

Общая тема:

МАГМАТИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ ОКЕАНОВ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ТОЛЕИТОВЫХ СЕРИЙ MORB

Лекция № 13

ПЛУТОНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОКЕАНОВ:

***строение, состав, условия
формирования***

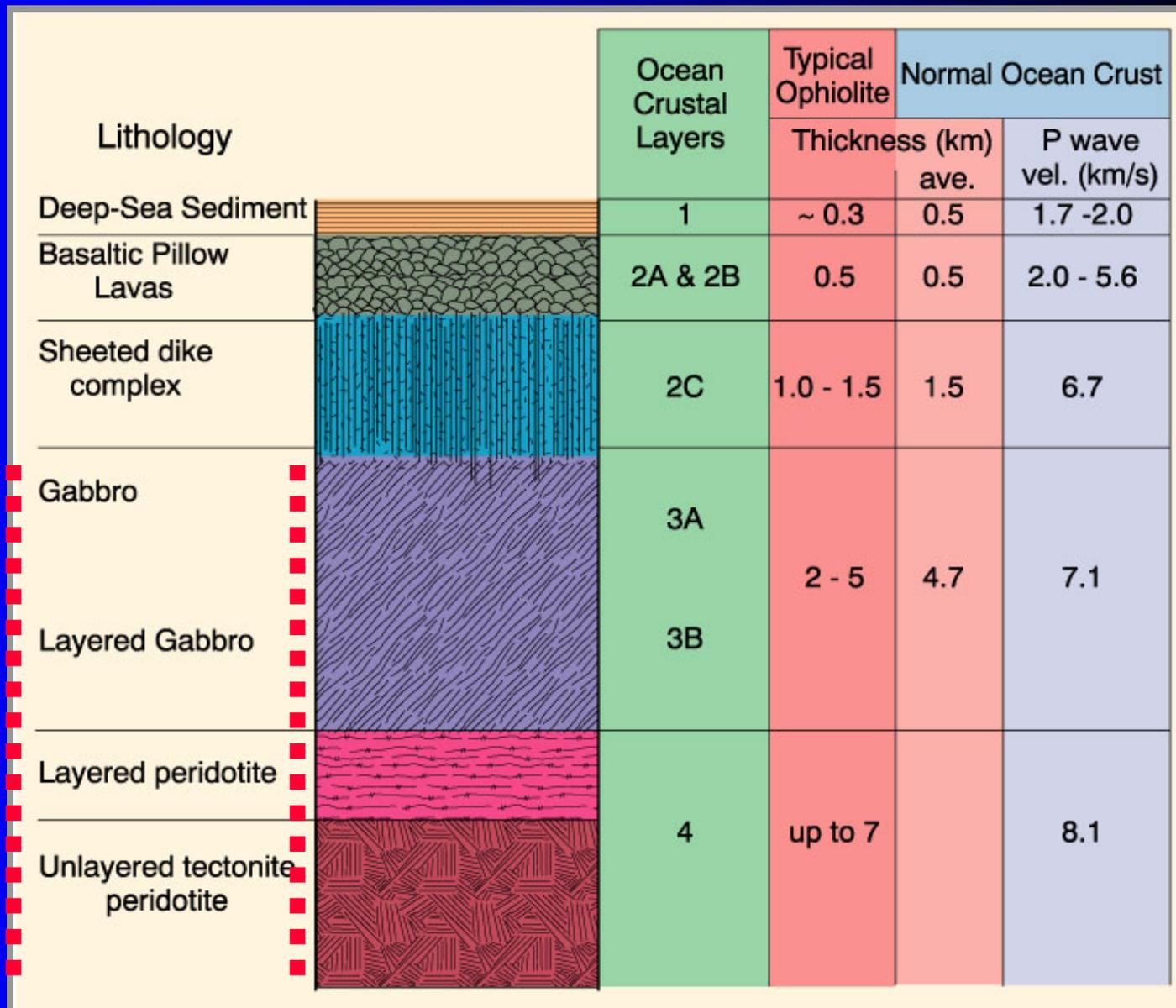
Каноническое строение океанической коры (хессовского типа)

I. Глубоководные осадки

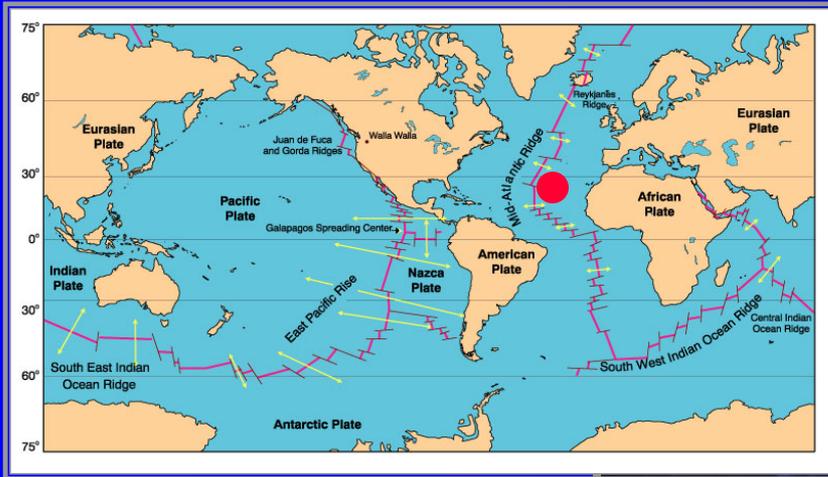
II. Пиллоу-лавы и дайковый комплекс

III. Изотропные и расслоенные габбро

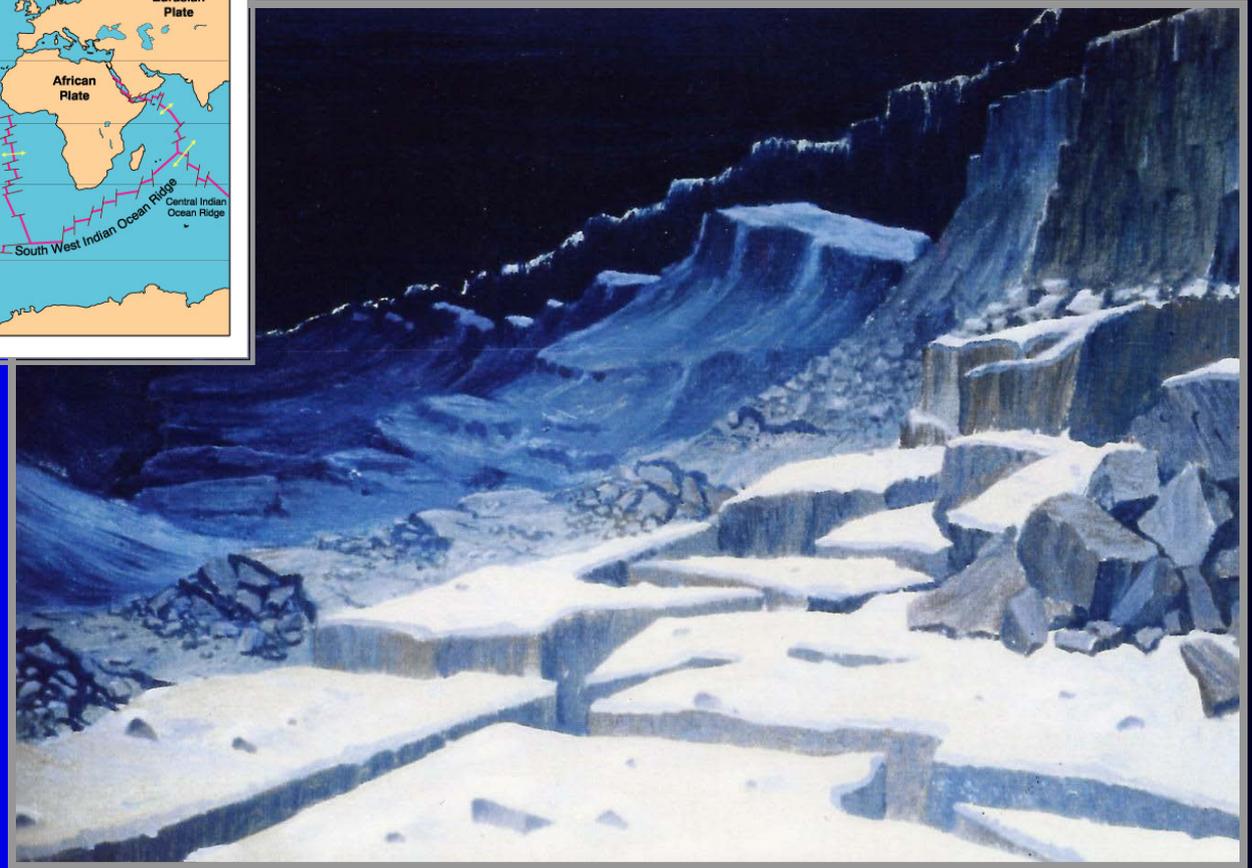
IV. Расслоенные и тектонизированные перидотиты



Вид на восточный борт рифтовой долины САХ к северу от разлома 15-20 с.ш.



