

ГЕОХИМИЯ МАГМАТИЗМА ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ: ПРИЗНАКИ МАНТИЙНОГО ИСТОЧНИКА И УСЛОВИЯ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ИСХОДНОЙ МАГМЫ

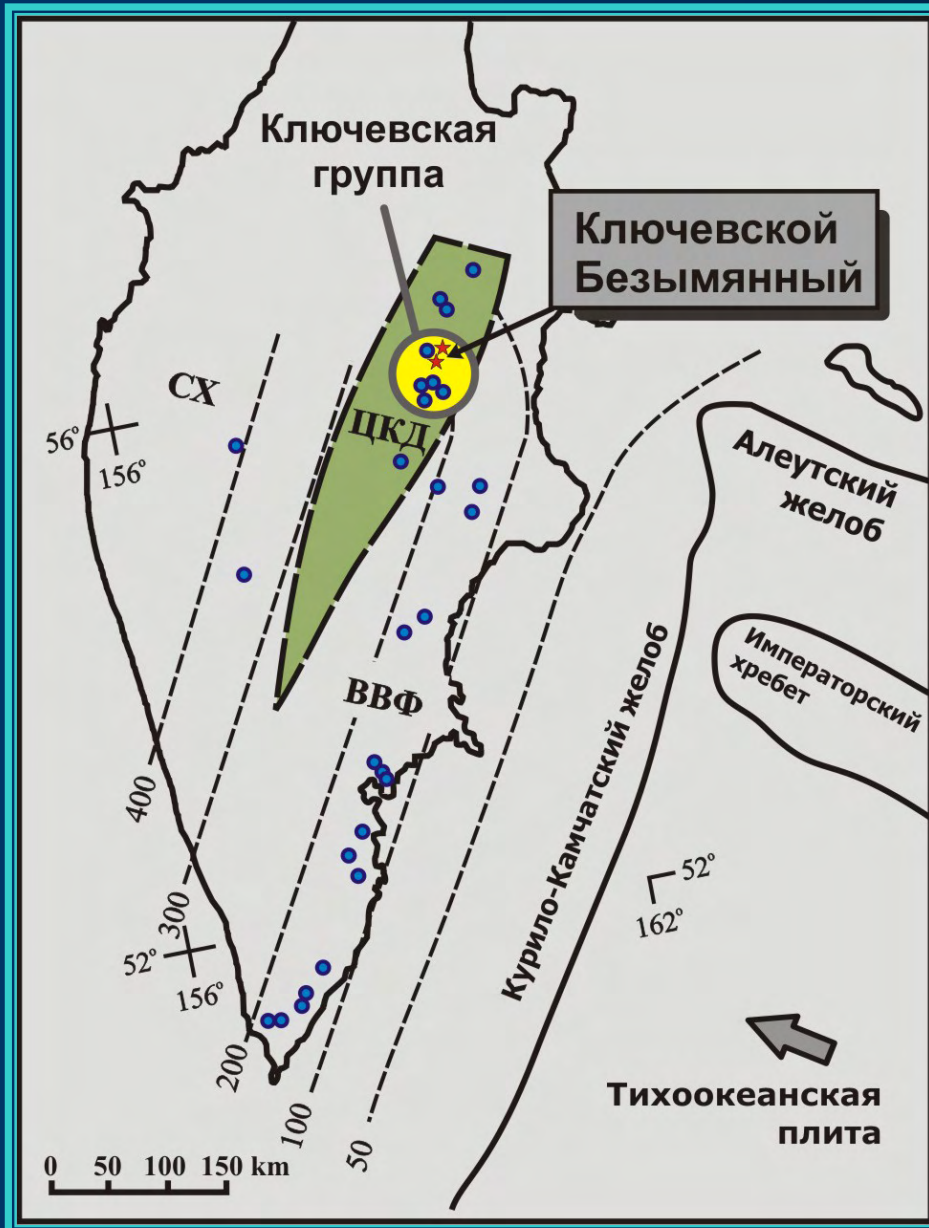
Р.Р. АЛЬМЕЕВ

*(Лаборатория термодинамики и математического моделирования
природных процессов ГЕОХИ РАН)*

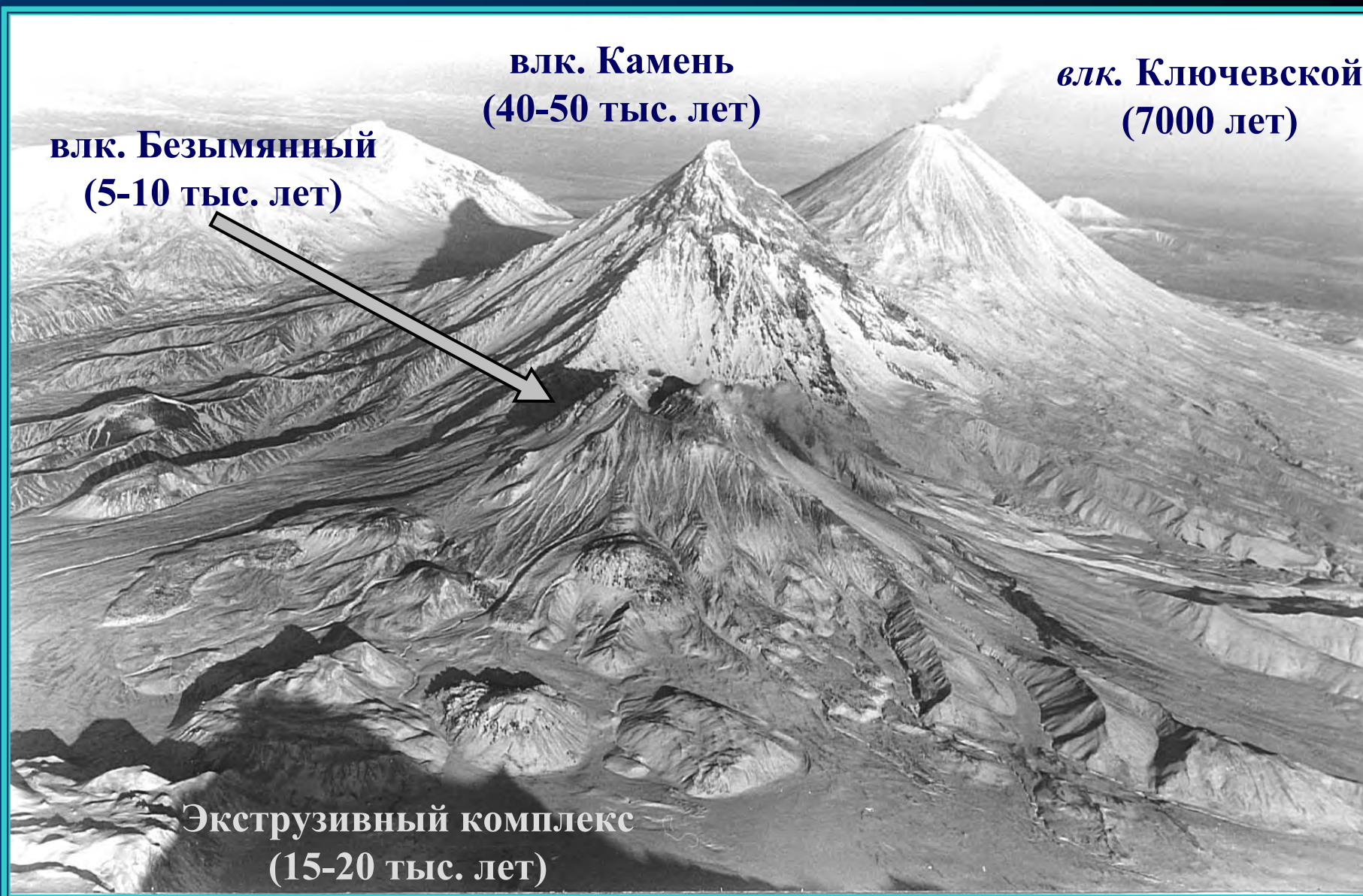


2005

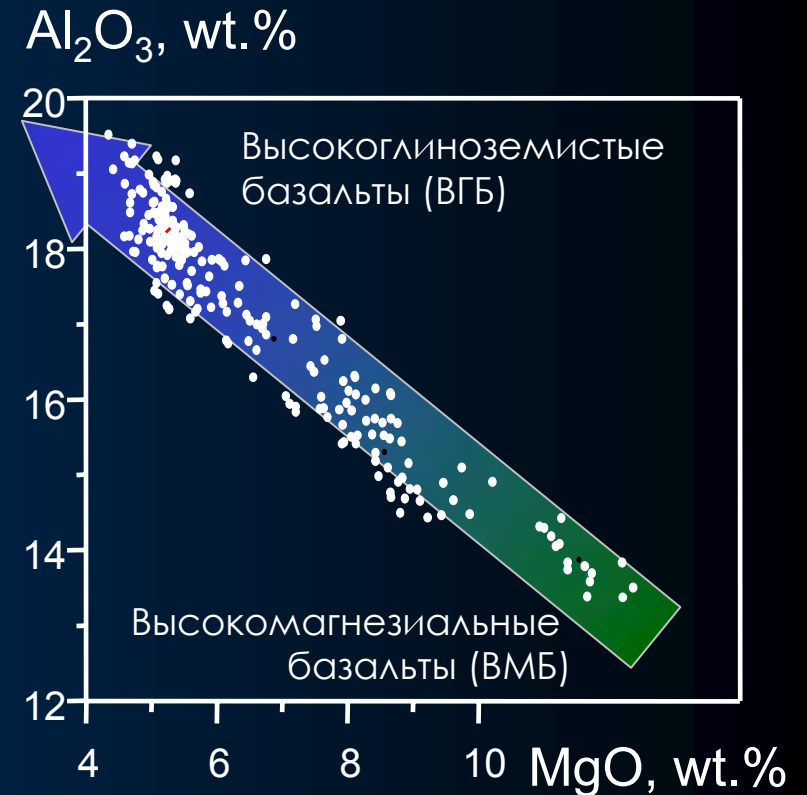
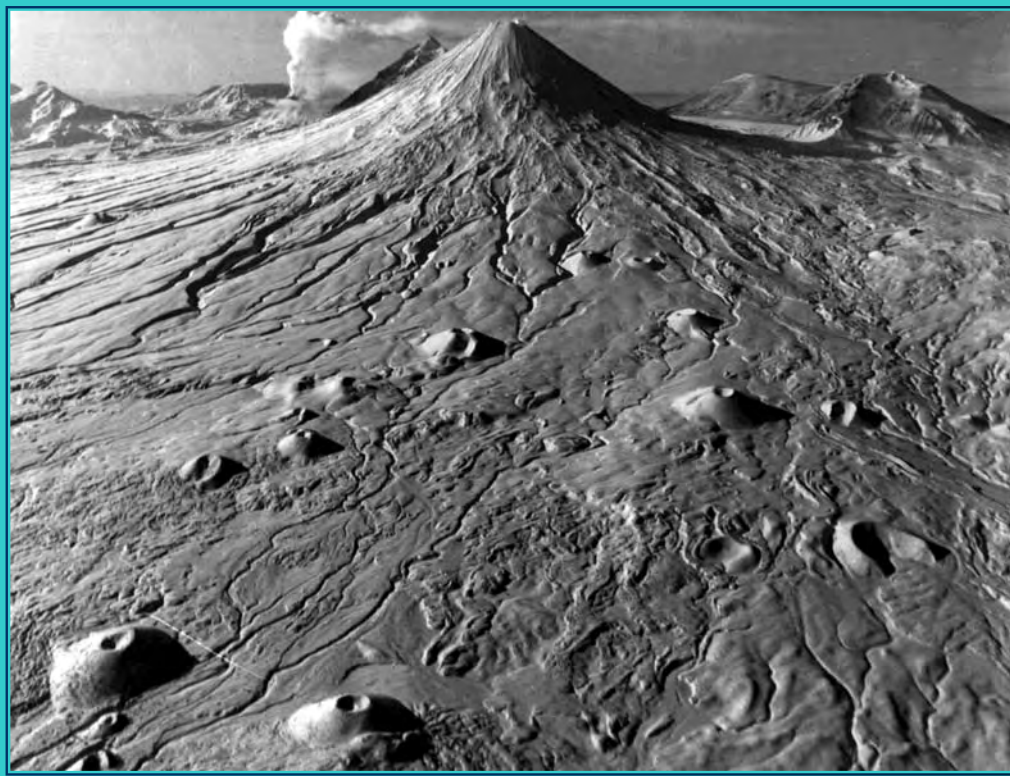
Ключевская группа: Региональное положение



Ключевская группа: *Безымянный, Камень и Ключевской*



Ключевская группа: вулкан Ключевской



Горшков (1956), Федотов и др. (1987), Хубуная и др. (1993),
Kersting & Arculus (1994, 1995), Арискин и др. (1995), Ariskin (1999), Ozerov
(2000), Dorendorf *et al.* (2000), Плечов и др. (2000), Миронов и др. (2001)

Ключевская группа: вулкан Безымянный



Извержение направленного
взрыва
30 марта 1956

Андезито-базальты, андезиты, дациты
Эволюция магм в коровом очаге
Ритмичный характер эруптивной
деятельности



Ключевская группа: вулкан Безымянный



Мальшев (2000)

Горшков и Богоявленская (1965)
Ермаков (1977)
Vogoyavlenskaya et al. (1985)
Кадик, Максимов и Иванов (1986)
Брайцева и др. (1990)
Belousov (1996)
Озеров и др. (1997)



