оливин – анортитовые крупнозернистые породы, обнаруженные в виде включений в изверженных породах многих вулканов Камчатки
- Название предложено Заварицким по аналогии с оливин-плагинкласовой разновидностью троктолитов в основном расслоенном интрузиве на о. Рам (Шотландия) – по г. Халливал

Вулканы, на которых были обнаружены алливалиты



Алливалитовые включения на
влк. Желтовский (южная Камчатка)



Алливалит в игнимбрите
влк. Карымский (Камчатка)



Вулканы, на которых были обнаружены алливалиты



Ильинский (Камчатка)



Головнина (о. Кунашир)

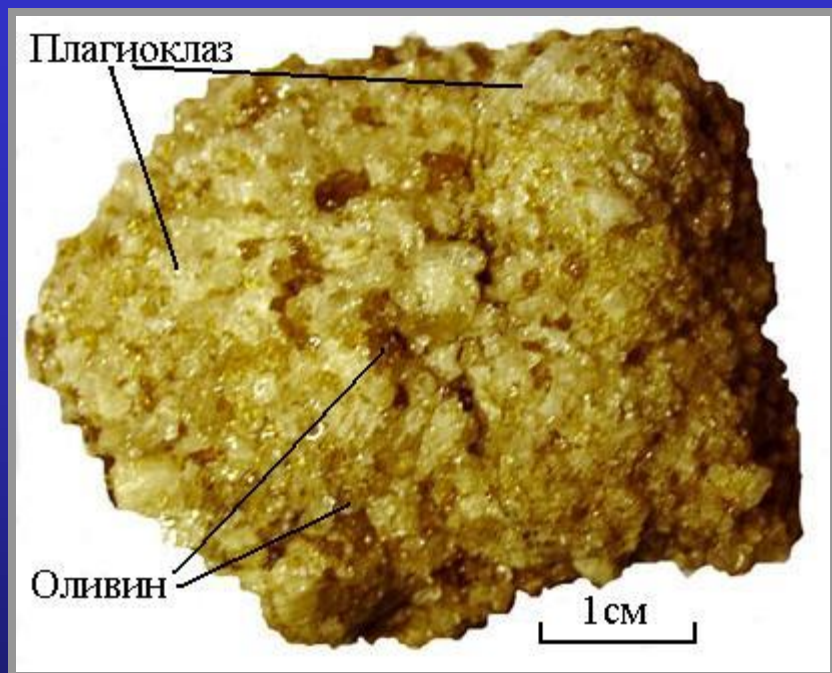


Ксудач (Камчатка)



Кудрявый (о. Итуруп)