Протяженные
обнажения
океанических
перидотитов
(мантйных
реститов)



Рисунок, выполненный профессором Л.В. Дмитриевым
с борта ГОА "Наутил" в 1992 г. (проект FARA)

Расслоенные габбро офиолитов Омана (пример слоя 3В)

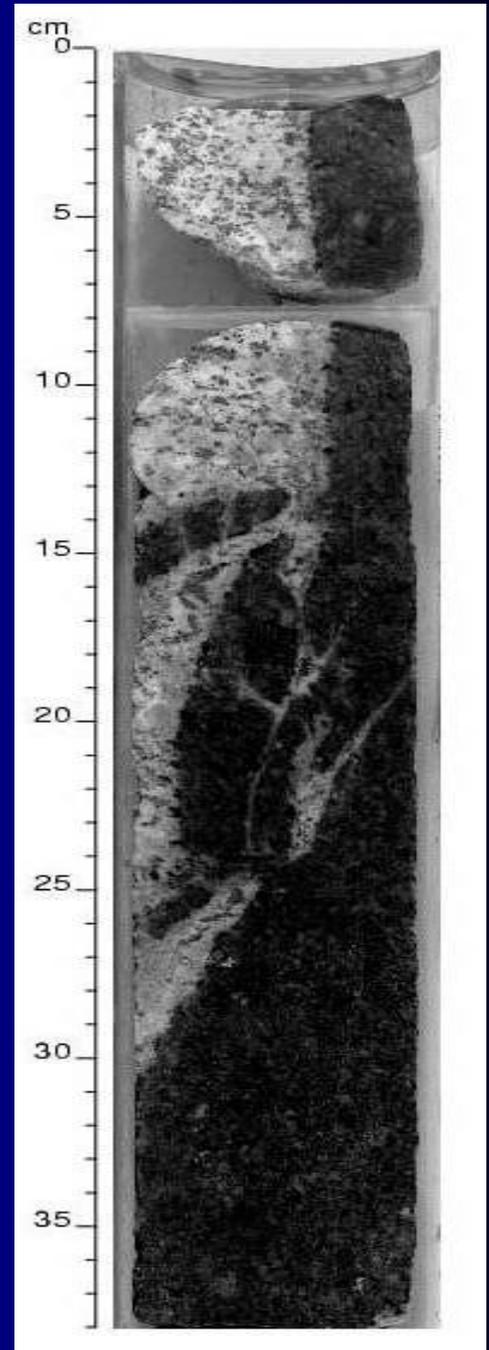


Жильные плагиограниты в офиолитах Омана



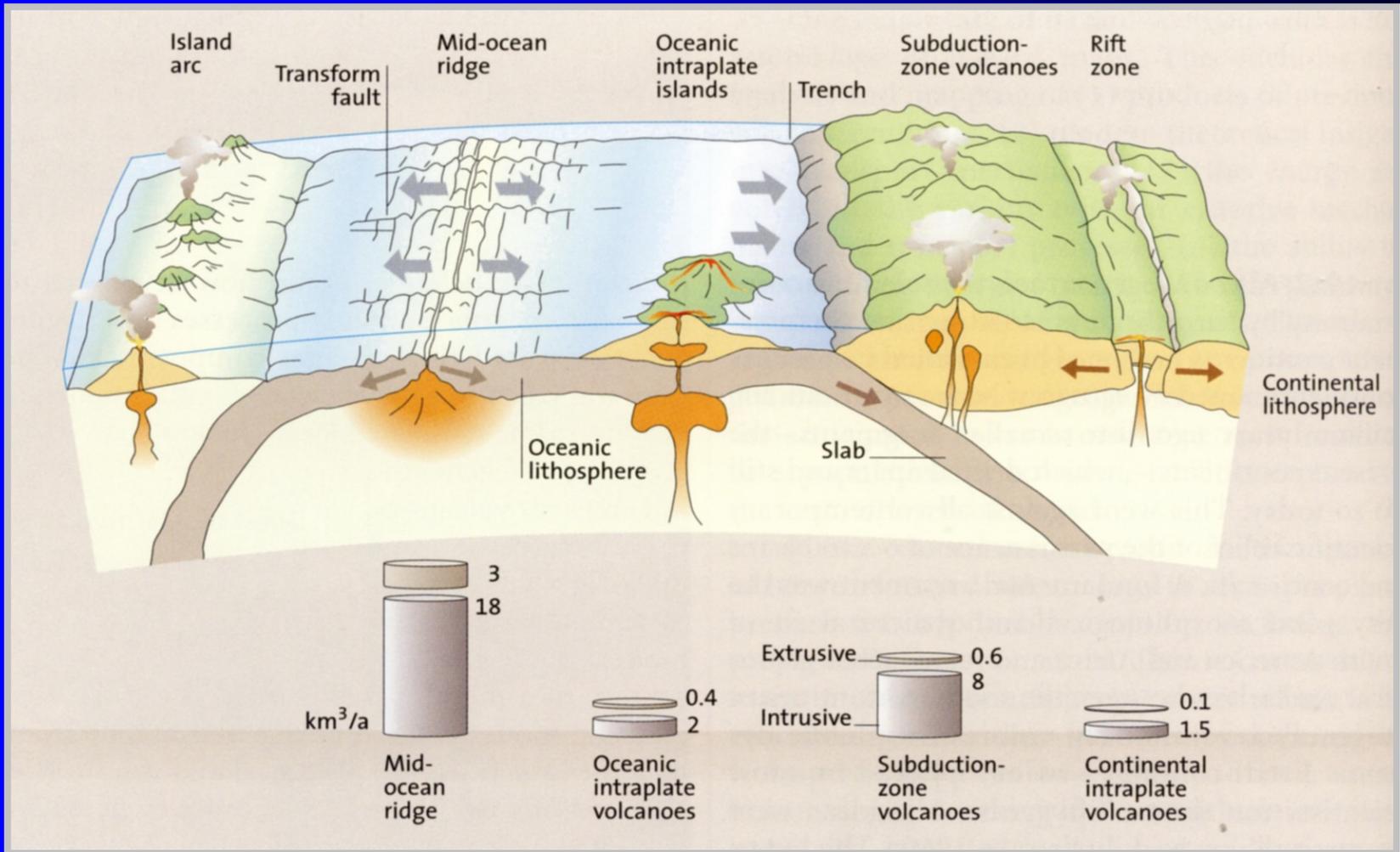
Sandrin Feig permission

Плагиограниты из керна скважин современных океанов



**Соответственно главным структурам океанов
выделяются плутонические комплексы:**

**срединно-океанических хребтов (СОХ)
океанических островов и подводных гор**

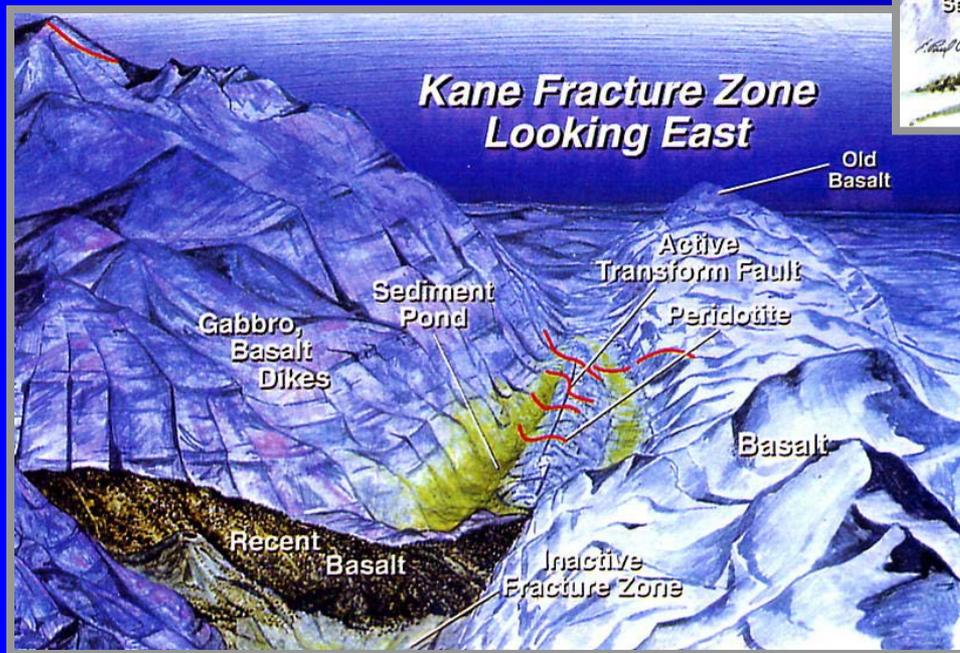
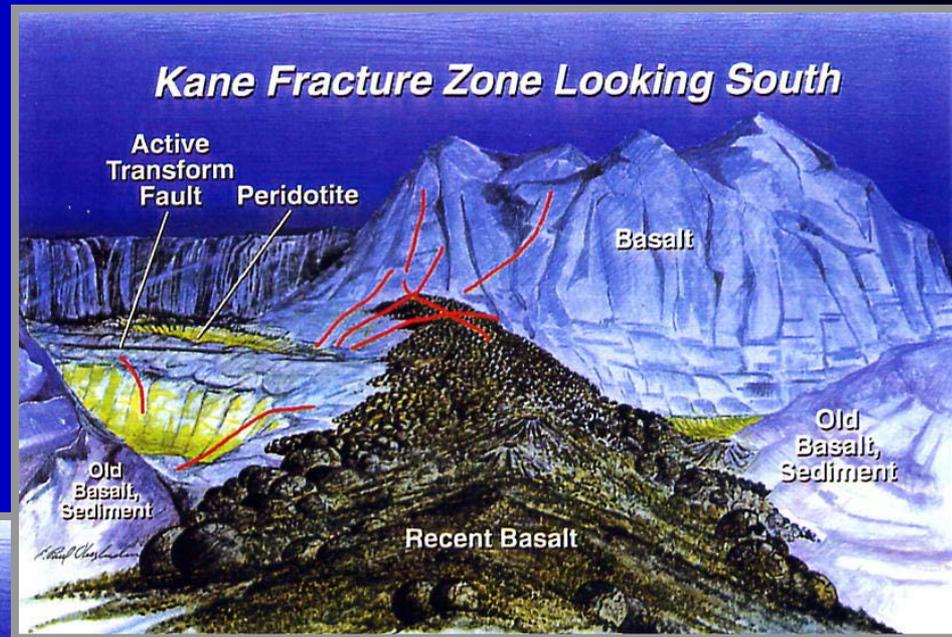
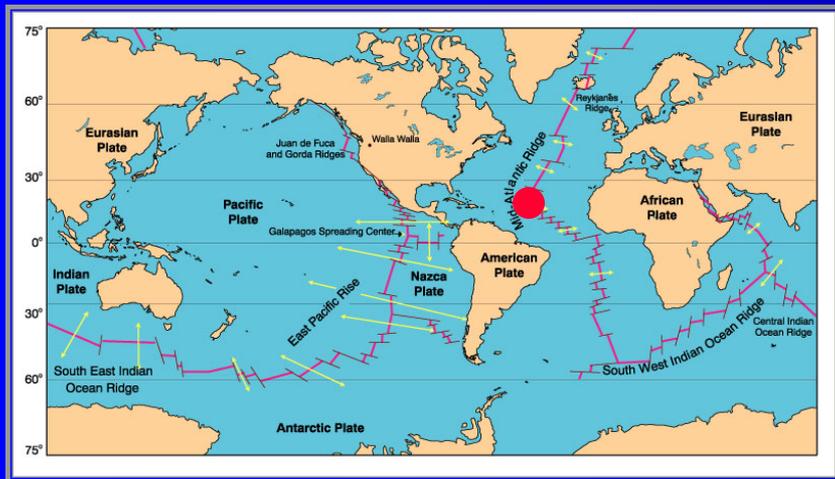


Плутонические комплексы СОХ подразделяются на:

- *низкоскоростные и*
- *высокоскоростные зоны океанического спрединга*

Низкоскоростные СОХ являются наиболее благодарным объектом для исследования плутонических комплексов, поскольку их гребневая зона сложена корой хессовского типа (перидотиты + габбро)