Извержение направленного
взрыва
30 марта 1956

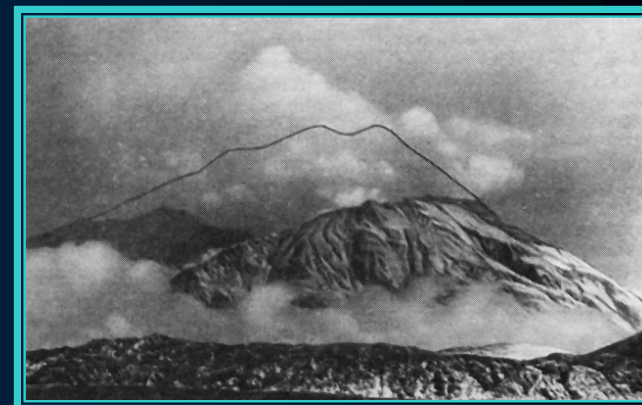
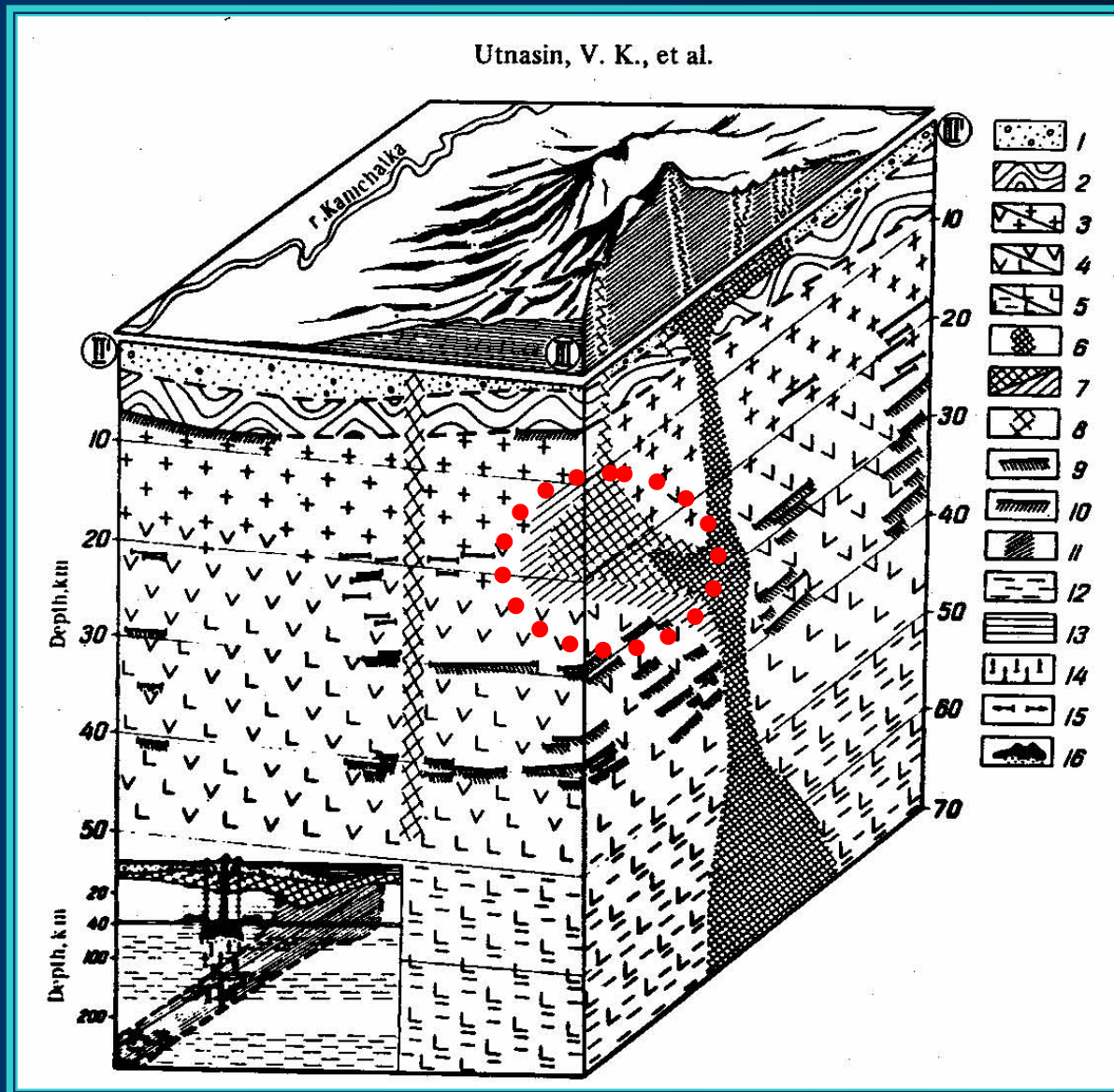


Схема глубинного строения (Utnasin et al., 1976)



Utnasin et al. (1976)

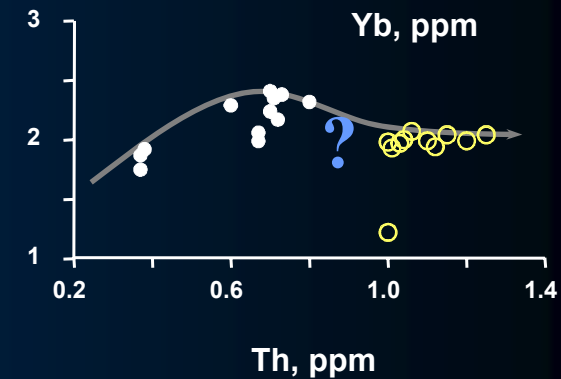
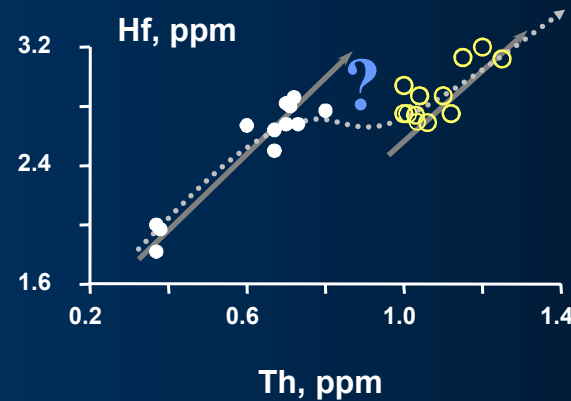
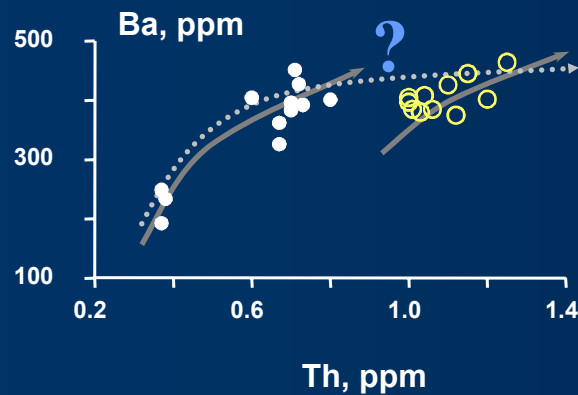
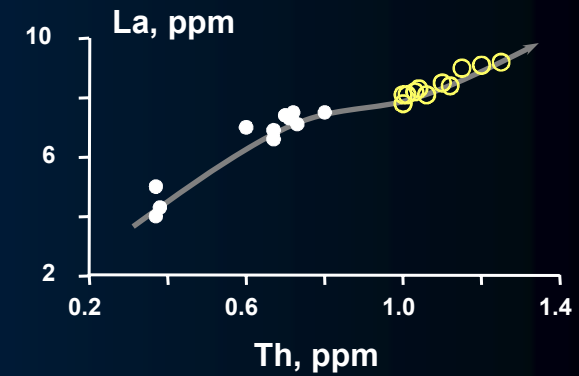
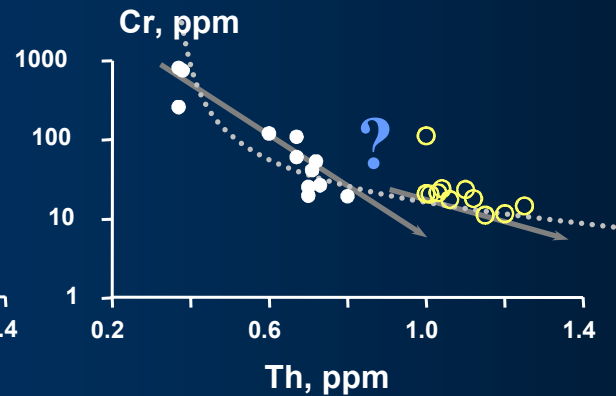
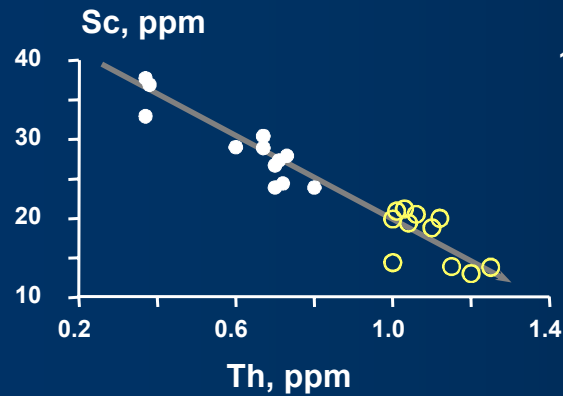
"Types of magma foci of island arc volcanoes and their study by the method of deep seismic sounding in Kamchatka"

In *Volcanoes and Tectonosphere*, pp. 123-137.

Балеста и др. (1976)

Аносов и др. (1978)

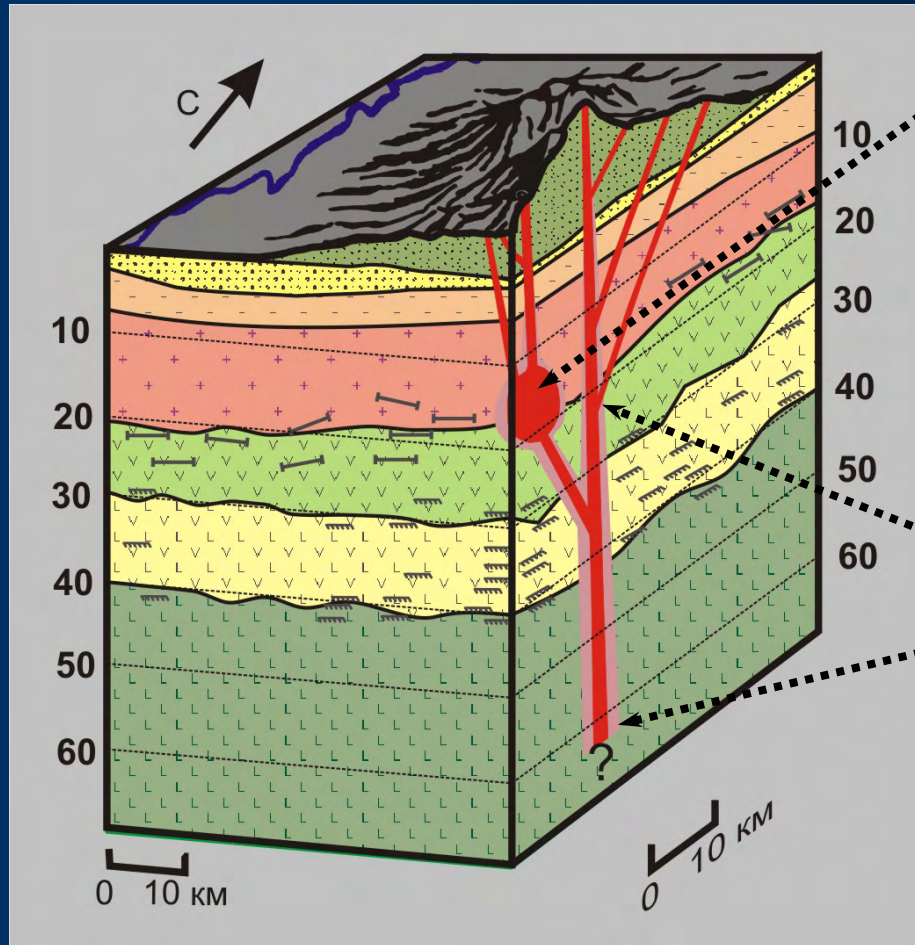
Геохимические свидетельства генетической связи



● *влк Ключевской* ○ *влк Безымянный*

Озеров, Арискин, Богоявленская и др. (1997)

Схема генетической связи магматизма вулканов



Изобарическое фракционирование

близких к водонасыщению
ВГБ-магм на глубинах 10-20 км с
образованием андезитовых магм

$P = 7\sim 4$ кбар, $H_2O > 3$ мас.%

Plag + Crx + Opx + Magp + Hbl
котектическая (?) ассоциация

Декомпрессионное фракционирование

ВМБ-магм в ходе подъема
с образованием ВГБ-магм

$P = 19\sim 7$ кбар, $H_2O = \sim 1.5$ мас.%

Oliv + Crx + Cr-Spin
минеральная ассоциация

Озеров, Арискин, Богоявленская и др. (1997)

Задачи исследования:

- 1. Выяснение генетических соотношений между породами различных стадий эволюции вулкана Безымянный;**
- 2. Оценка относительной роли фракционной кристаллизации, ассимиляции и смешения магм;**
- 3. Оценка состава исходной магмы вулкана Безымянный и природы возможной связи с источником ключевских магм;**
- 4. Определение условий кристаллизации и разработка петролого-геохимической модели формирования серии андезито-базальтов, андезитов и дацитов.**

Аналитические методы использованные в работе:

Химический состав пород:

XRF: главные элементы + Ba, Ce, Cr, Ga, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Th, V, Y, Zr (всего 75 образцов)

ICPMS: REE, Cs, Ti, Rb, Ba, Sr, Th, U, Nb, Ta, Pb, Zr, Hf, Li, Y (36 образцов)