Структурные особенности алливалитов

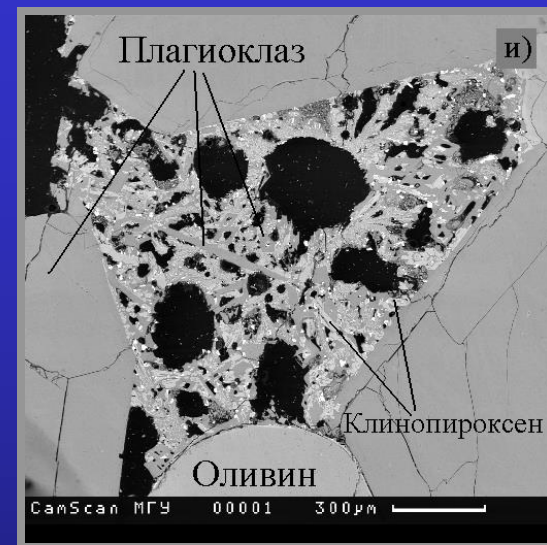
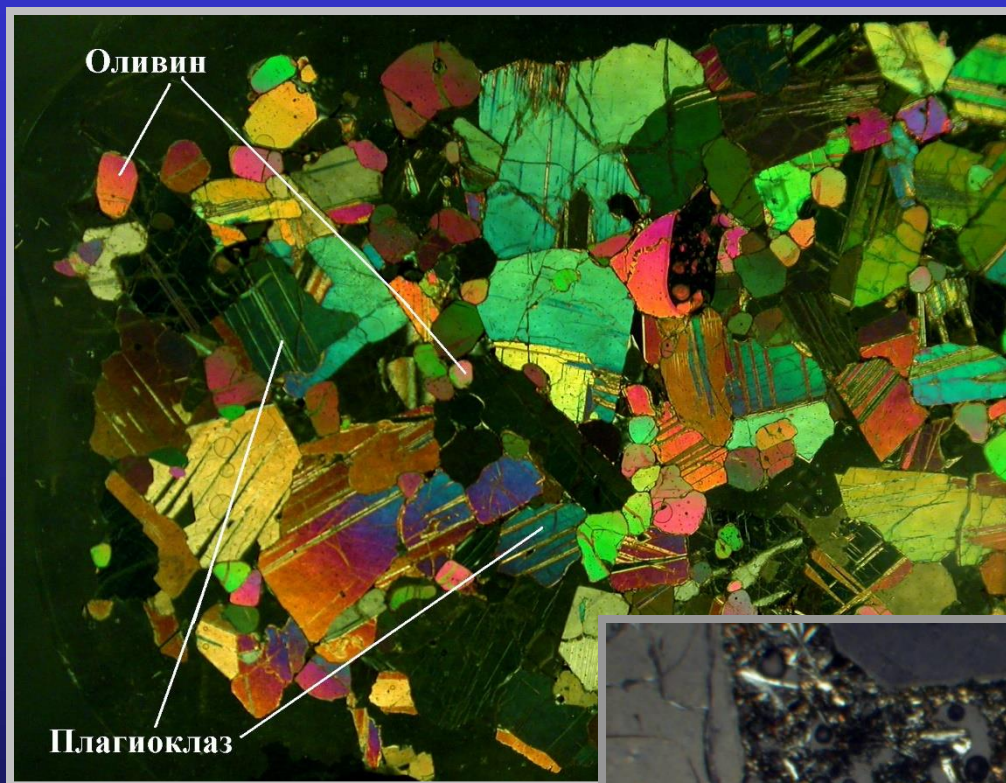


Oliv-Plag агрегат с кумулятивной структурой (образец с вулкана Ксудач)

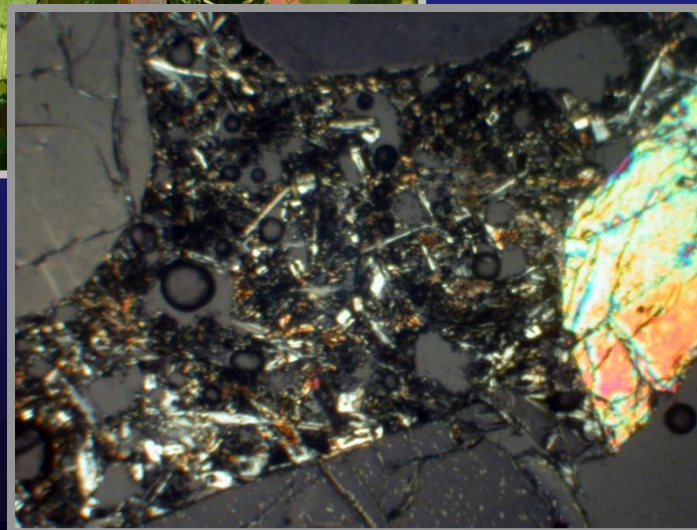


Oliv-Plag агрегат с порфировидной ккумулятивной структурой (образец с вулкана Ксудач)