Обнажения к югу и востоку от разломной зоны Кейн



Обнажения перидотитов и габброидов в уступах трансформного разлома. Дно рифтовой долины сложено пиллоу-лавами.

Наблюдения с борта ГОА «Шинкай», 1995 г.

Главные компоненты плутонических комплексов низкоскоростных зон

(Срединно-Атлантического и ЮЗ Индийского хребтов)

СЕРПЕНТИНИЗИРОВАННЫЕ МАНТИЙНЫЕ ПЕРИДОТИТЫ

лерцолиты, гарцбургиты и
дуниты (в САХ)

ЖИЛЬНЫЕ ГРАНИТОИДЫ

Плагииграниты
(трондьемиты)

ИНТРУЗИВНЫЕ (КУМУЛЯТИВНЫЕ) ГАББРО

1. **Нормальные габброиды:**
троктолиты, $Ol-Cpx-Pl-$
габбро и габбронориты,
2. **Гнейсовидные габбро:**
 $Pl-Cpx-Opx-Mt-Ilm-Ap \pm Bi$

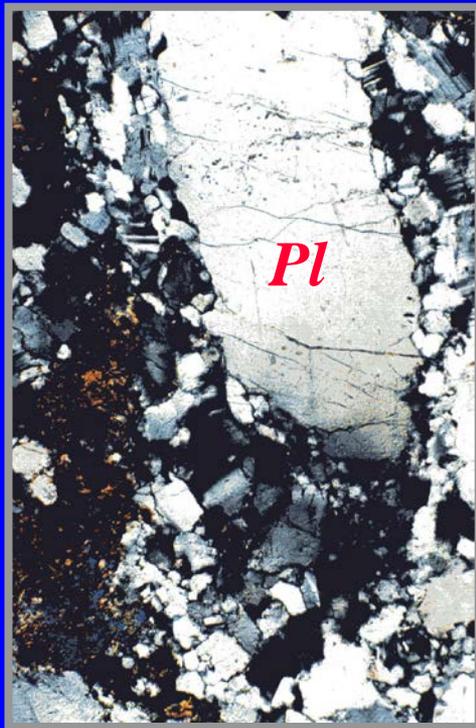
*Метаморф изованные
аналоги*

АМФИБОЛИТЫ

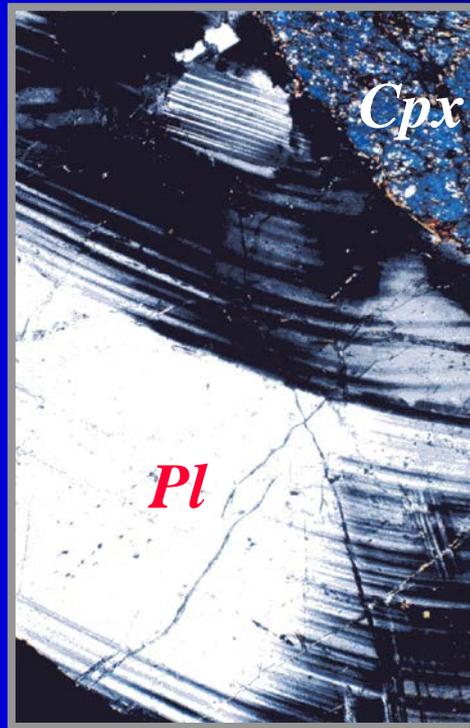
1. массивные,
2. сланцеватые

Структуры океанических габбро и дунита, формирующиеся в результате:

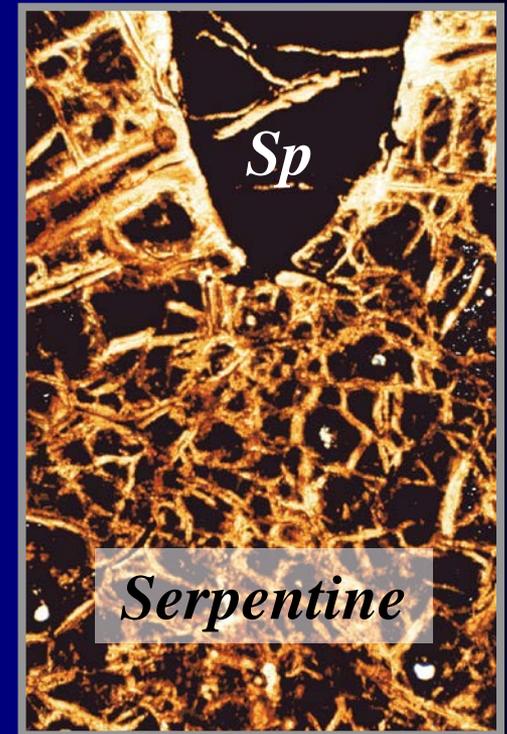
- (а) перекристаллизации, (б) катакластического воздействия, (в) метасоматических процессов