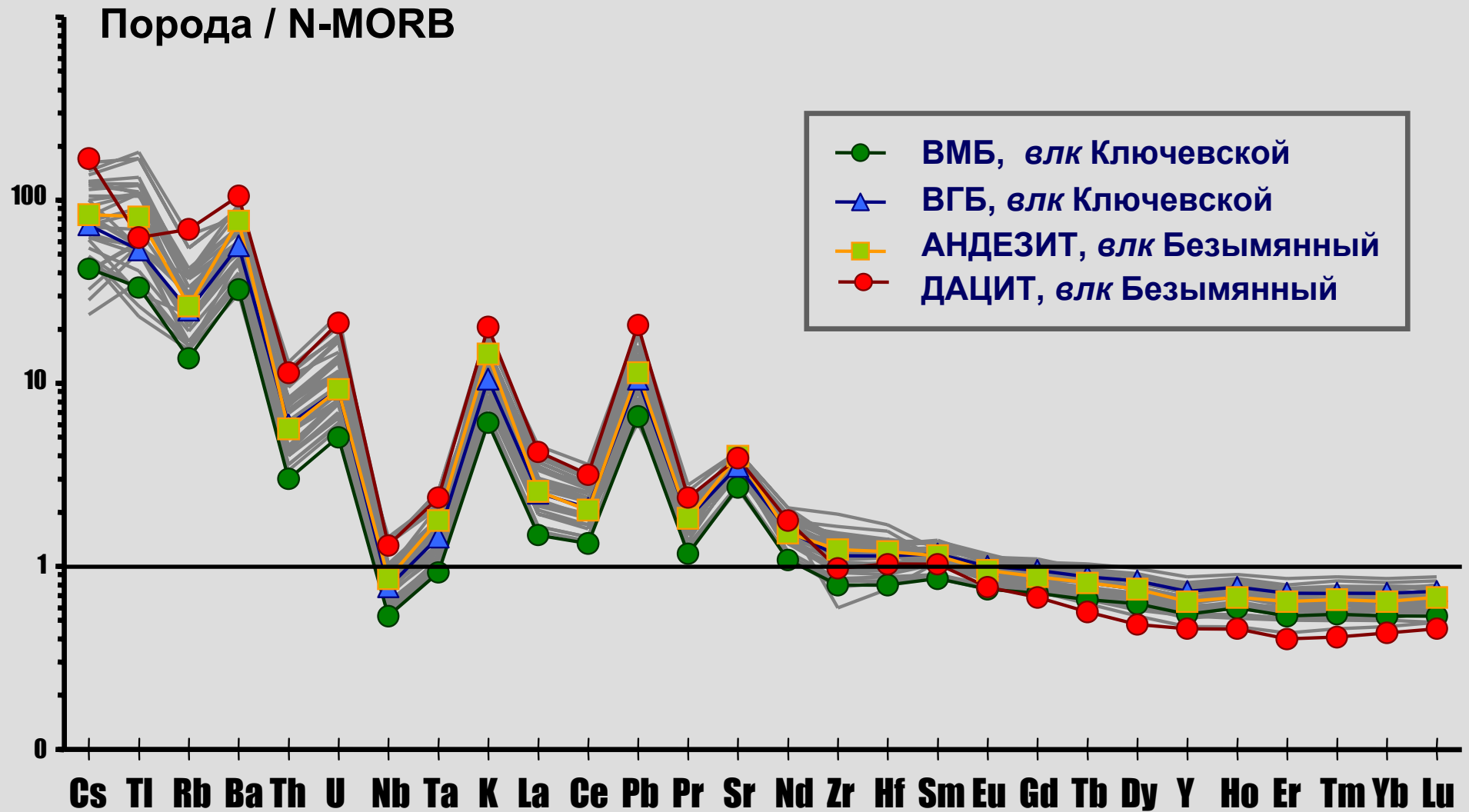
TIMS: изотопы Sr и Nd (19 образцов) и Pb (10 образцов)

Химический состав минералов:

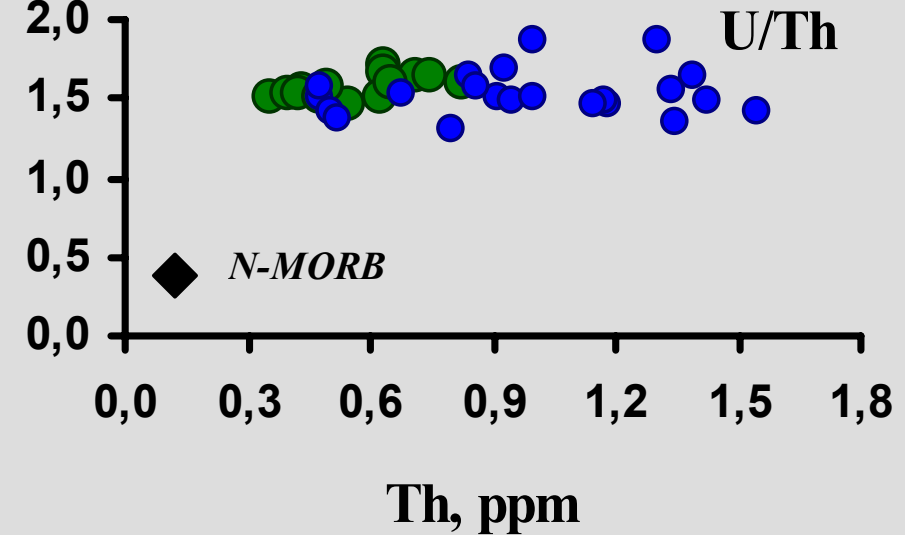
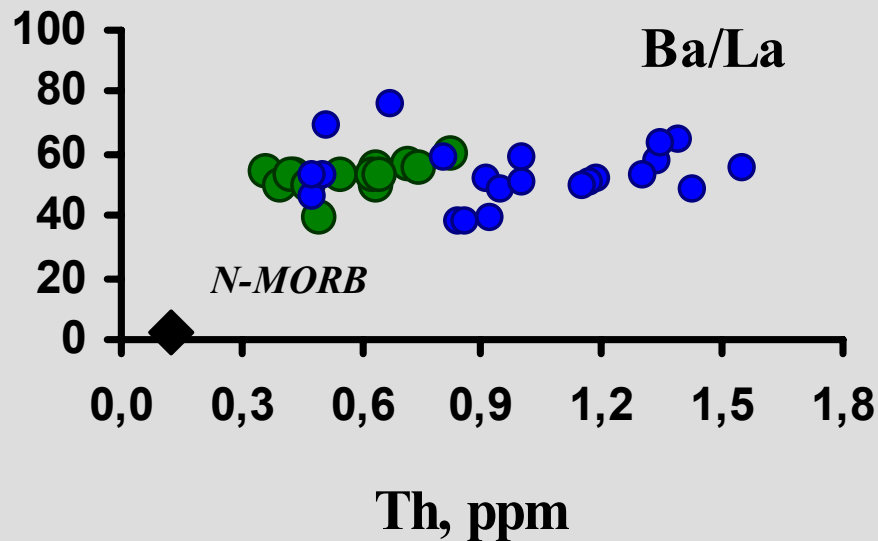
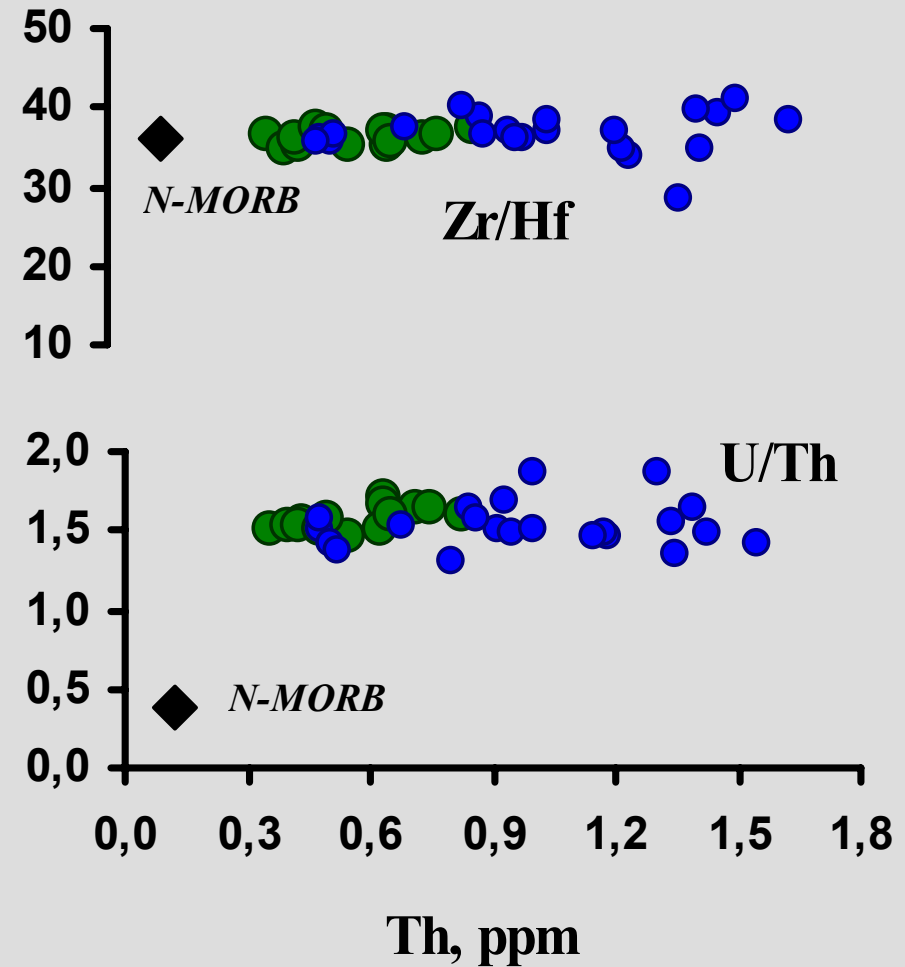
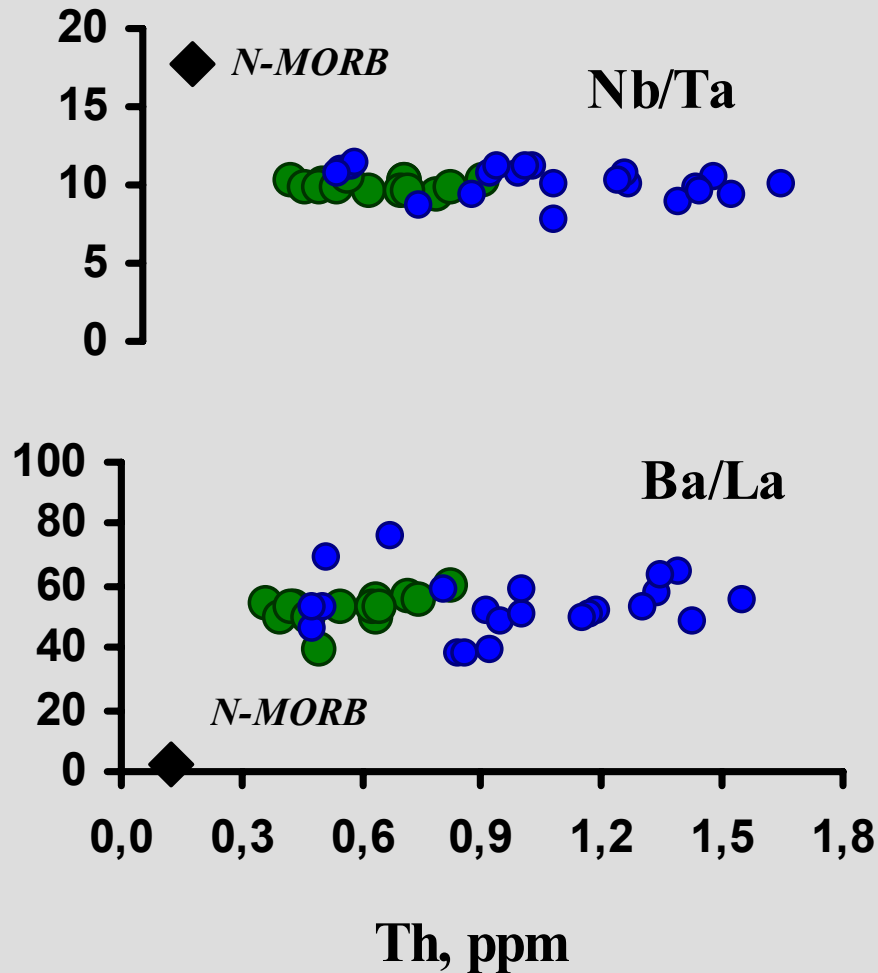
Микрозонд: главные элементы