Кумулятивный алливалит с вулкана Головнина



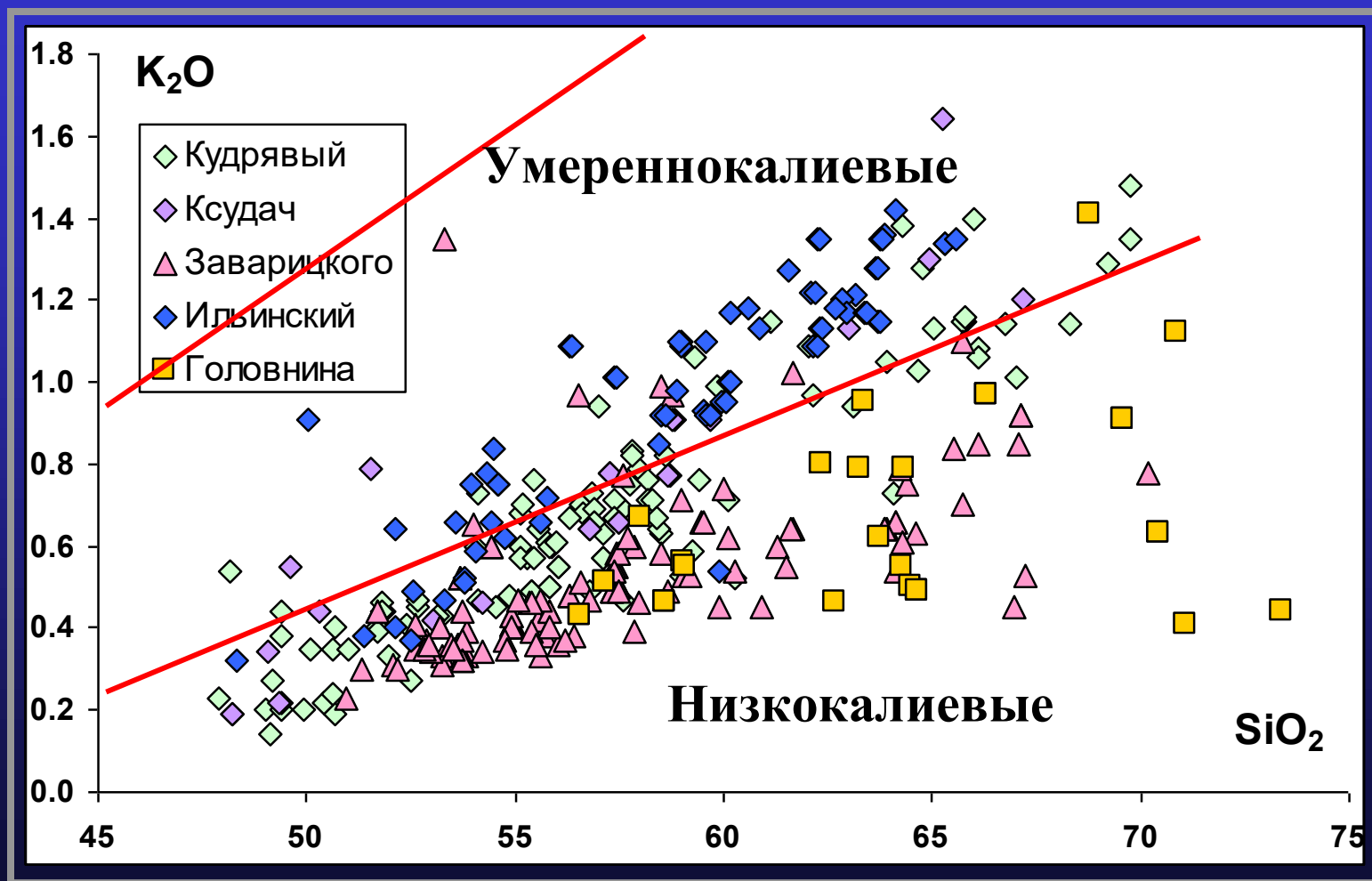
Адкумуляты?



Минеральный состав алливалитов:

- Плаггиоклаз (An_{89-97}) – от 50 до 100%
- Оливин (Fo_{69-81}) – от 10 до 40%
- Клинопироксен до 10%
- Ортопироксен – менее 1%
- Титано-магнетит – до 5%
- Хромшпинелид – менее 1%
- Раскристаллизованное вулканическое стекло – 5-10%

Химический состав алливалитов



ТОЛЕИТ-БАЗАЛЬТОВЫЕ СЕРИИ ВОСТОЧНОЙ СЕРИЙ КАМЧАТКИ