(а) Гнейсовидное габбро с реликтовыми зернами и необластами Pl



(б) Офитовое габбро с признаками катаклаза в двойниках



(в) Серпентинизированный дунит (wall rock process)

ГЛАВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, формирующие строение океанической литосферы

МАГМАТИЧЕСКИЕ

1. Выплавление MORB-магм и формирование обедненных мантийных реститов
2. Дифференциация MORB-магм в промежуточных камерах
3. Плавление линз и даек основного состава в условиях малоглубинной мантии и образование плагиогранитов (трондъемитов)

МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ

Последовательное изменение структуры и состава пород океанической литосферы по мере их воздымания в осевой зоне СОХ

ГЛАВНЫЙ ФАКТОР:
взаимодействие с флюидом морского происхождения

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ

Генетическое значение этих процессов



МАГМАТИЧЕСКИЕ

Определяют химическое разнообразие и особенности первичного минерального состава базальтов, габброидов, перидотитов и плагиогранитов



МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ

Формируют вещественный состав консолидированной океанической коры и в конечном счете определяют детали пространственного строения plutonic complex COX



ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ

Задают металлогеническую специфику и баланс вещества гидротермальных систем COX ("черные курильщики", "метановые струи" и другие)

Распределение известных субмаринных гидротермальных систем

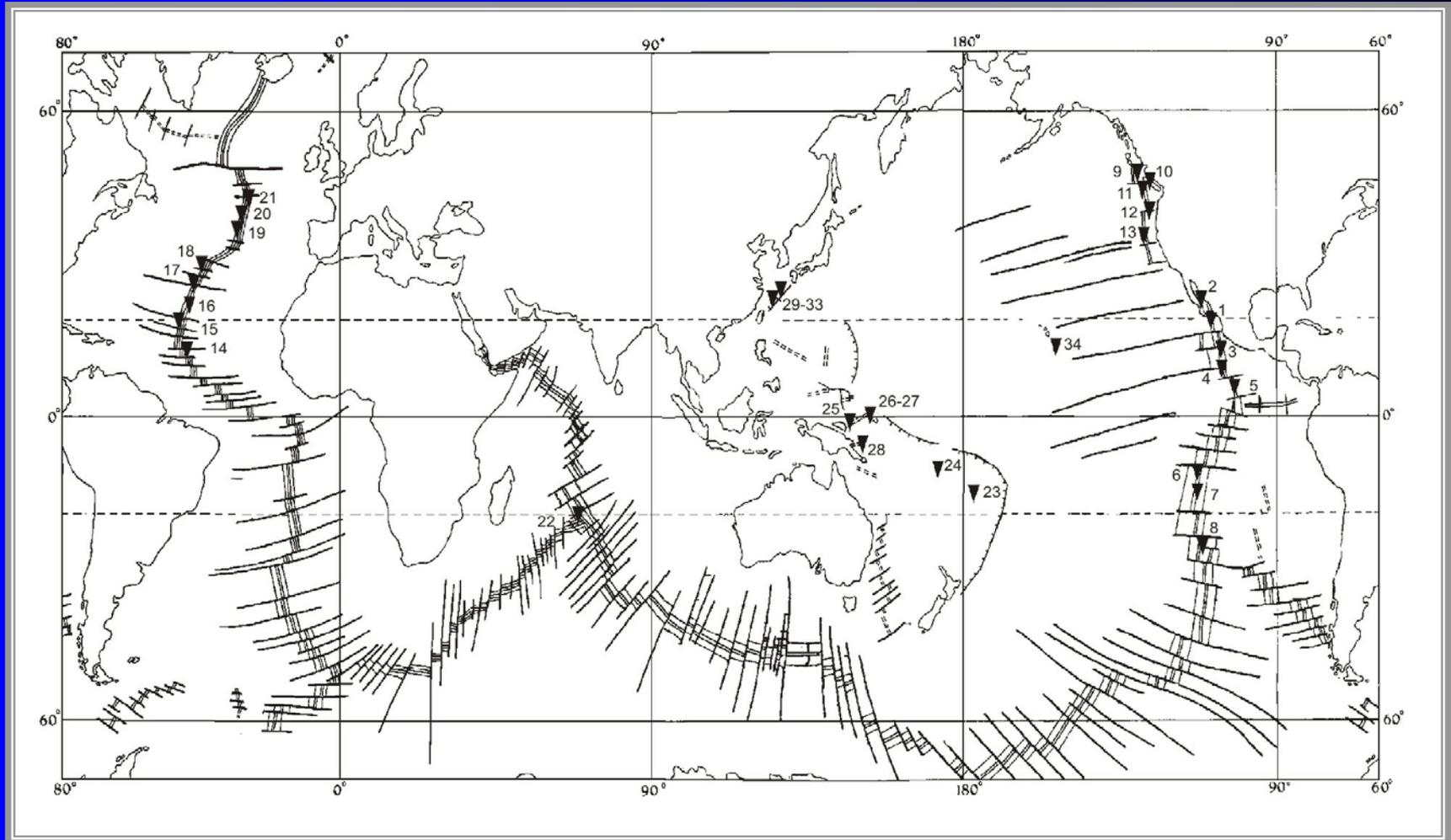
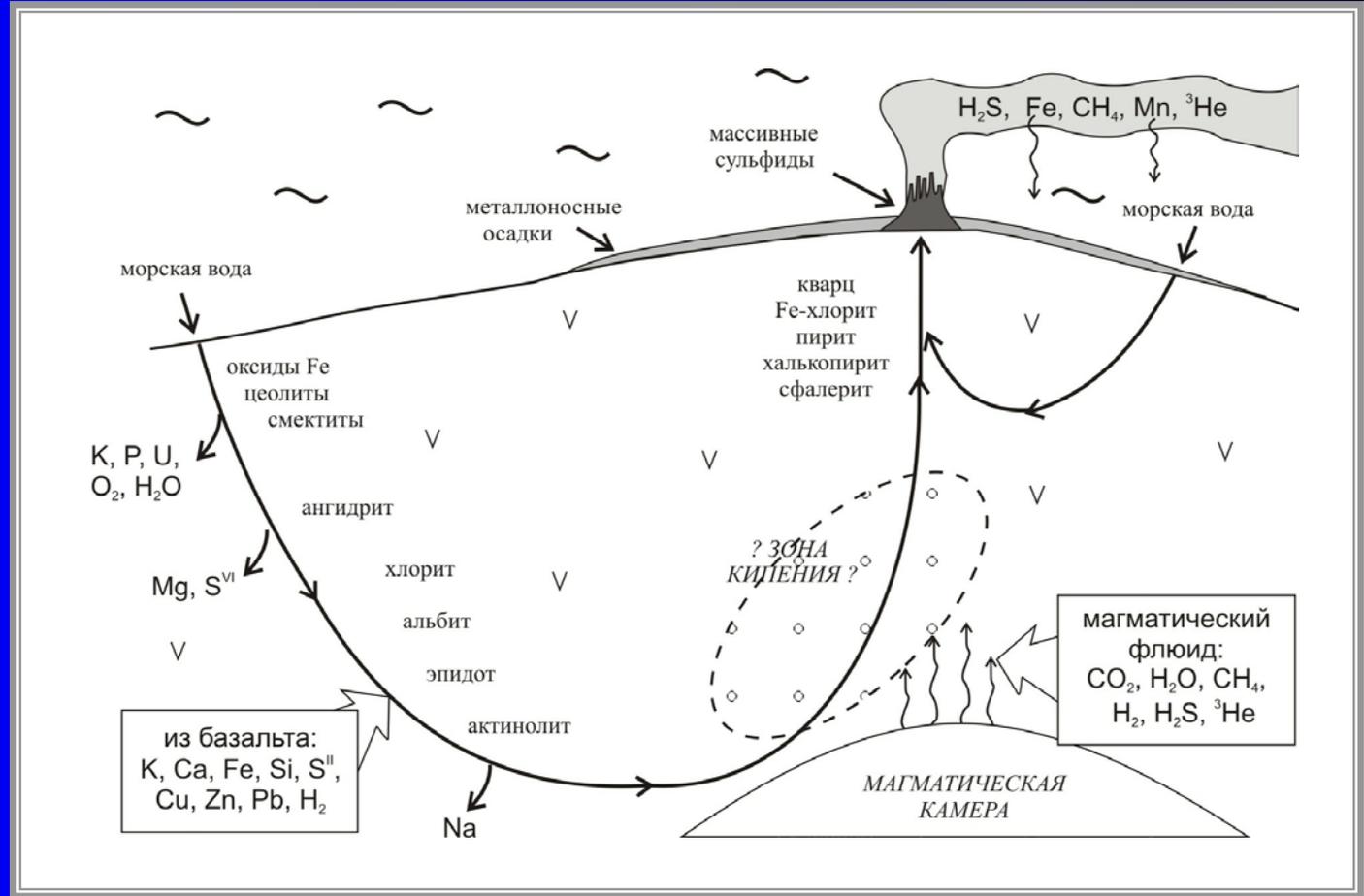
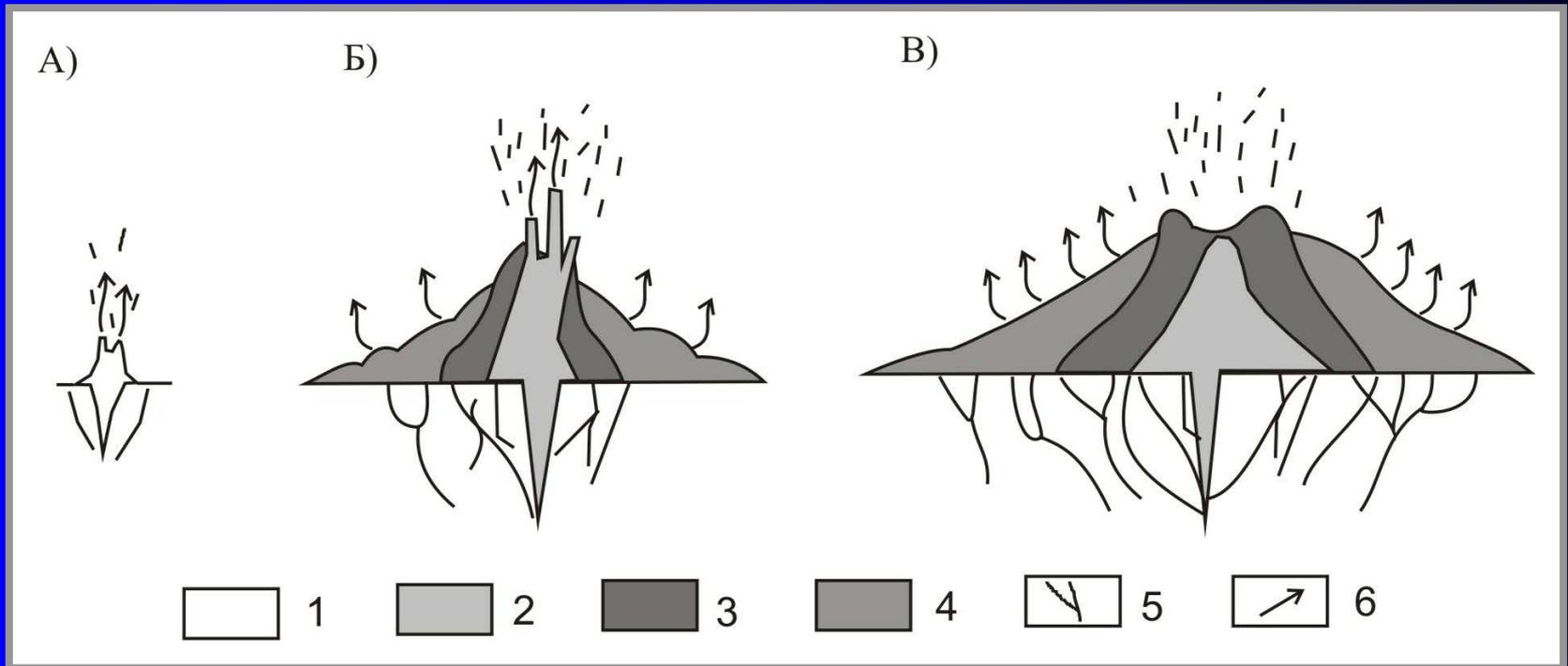