LA-ICPMS: примесные элементы в CPX, PLAG, HBL

Результаты исследования: Спектры микроэлементов

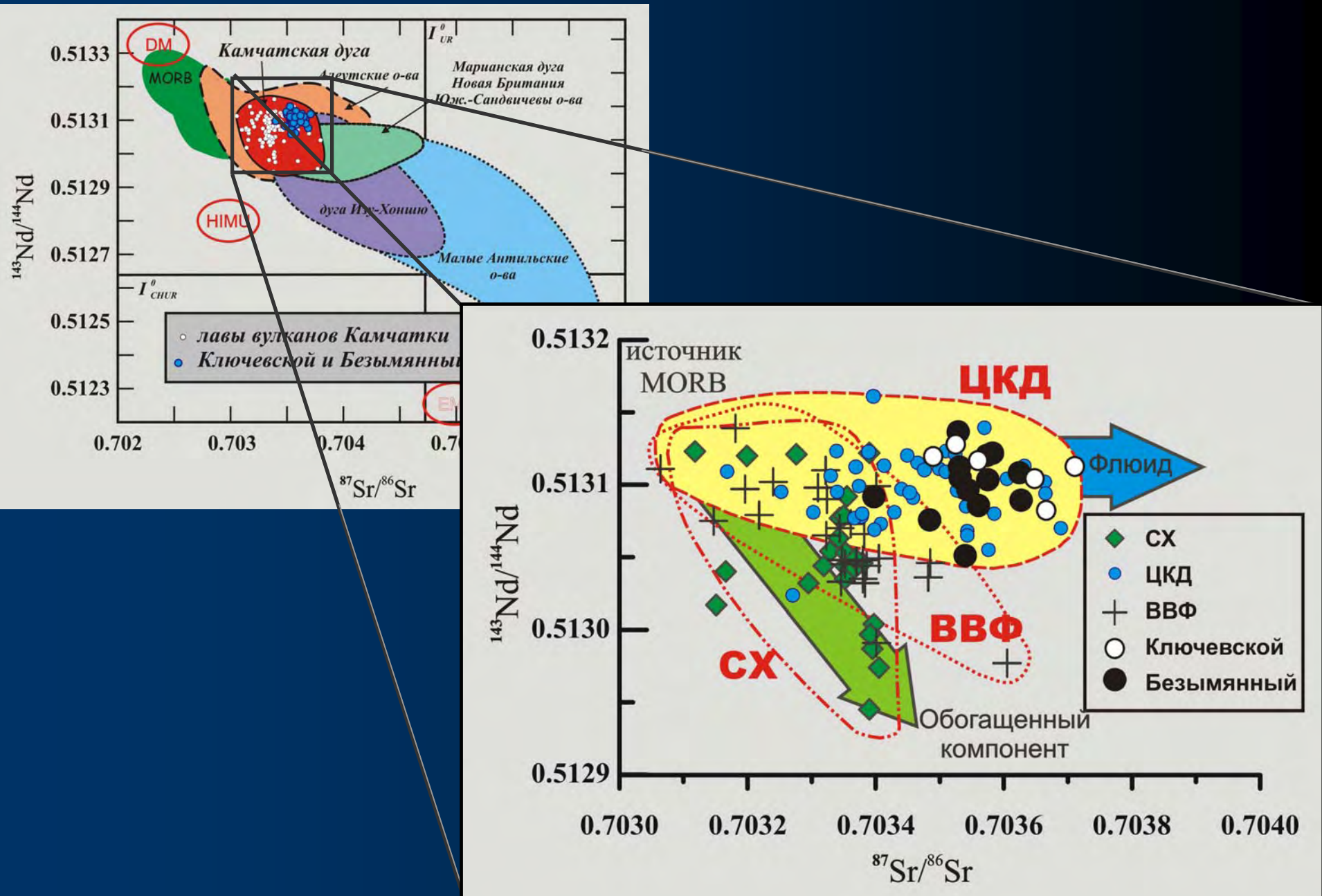


Результаты исследования: *Общность источника*

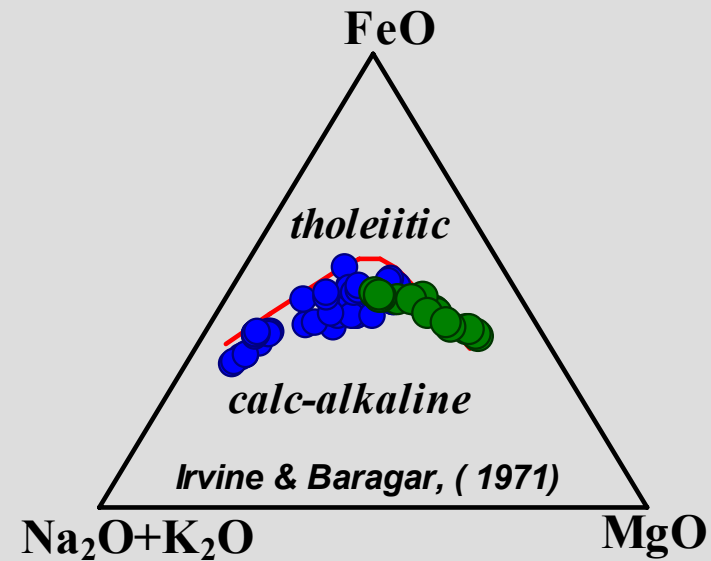
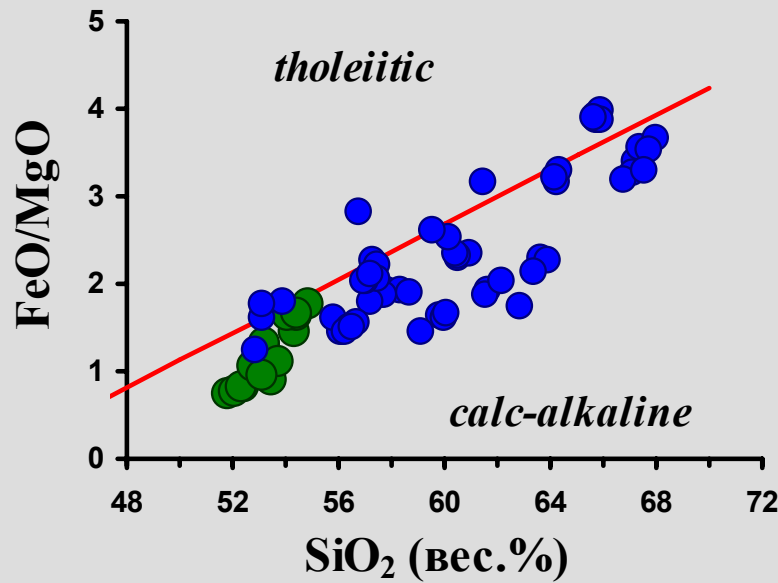
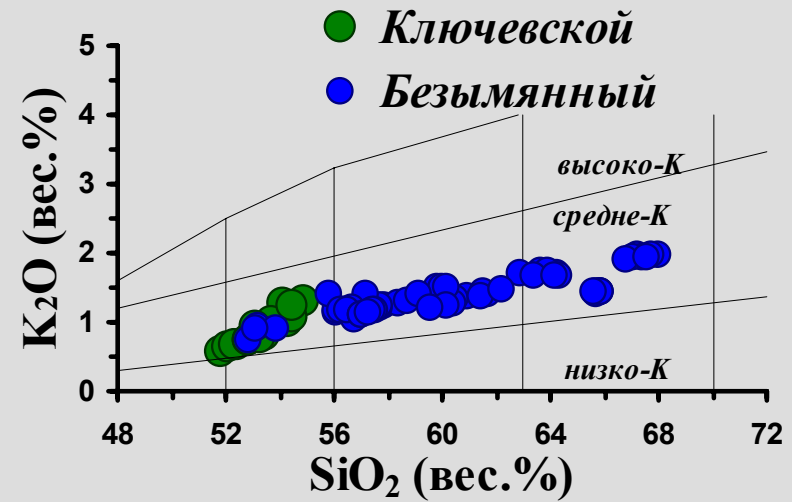
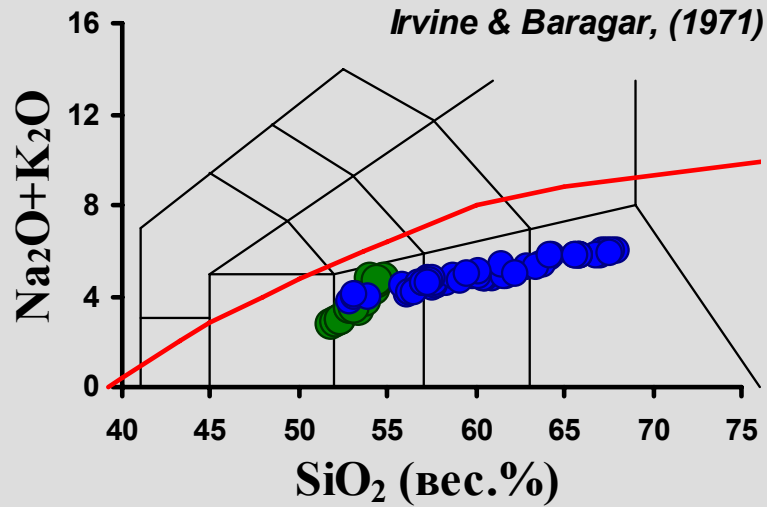


● *влк. Ключевской* ● *влк. Безымянный*

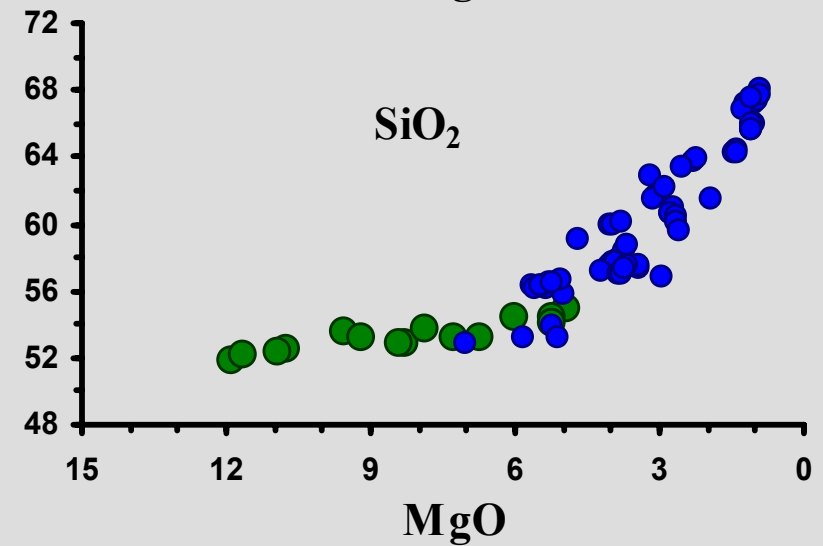
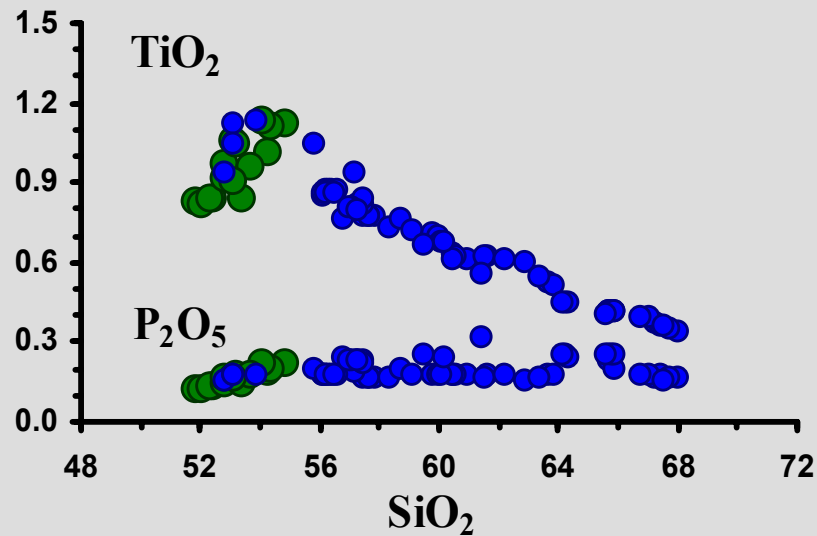
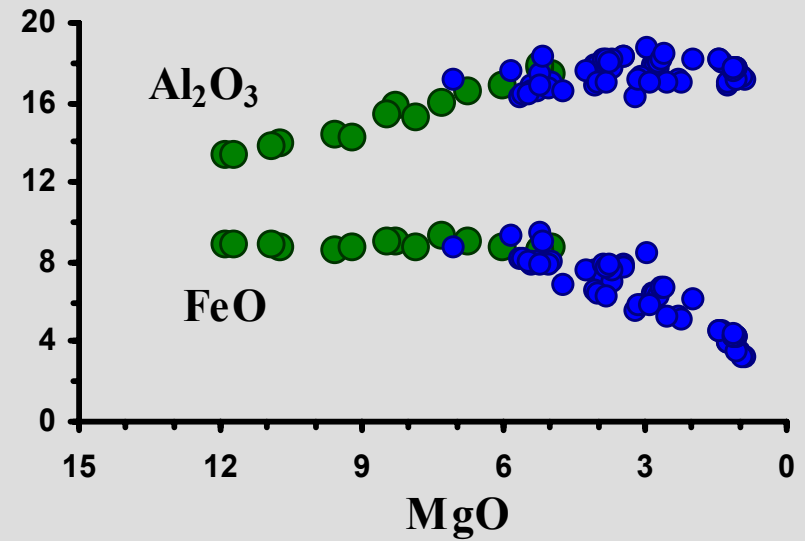
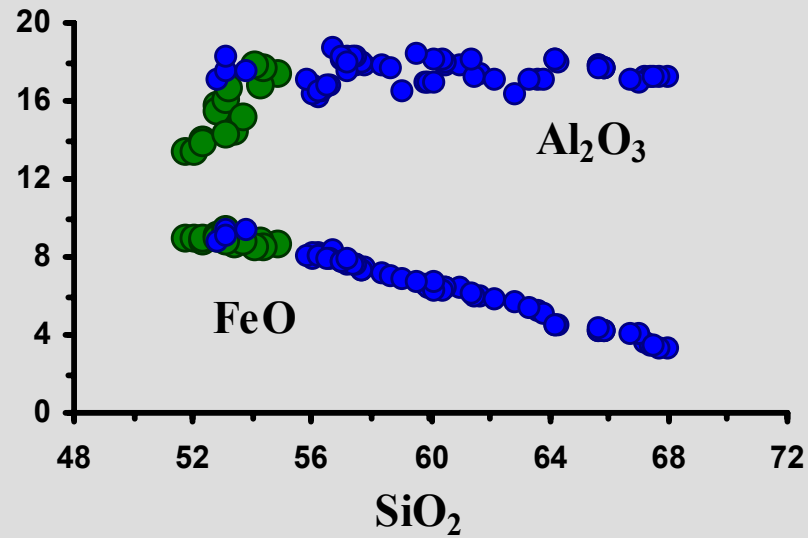
Результаты исследования: *Общность источника*