Схема геохимических процессов в гидротермальной системе срединно-океанического хребта



Гричук, 2004

Схема эволюции “черного курильщика”

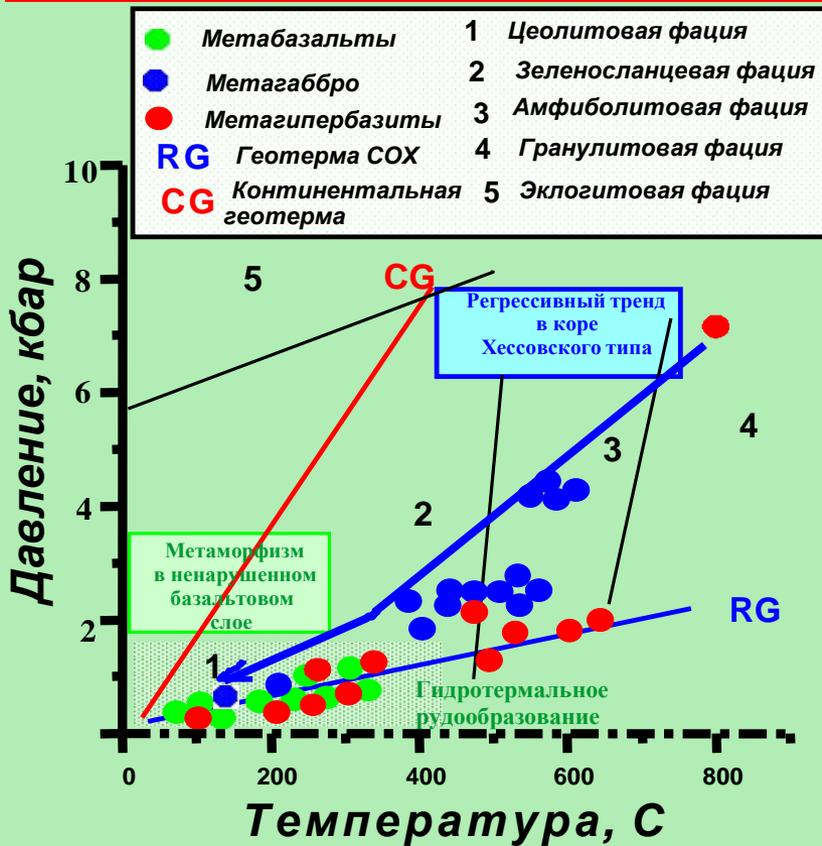


По: (Hekinian, Fouquet, 1975) с изменениями Гричука (2004)

- А) стадия формирования ангидритовой “эмбриональной” постройки на дне;**
Б) стадия высокотемпературной гидротермальной деятельности и формирования сульфидной постройки;
В) стадия диффузной гидротермальной деятельности: 1 – ангидрит; 2 – сульфиды Си и Fe; 3 – сульфиды Zn и Fe; 4 – низкотемпературные сульфиды Fe; 5 – прожилково-вкрапленная минерализация в базальтах; 6 – направление движения гидротермальных растворов.

Регрессионный характер метаморфизма океанических пород

Ретроградный тренд океанического метаморфизма отражает воздымание глубинных пород океанского фундамента к поверхности океанического дна

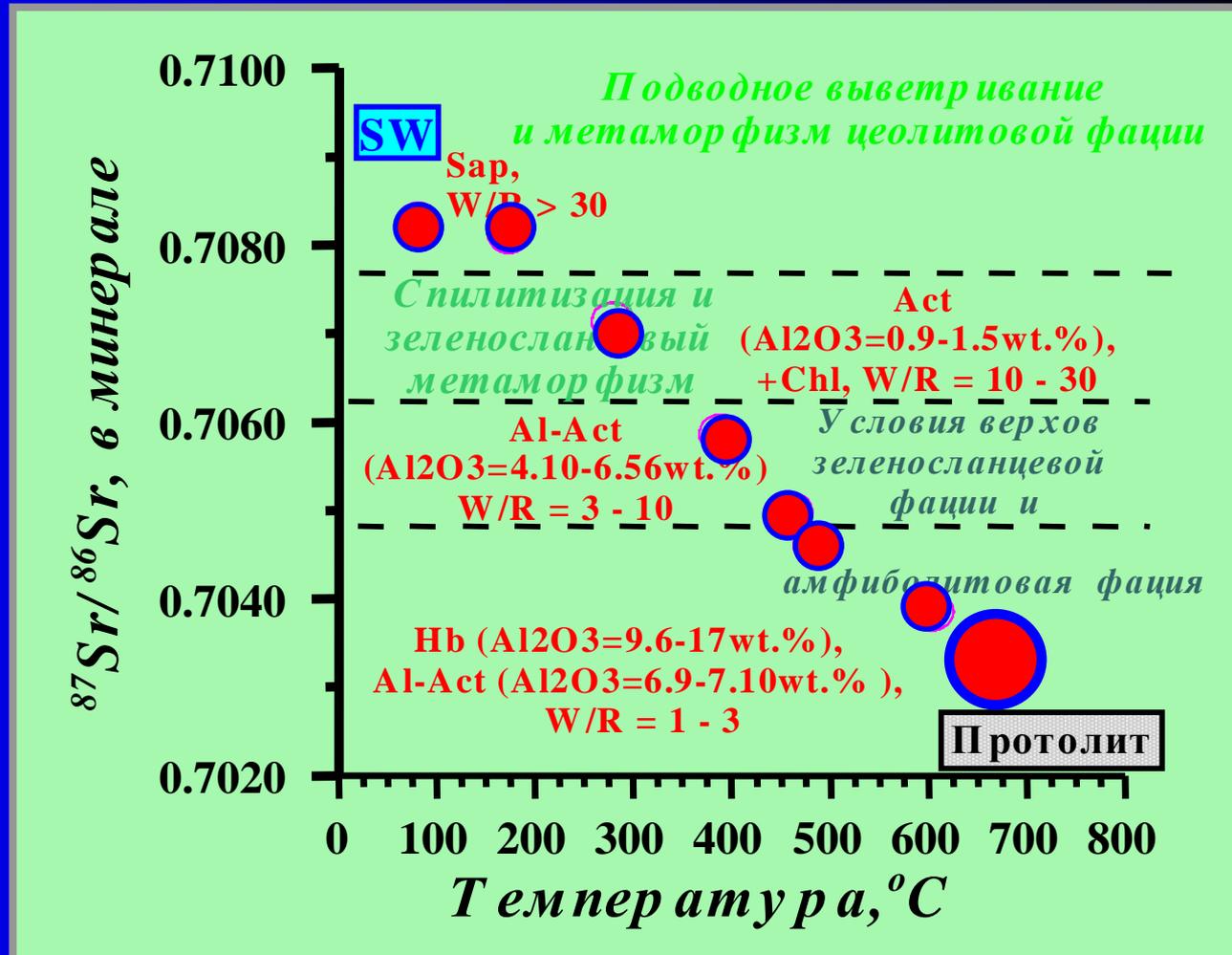


Метаморфизм в хессовском разрезе океанической коры: регрессивный тренд, наиболее полно описывающий тектоническую и вещественную эволюцию корово-мантийного субстрата по мере его подъема под осевой зоной СОХ

Фациальная схема океанического метаморфизма (Силантьев, 1995 г.)

Изотопный состав Sr в метаморфогенных минералах из метагаббро САХ

в зависимости от температуры и отношения вода-порода W/R
(Силантьев, Костицын, 1990)



История подъема пород плутонического комплекса САХ, записанная в изотопном составе Sr во вторичных фазах, образованных при разных температурах и на разных уровнях глубинности

Индикаторная роль интрузивных пород (условно III слоя)

НА МАГМАТИЧЕСКОЙ СТАДИИ

1. Геохимический тип мантийного источника и степень деплетированности (*Sr-Nd, PЗЭ*)
2. Внутрикоровая эволюция магм (вариации главных и примесных элементов в сериях пород, фазовый состав магм, T - P - fO_2 условия и составы минералов)

НА МЕТАМОРФИЧЕСКОЙ СТАДИИ

3. Условия метаморфического преобразования протолита ($T^{\circ}C$, W/R):

тип минерального парагенезиса, состав минералов (Fe и Ti в Sp , Al и Ca в Px , Fe и Cl в $Serp$, составы сосуществующих $Amph$ и Chl , изотопный и состав Sr в породах и минералах)

Индикаторная роль перидотитов (условно IV слоя)

НА МАГМАТИЧЕСКОЙ СТАДИИ

1. Геохимический тип мантийного источника и степень его деплетированности (*Sr-Nd*, *P3Э*, минеральный состав)
2. Степень плавления мантийного источника (*Cr#* в реликтовой шпинели, *Mg#* в *Ol* и пироксенах, *Al* и *Na* в *Orx* и *Srx*, MgO/SiO_2 и Al_2O_3/SiO_2 в породах)
3. Температура субсолидусного переуравновешивания (составы сосуществующих минералов)

НА МЕТАМОРФИЧЕСКОЙ СТАДИИ

4. Условия метаморфического преобразования протолита ($T^{\circ}C$, W/R):
тип минерального парагенезиса, состав минералов (*Al* и *Cl* в *Amp_h*, *An* в *Pl*, *Mg#* в хлорите), вариации главных и примесных элементов в сериях пород, фазовый состав магм, изотопный состав *Sr* в породах и минералах

Петролого-геохимические особенности плутонического комплекса САХ

МАГМАТИЗМ

Распределение индикаторных характеристик в габброидах и перидотитах вдоль простирания осевой зоны САХ соответствует его крупномасштабной геохимической сегментации

Эволюция магматических систем, формирующих плутонический комплекс, связана с многоактным плавлением и смешением расплавов различной г/х специфики

Существует вещественная гетерогенность мантийного магматизма САХ, проявленная в базальтах и плутонических породах

В гребневой зоне САХ присутствуют мантийные реститы, генетически не связанные с продуктами современного магматизма рифтовой долины

Петролого-геохимические особенности плутонического комплекса САХ

МЕТАМОРФИЗМ

ГЛАВНЫЙ АГЕНТ ОКЕАНИЧЕСКОГО МЕТАМОРФИЗМА:
флюид морского происхождения проникает до основания океанической коры (вплоть до петрологической границы Мохо)

Взаимодействие флюида с габброидами происходит в условиях пограничных между магматическим и метаморфическим этапами образования плутонического комплекса САХ

Степень протекания реакций с участием флюида зависит от отношения вода-порода (W/R) на внутрикоровом отрезке траектории подъема мантийного диапира

Сегментация САХ и условия метаморфизма коррелируют с мощностью литосферы и глубиной отделения расплава от мантийного диапира