Результаты исследования: Классификационные диаграммы

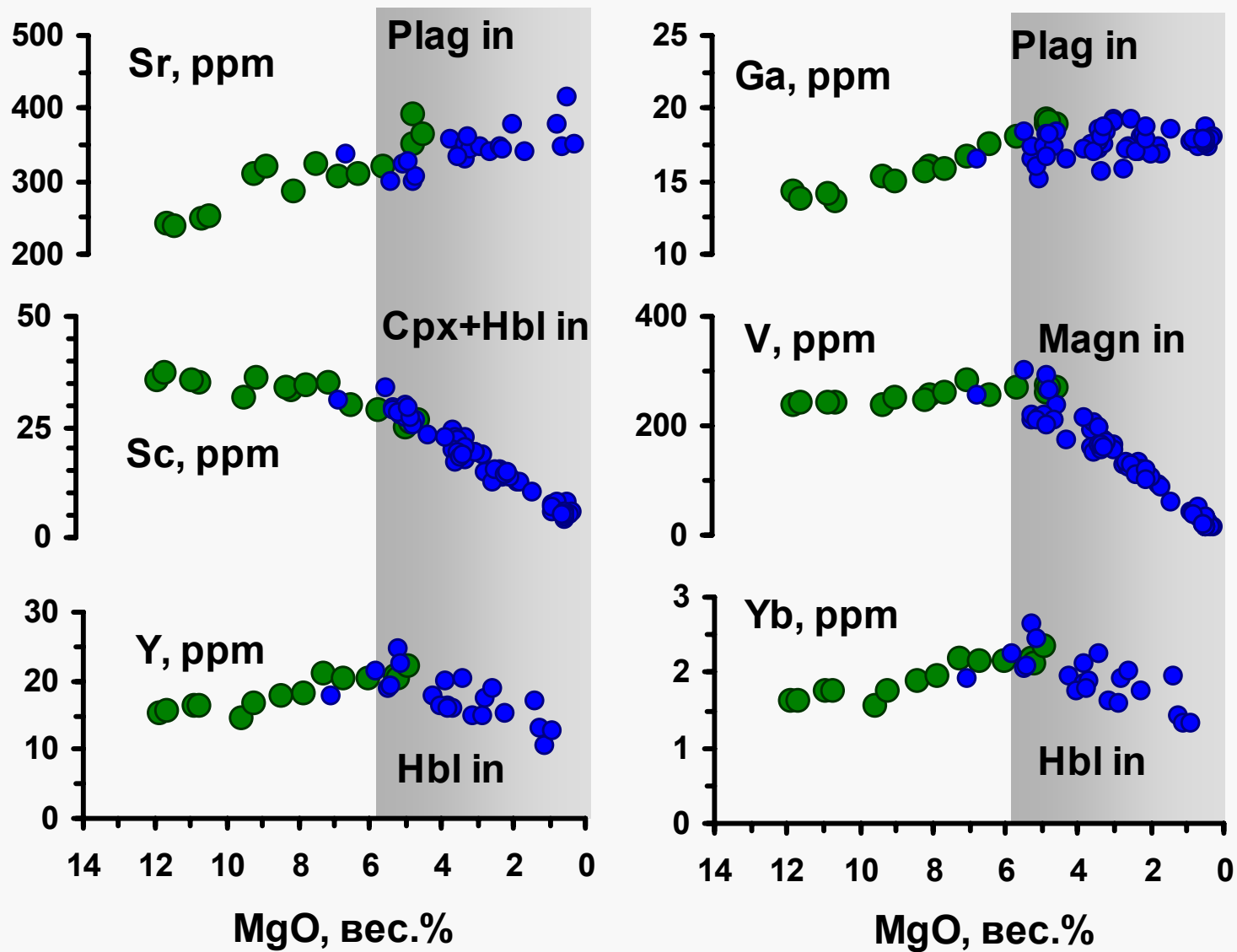


Результаты исследования: Вариации главных компонентов

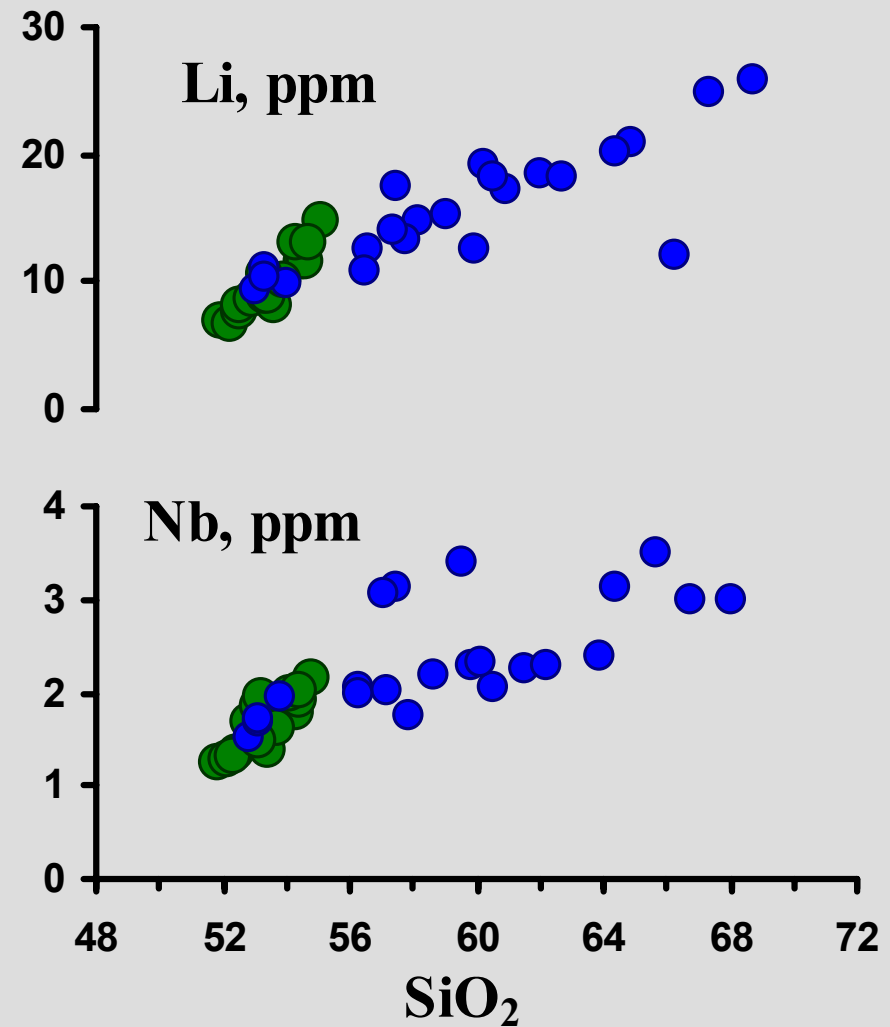
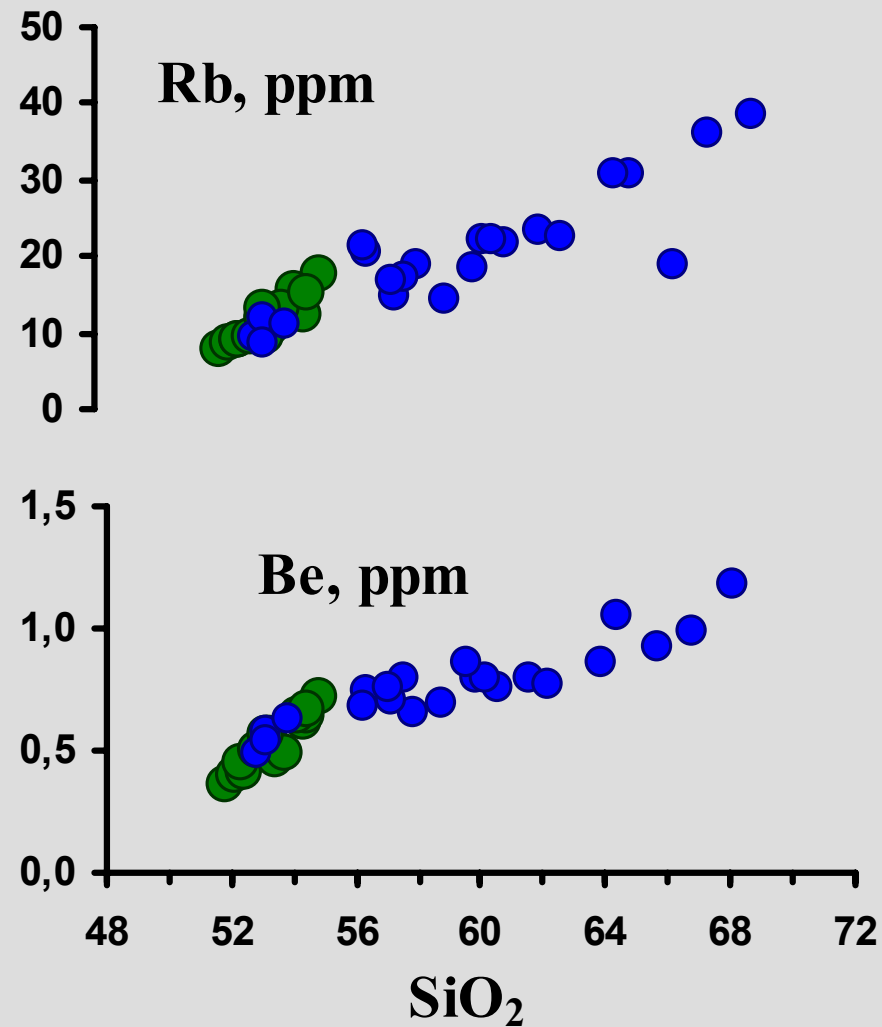