Схема процессов, формирующих строение океанической литосферы

**Активная Зона
Перехода
Океан-Континент**

Современный Океанический Бассейн

**Субдукционное
Преобразование
Океанической
Литосферы**

Нептунические Процессы



Плутонические Процессы

**Океанический
метаморфизм**

**Гидротермальная
деятельность**

**Подводное
выветривание**

**Частичное
плавление**

**Магматическое
взаимодействие**

**Мантейный
метасоматизм**

**Субсолидусная
перекристаллизация**

Определяющие параметры и агенты

Плутонические процессы

**Магматические расплавы и флюиды,
Температура,
Давление,
Степень плавления,
Состав источника расплава**

Нептунические процессы

**Морская вода и ее производные,
Температура,
W/R (отношение масс вода/порода),
Давление,
Состав протолита**

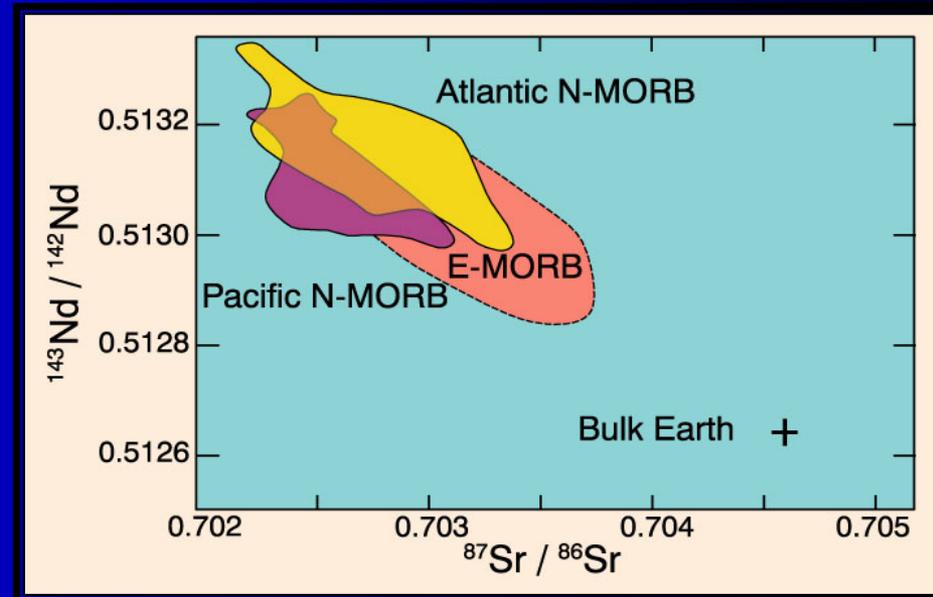
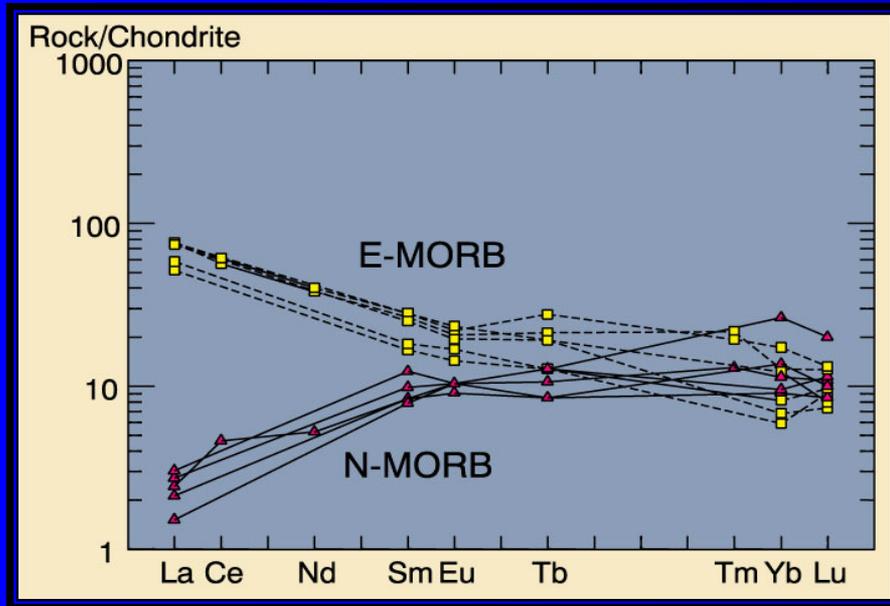
Общая тема:

**МАГМАТИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ ОКЕАНОВ И
ПРОИСХОЖДЕНИЕ ТОЛЕИТОВЫХ СЕРИЙ MORB**

Лекция № 14

**УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
ТОЛЕИТОВЫХ МАГМ СРЕДИННЫХ ХРЕБТОВ**

Распределение РЗЭ и изотопные характеристики базальтов N-MORB и E-MORB



ИСТОЧНИКИ БАЗАЛЬТОВЫХ МАГМ

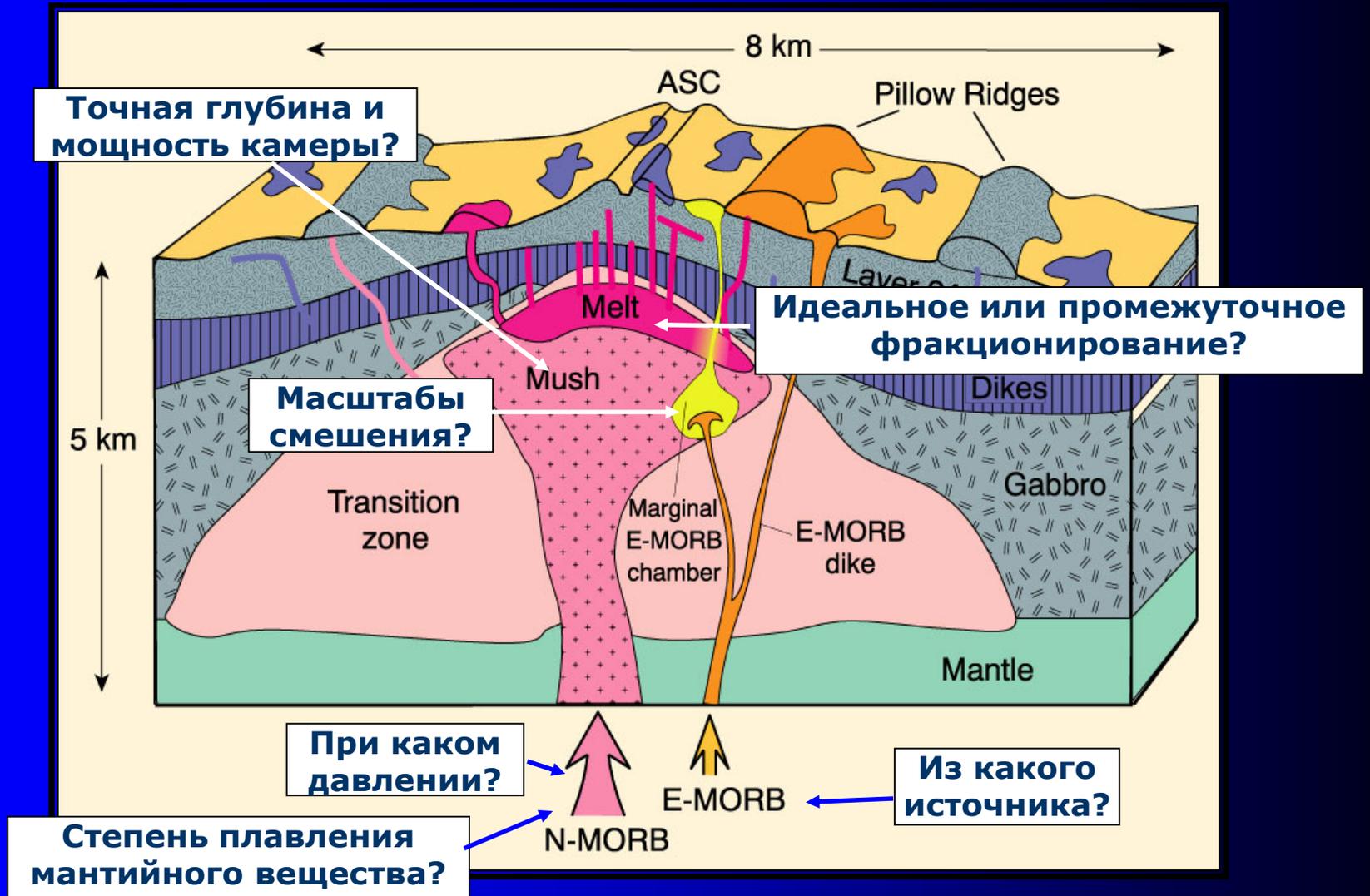
N-MORB

относительно
обедненный

E-MORB

относительно
обогащенный

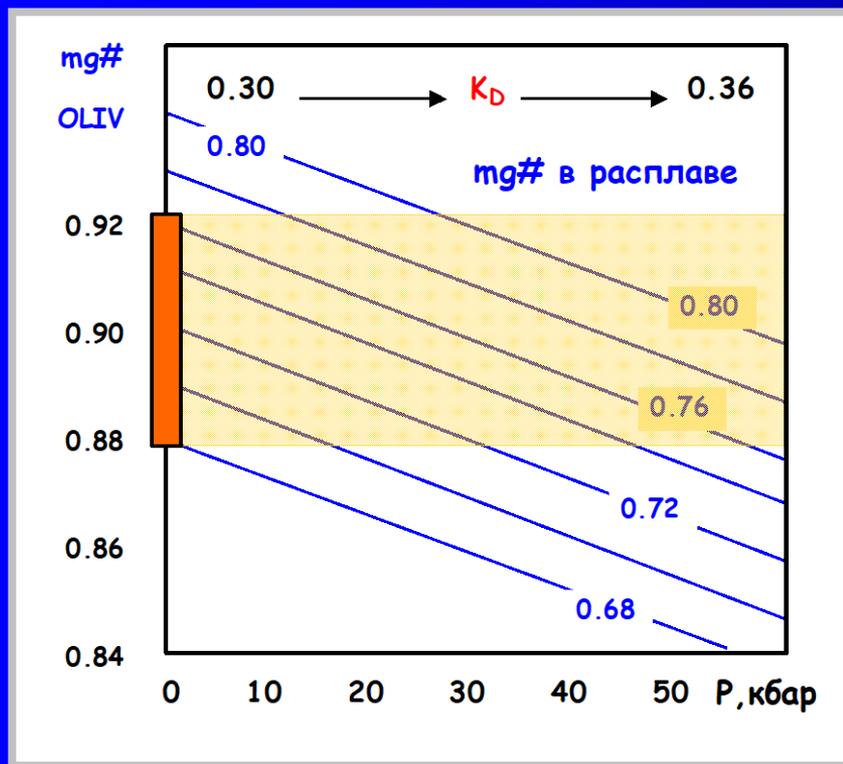
Конкретные проблемы образования базальтов N-MORB и E-MORB в зонах океанического спрединга