● *влк. Ключевской* ● *влк. Безымянный*

Результаты исследования: Вариации когерентных элементов

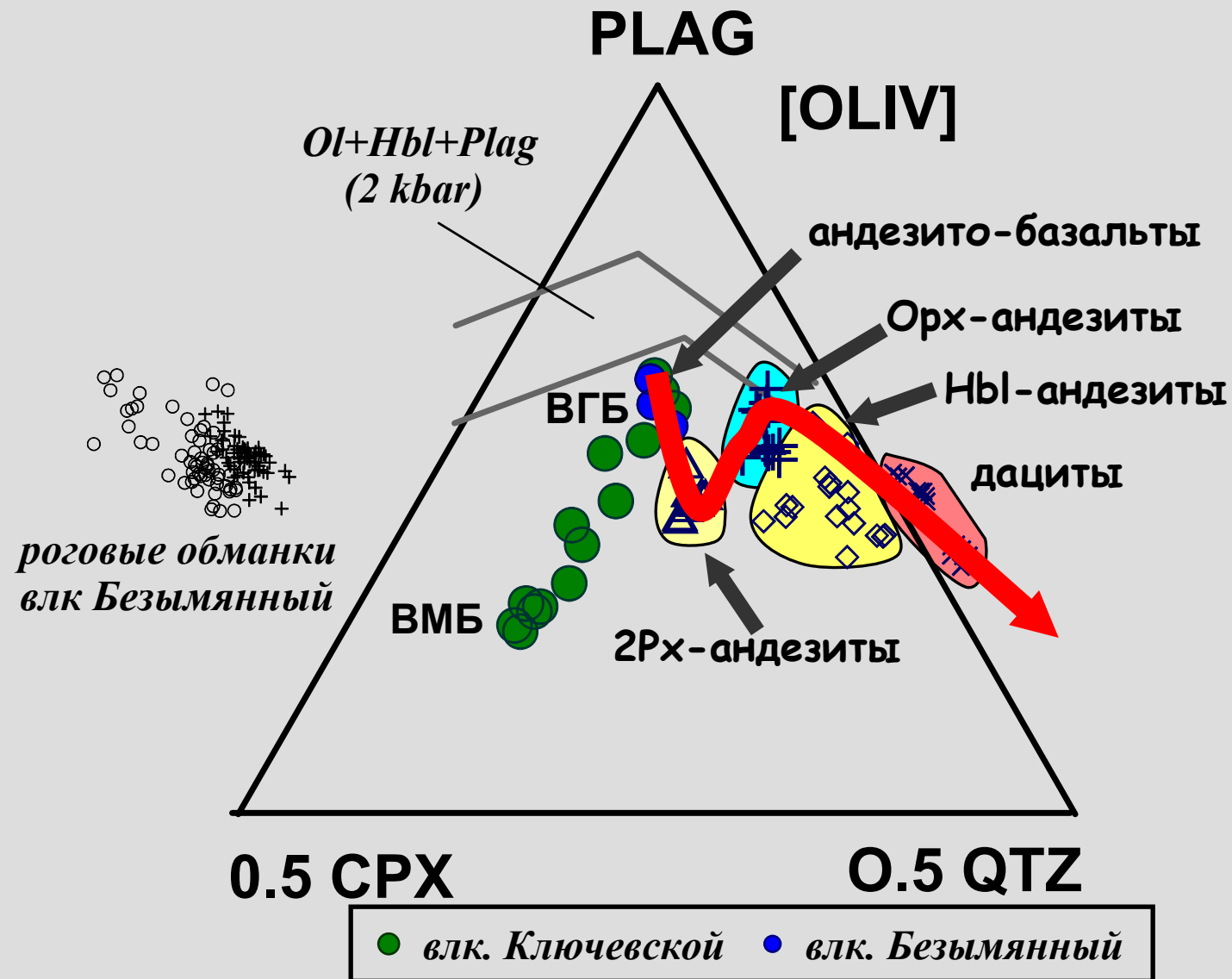


Результаты исследования: Некогерентные элементы

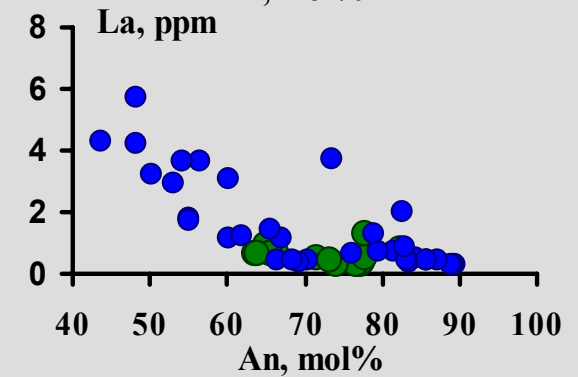
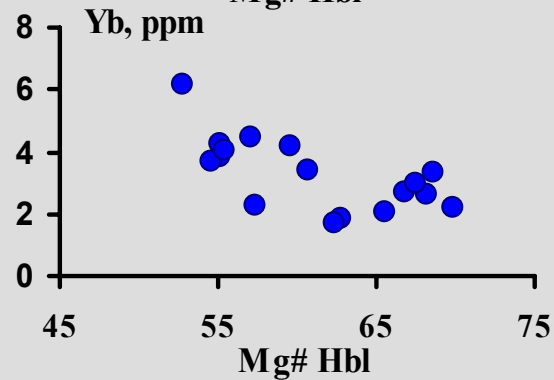
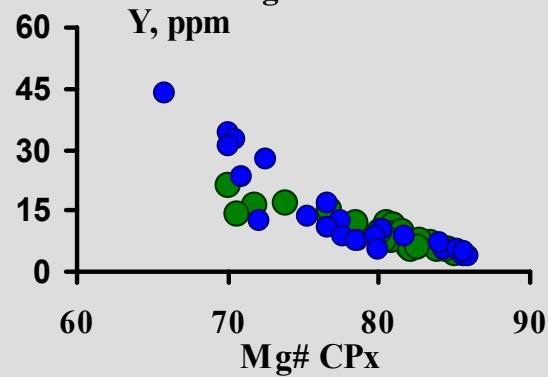
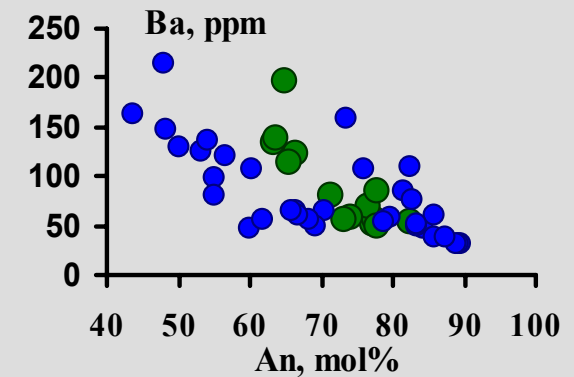
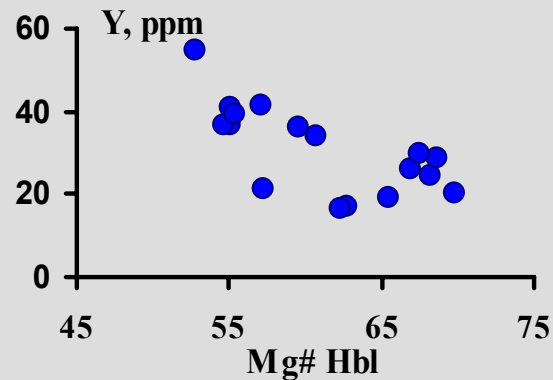
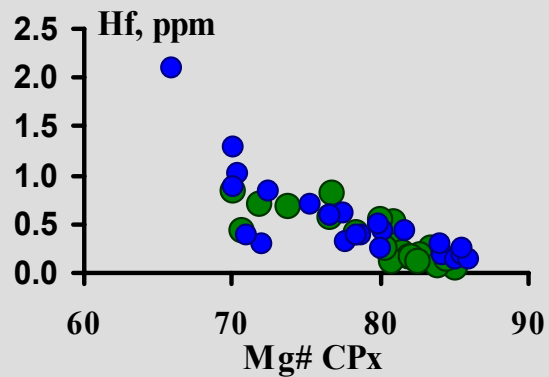
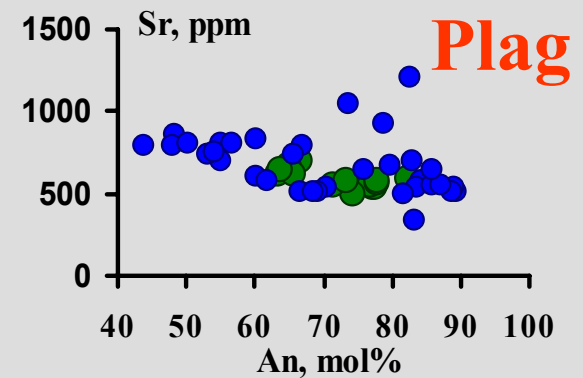
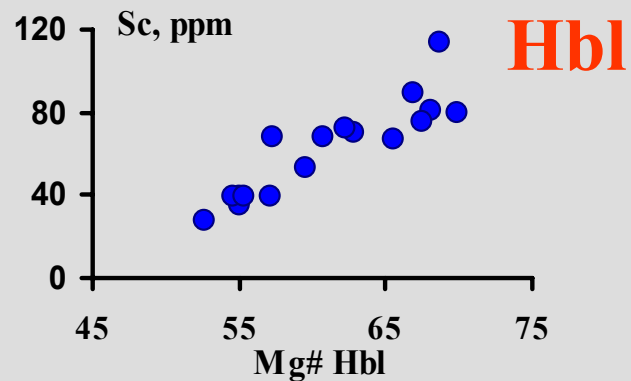
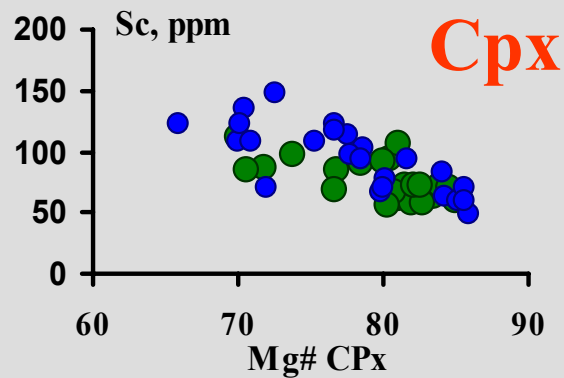


● *влк. Ключевской* ● *влк. Безымянный*

Результаты исследования: Проекция на фазовые диаграммы

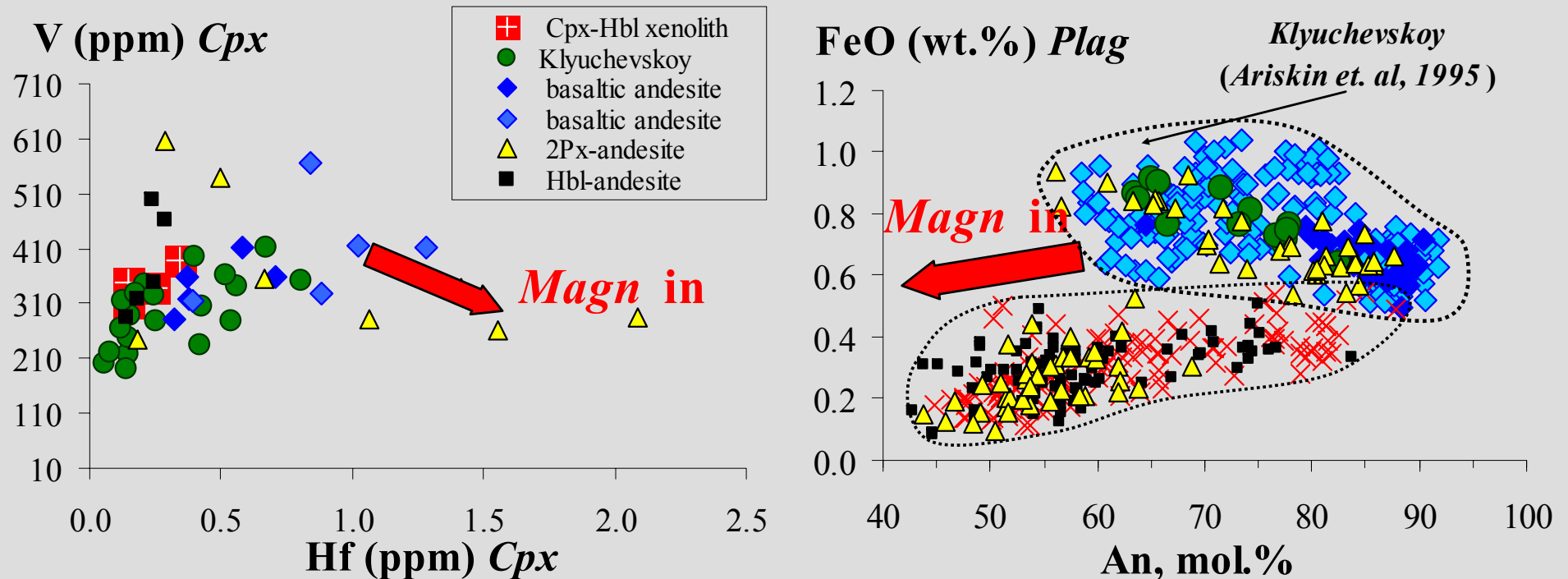


Результаты исследования: Геохимия минералов



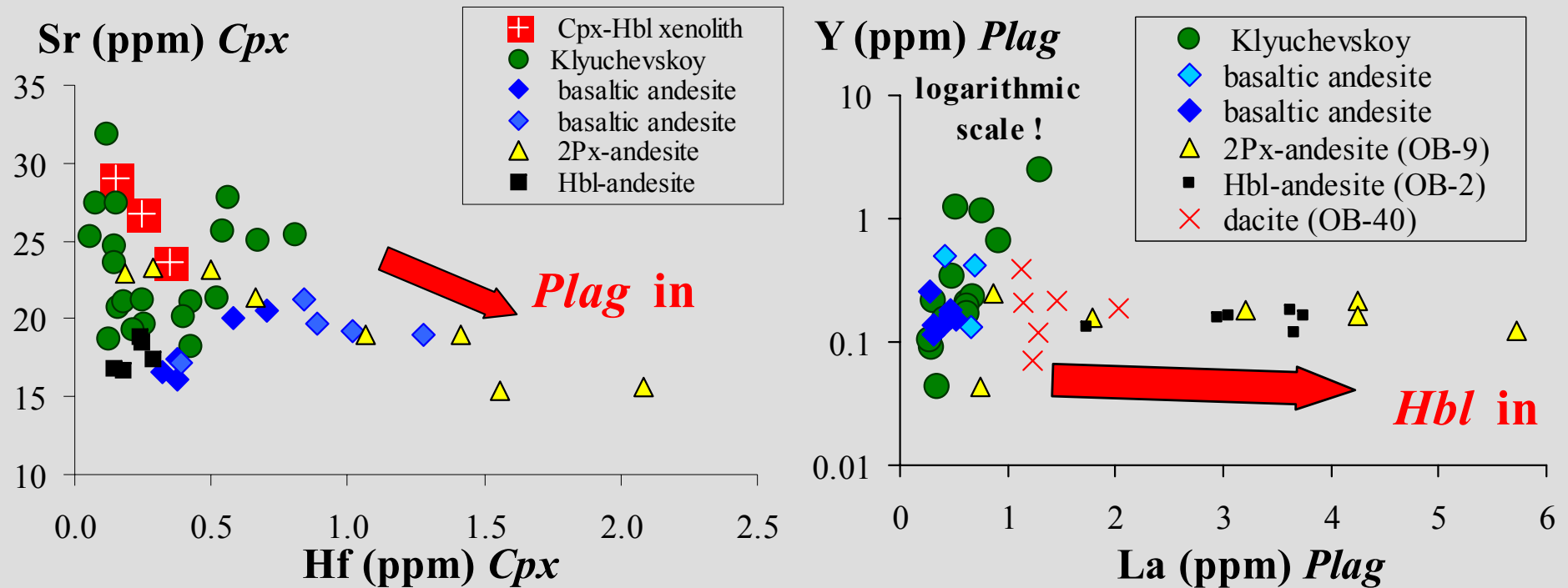
● *влк. Ключевской* ● *влк. Безымянный*

Результаты исследования: Геохимия минералов



- Ti и V в *Cpx*, V и Fe в *Plag* указывают на однозначное присутствие Fe-Ti оксидов в ассоциации кристаллизующихся минеральных фаз

Результаты исследования: Геохимия минералов



- Sr и Eu в *Cpx* фиксируют начало кристаллизации *Plag*,
- Y, Sc, Ba в *Plag* несут свидетельства кристаллизации *Hbl*

1-ое защищаемое положение

Лавы вулканов Ключевской и Безымянный образуют известково-щелочную ассоциацию генетически родственных пород базальтовой и андезит-дацитовый подсерий, имеющих общий мантийный источник.

Изотопные характеристики этого вещества близки деплетированному источнику MORB, подвергнутому воздействию флюидов, образованных в результате дегидратации субдуцирующей океанической литосферы.

В результате исследования геохимических особенностей высокомагнезиальных пироксенов, впервые установлены свидетельства слабой неоднородности литологического состава исходного мантийного субстрата.

2-ое защищаемое положение

Формирование андезит-дацитовый подсерии вулкана Безымянный проходило в результате процессов фракционирования, контролирующихся последовательностью минеральных фаз, отвечающих образованию двупироксеновых, ортопироксеновых и роговообманковых андезитов и дацитов.

Однородность геохимических спектров и изотопных характеристик для основных и более кислых пород не позволяет предполагать существенную роль процессов ассимиляции корового материала, а также крупномасштабных инъекций в камеру дополнительных порций примитивных расплавов.

Результаты исследования:

Оценка состава родоначальных магм

Главные компоненты

Порода	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Mg#
ВГБ	54.46	1.12	17.59	8.55	0.15	5.13	8.09	3.47	1.22	0.21	0.51
Андезито- -базальт	53.16	1.08	17.90	9.15	0.17	5.47	8.89	3.10	0.92	0.18	0.52

Примесные элементы

Порода	Cr	Ga	Ni	Pb	Sc	Sr	V	Ba	Hf	Ta	Tl	Pb	Th	U
ВГБ	39	19	29	3.3	26	368	266	393	2.6	0.2	0.08	3	0.7	0.5
Андезито- -базальт	22	18	19	2.9	30	302	282	290	2.3	0.2	0.08	4	0.5	0.3

Результаты исследования: Оценка давления кристаллизации

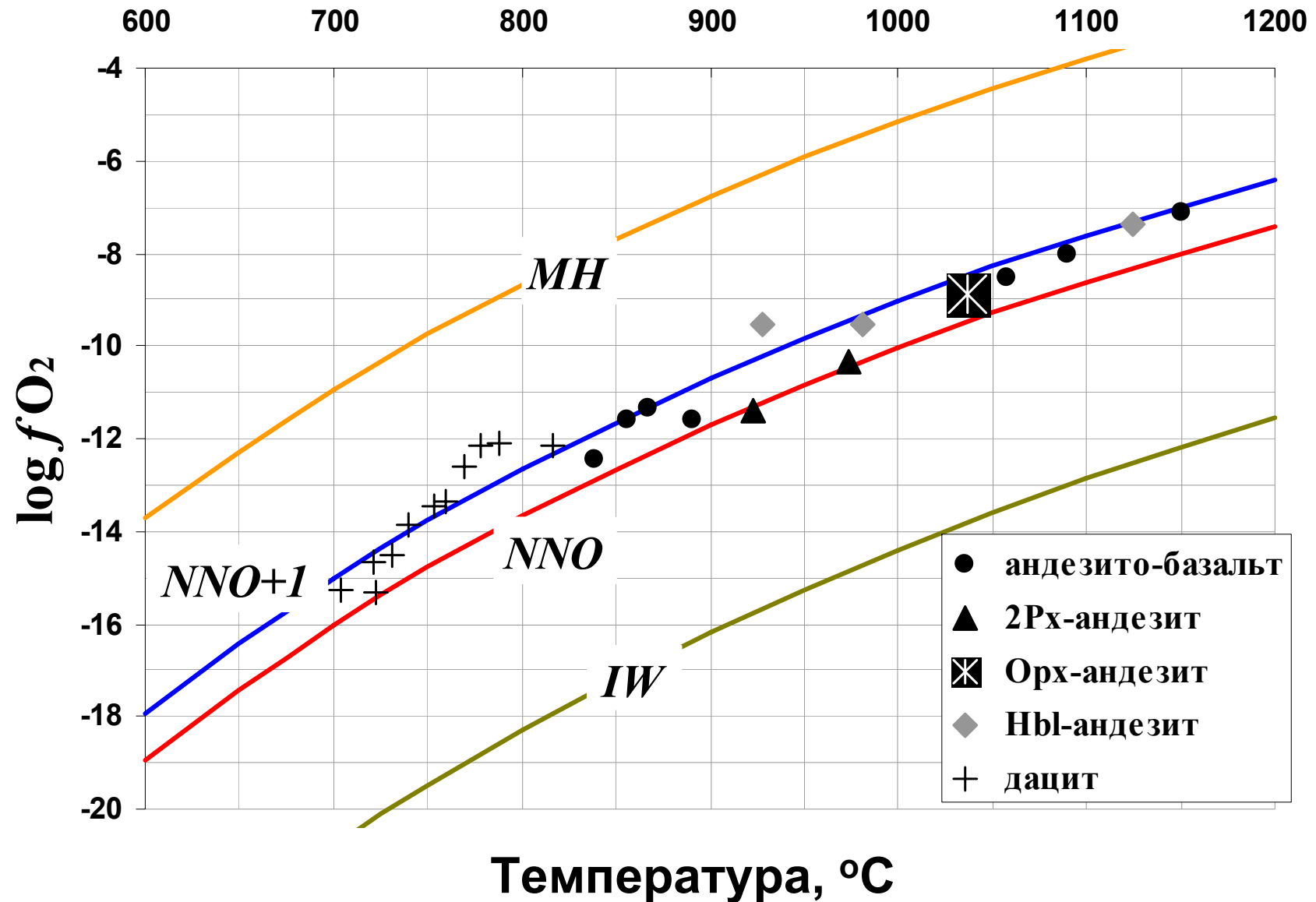


4-7 кбар – оценки на основе сравнения составов амфибол-содержащих пород с экспериментальными расплавами

6-9 кбар – оценки на основе составов амфиболов
(Альмеев и др., 2001)

10-20 км – глубина очага по геофизическим данным (**3.5 – 7 кбар**)

Результаты исследования: Оценка окислительного состояния



3-е защищаемое положение

Впервые оценен состав родительской магмы вулкана Безымянный, который по макрокомпонентам близок высокоглиноземистым базальтам Ключевского вулкана, но несколько более «примитивный» по геохимическим признакам.

Получены оценки интенсивных параметров кристаллизации этого расплава, отвечающие давлению 4-7 кбар и летучести кислорода выше буфера никель-бунзенит (NNO+1).

Близкие к водонасыщенным условия предполагаются для гетерофазовых (приграничных) слоев кристаллизующейся магмы.

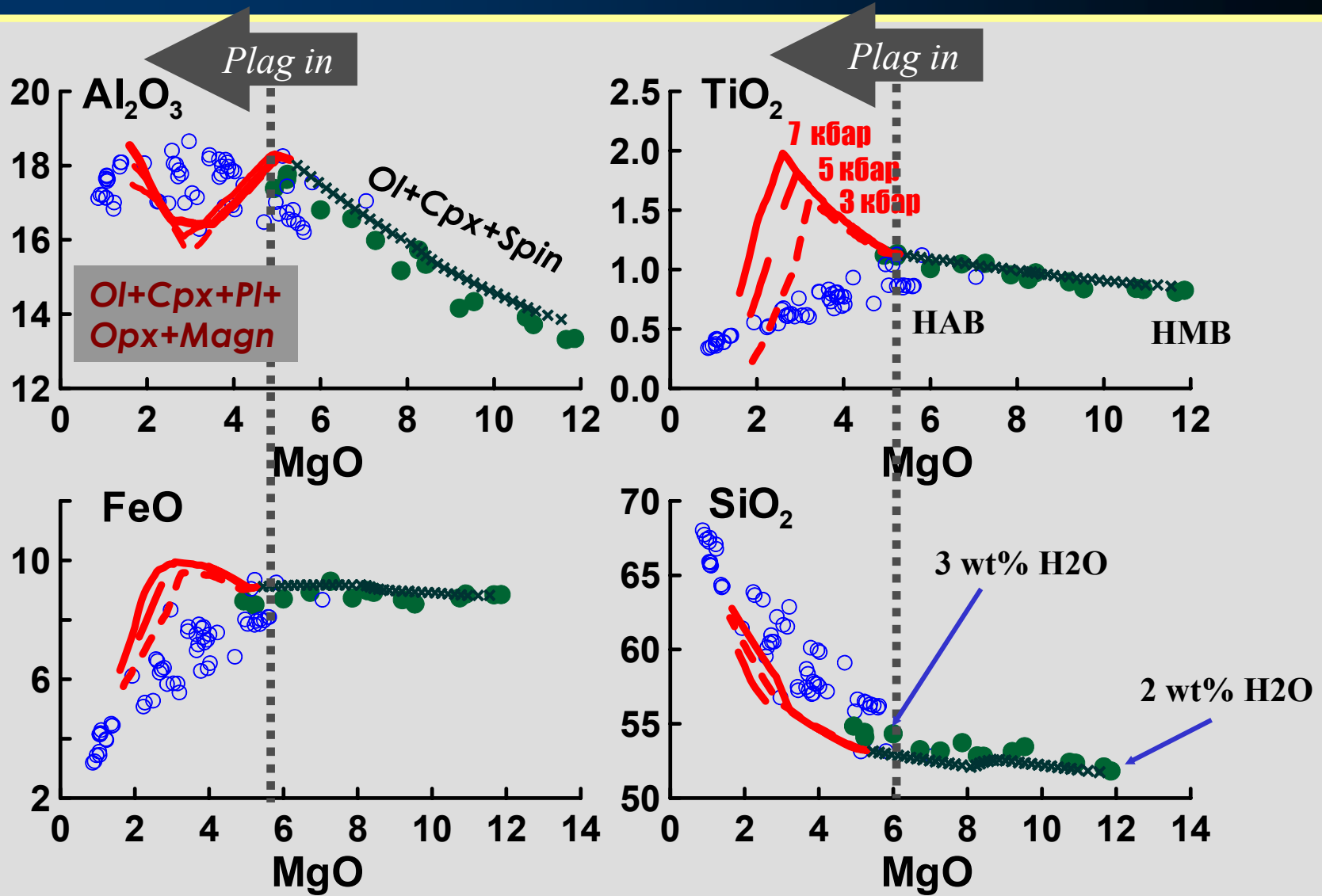
Результаты исследования: Моделирование фазовых равновесий

Разработана численная модель кристаллизации ВГБ-расплавов. Она включает:

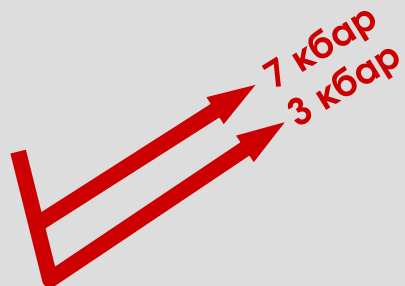
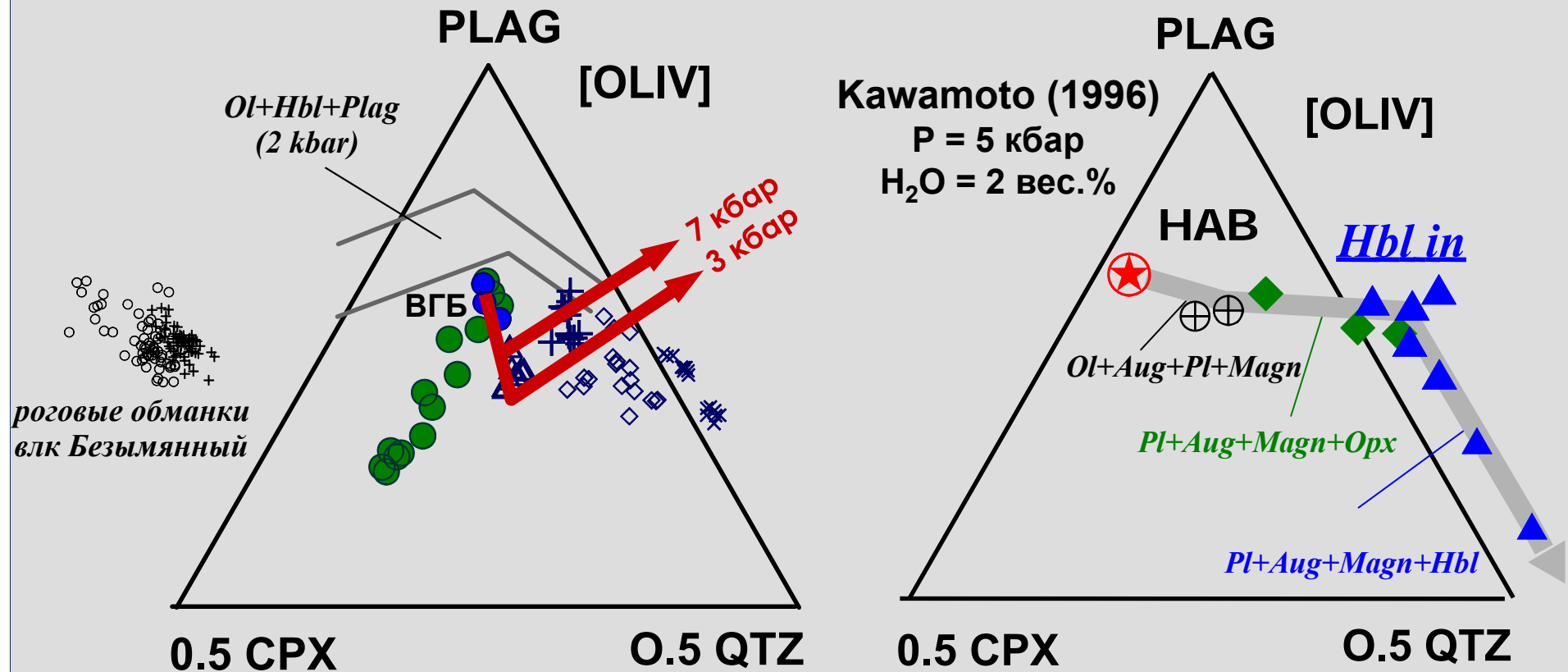
- разработку эмпирического уравнения для расчета растворимости H_2O в расплавах базальтов, андезитов и гранитов в зависимости от состава, температуры и давления;
- расчет поправочных коэффициентов, учитывающих дифференцированное влияние H_2O на температуры ликвидуса главных минеральных фаз базальтовой системы (*Альмеев и Арискин, 1996*);
- интегрирование полученных зависимостей в алгоритм моделирования кристаллизации базальтовых магм;
- калибровку новых геотермобарометров минерал-расплав для всех главных фаз базальтовой системы (*Oliv, Plag, Aug, Opx*), оптимально «работающих» в известково-щелочной области составов (*Альмеев и др., 2001*).

На данном этапе исследований модель ограничена кристаллизацией безводных силикатов.

Результаты исследования: Моделирование фазовых равновесий

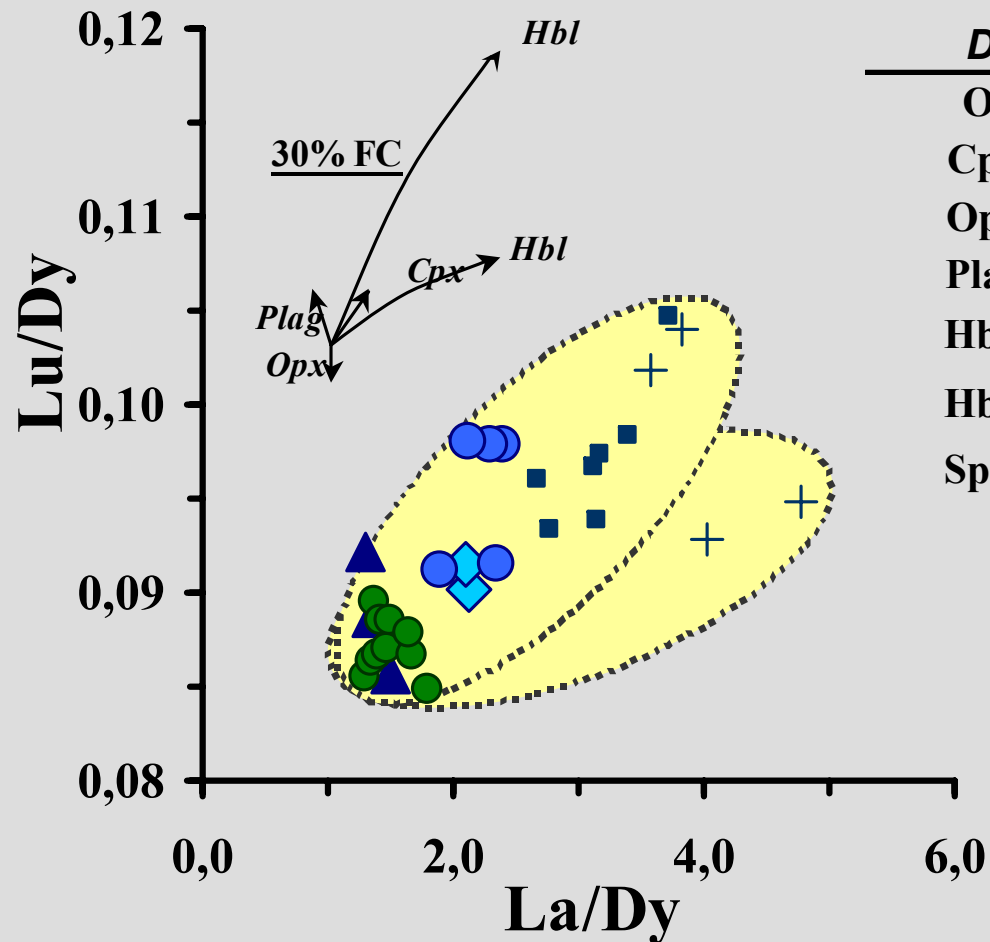


Результаты исследования: Моделирование фазовых равновесий



Линии эволюции исходных ВГБ-магм влк. Безымянный, рассчитанные с помощью «известково-щелочной» версии программы КОМАГМАТ (NNO, H₂O=3 мас. %)

Результаты исследования: Роль роговой обманки



- влк Ключевской
- ◆ 2Px-андезиты
- Hbl-андезиты
- ▲ андезито-базальты
- Орх-андезиты
- + дациты

<i>D</i>	La	Dy	Lu
Ol	0,008	0,012	0,015
Cpx	0,15	0,45	0,4
Orx	0,005	0,05	0,03
Plag	0,2	0,05	0,014
Hbl ₁	0,2	1,5	1,2
Hbl ₂	0,2	1,5	1,4
Spin	0,01	0,01	0,004

Фракционирование La/Dy и Lu/Dy в андезитах и дацитах указывает на принципиальную роль амфибола в ходе эволюции магматической системы вулкана Безымянный

4-е защищаемое положение

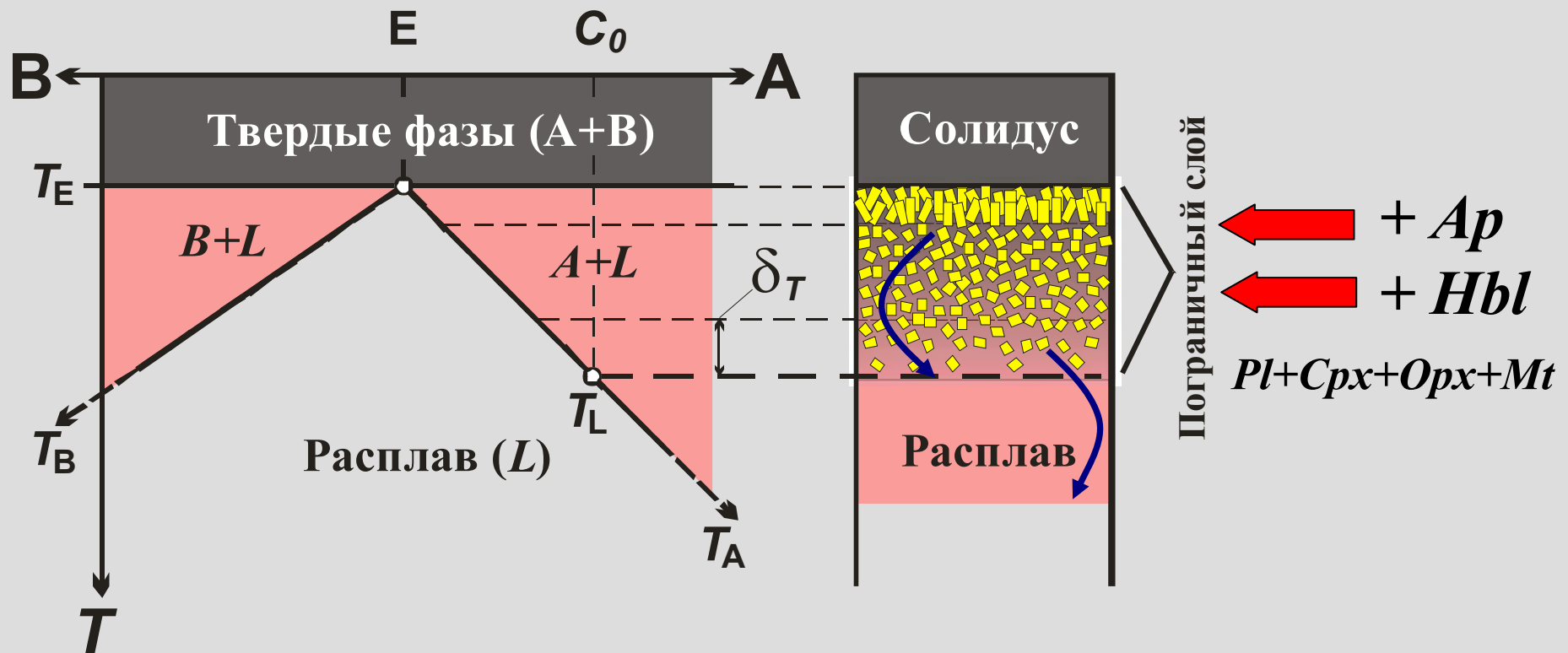
Разработана численная модель кристаллизации ВГБ-расплавов, на основе которой выполнена серия изобарических расчетов траекторий фракционной кристаллизации исходной магмы вулкана Безымянный.

Установлено, что раннее фракционирование роговой обманки является принципиальным фактором формирования специфики магматизма вулкана Безымянный.

Впервые представлены геохимические свидетельства фракционирования амфибола с начальных стадий формирования известково-щелочного тренда.

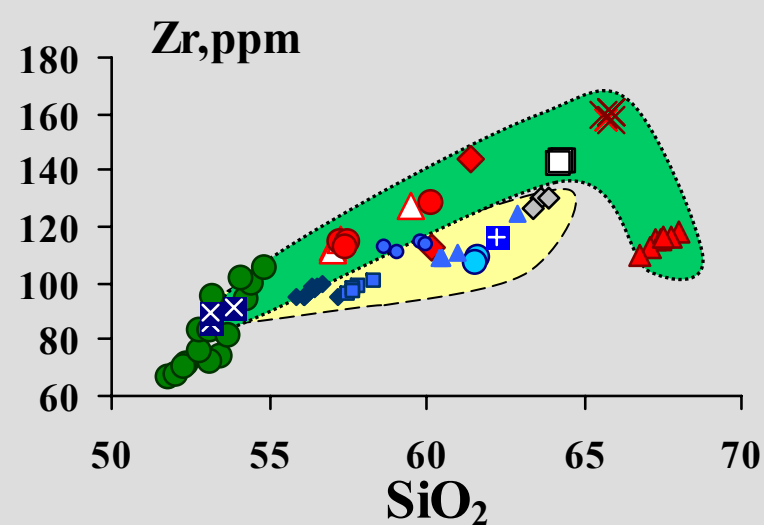
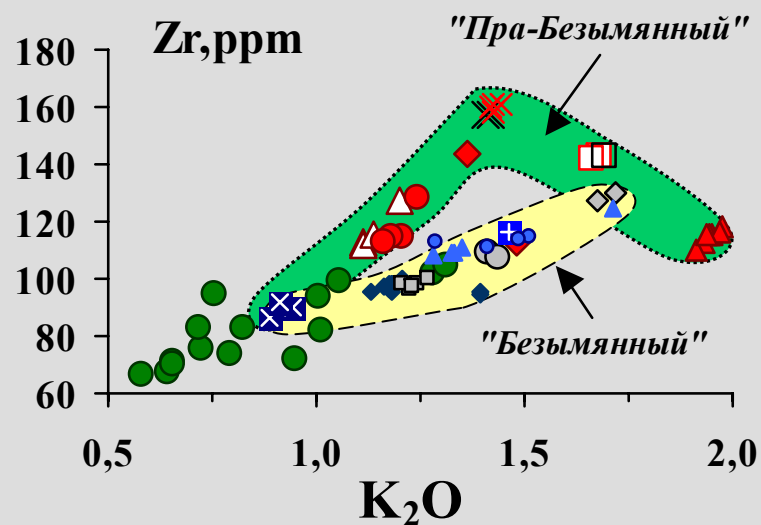
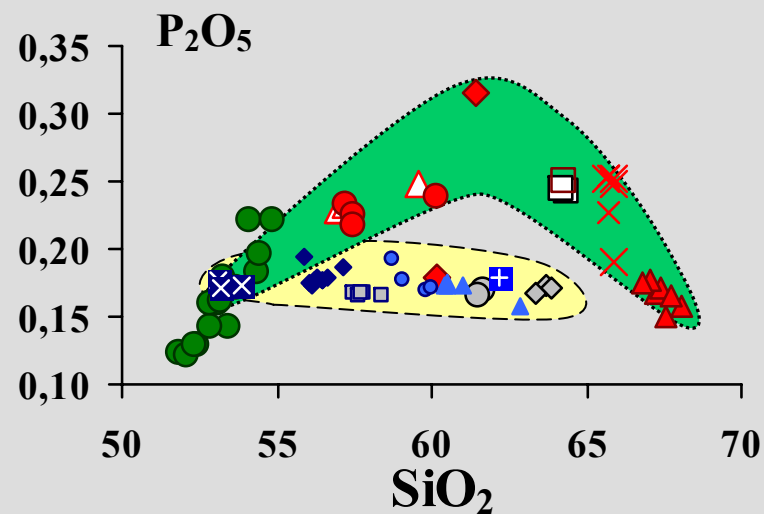
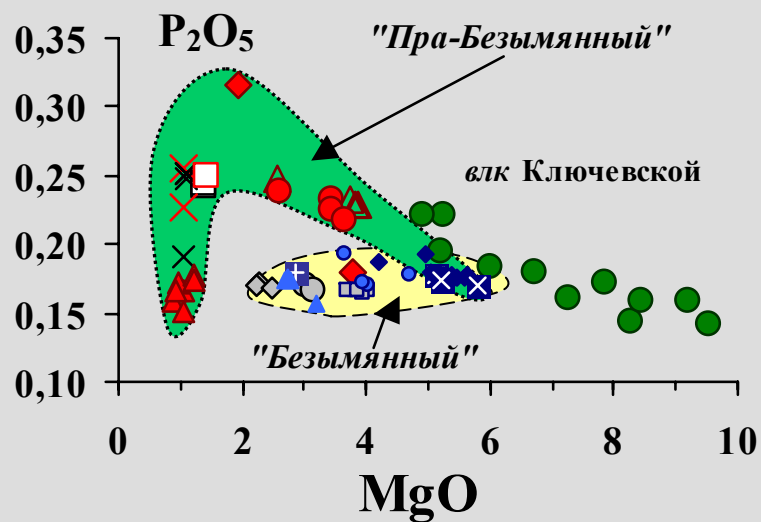
Результаты исследования: *BLF*-кристаллизация

Схема строения пограничного слоя у кровли магматической камеры



Результаты исследования:

Геохимическая систематика экструзивных куполов



5-е защищаемое положение

Обоснована принципиальная роль процессов кристаллизации в пограничном слое (*boundary layer fractionation*), которые позволяют связать наличие геохимических меток амфибола с низкотемпературной природой кристаллизации этого минерала в андезит-базальтовой системе («фантомная кристаллизация»).

Эти эффекты можно привлечь для интерпретации геохимических различий между вулканитами стадии Пра-Безымянный (экструзивные образования) и более поздних терминальных извержений.

Результаты исследования: *BLF*-кристаллизация



Схема *in situ* кристаллизации в переходном слое с учетом возвратного поступления части остаточной жидкости в основной объем магмы (Langmuir, 1989)

Фактор возможной объемной-гомогенной кристаллизации не учитывается и влияние пограничного слоя проявляется в “чистом виде”

Такая модель процесса используется при разработке упрощенных моделей **Boundary Layer Fractionation**

$$C_L = C_{L_0}(1-X)^p, \quad p = f(D-1)/(D(1-f)+f),$$