Оценка составов первичных и родительских магм срединно-океанических хребтов

Главные источники информации:

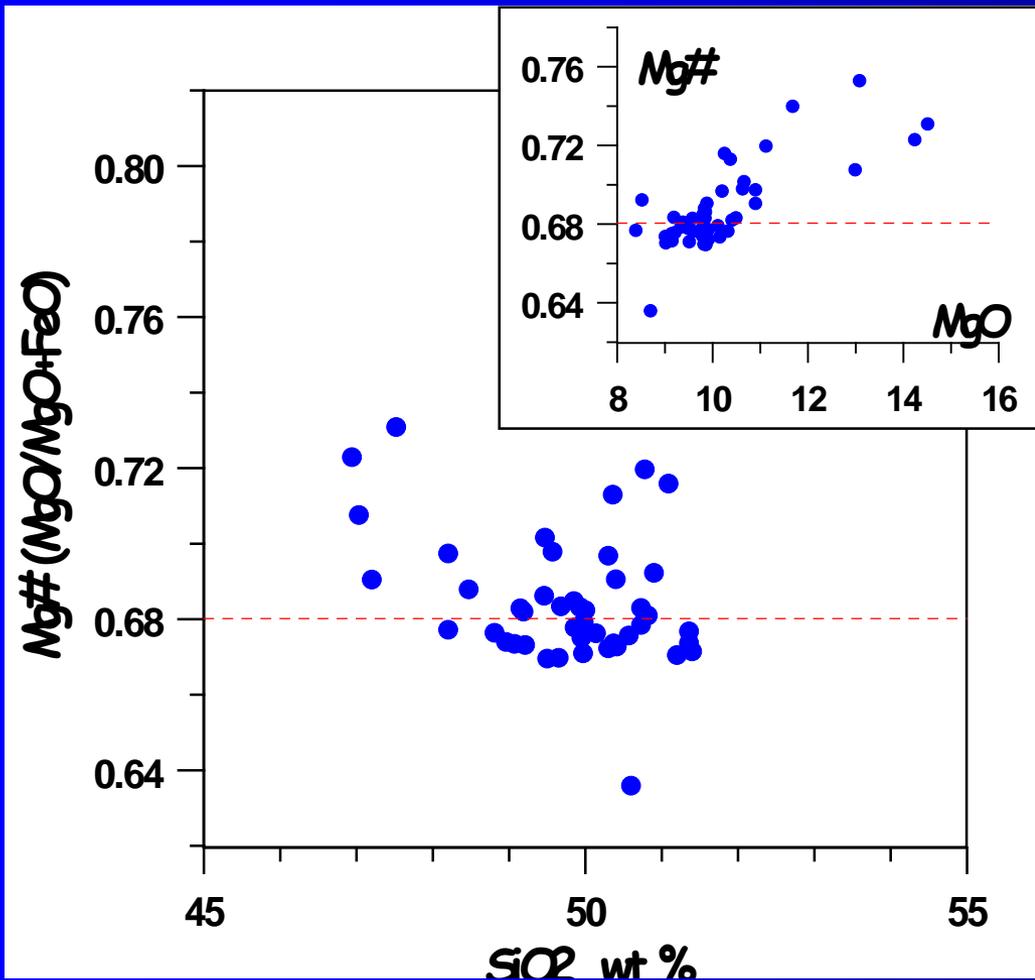
- (1) составы высоко-Mg стекол и базальтов;
- (2) составы примитивных включений в Ol



Аналоги исходных магм следует искать среди составов наиболее магнезиальных базальтов и стекол

Но! Большинство толеитов - уже фракционированные породы с $MgO < 8\%$ и пониженным содержанием Ni

Петрохимические параметры наиболее примитивных базальтов и стекол СОХ



Из 1700 анализов
стекловатых разностей N-
MORB, выделено 50
наиболее примитивных

MgO > 9%
SiO₂ - 47-51%
mg# - 0.66-0.76

Эти составы близки
первичному расплаву

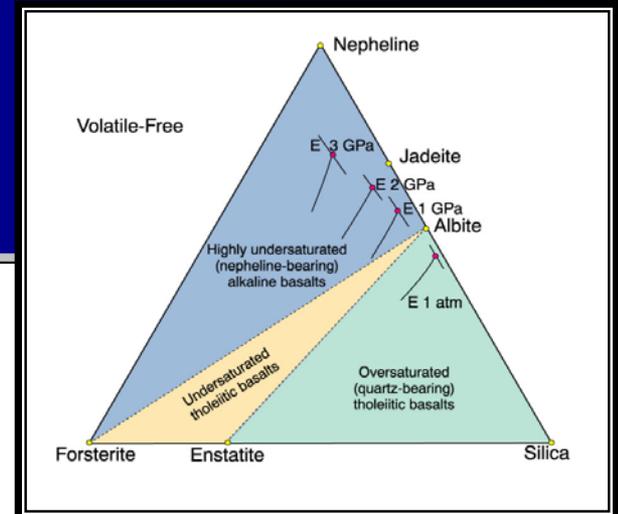
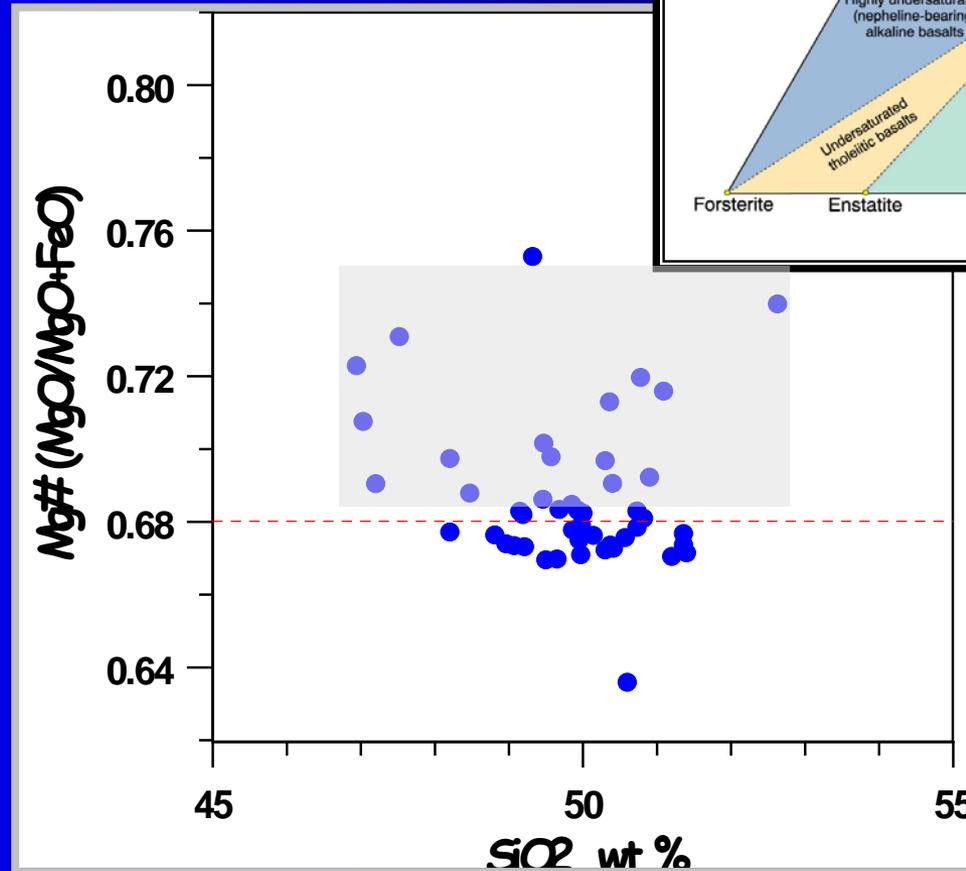
Presnall & Hoover (1987)

Примеры наиболее примитивных базальтов и стекол типа N-MORB (*Presnall & Hoover, 1987*)

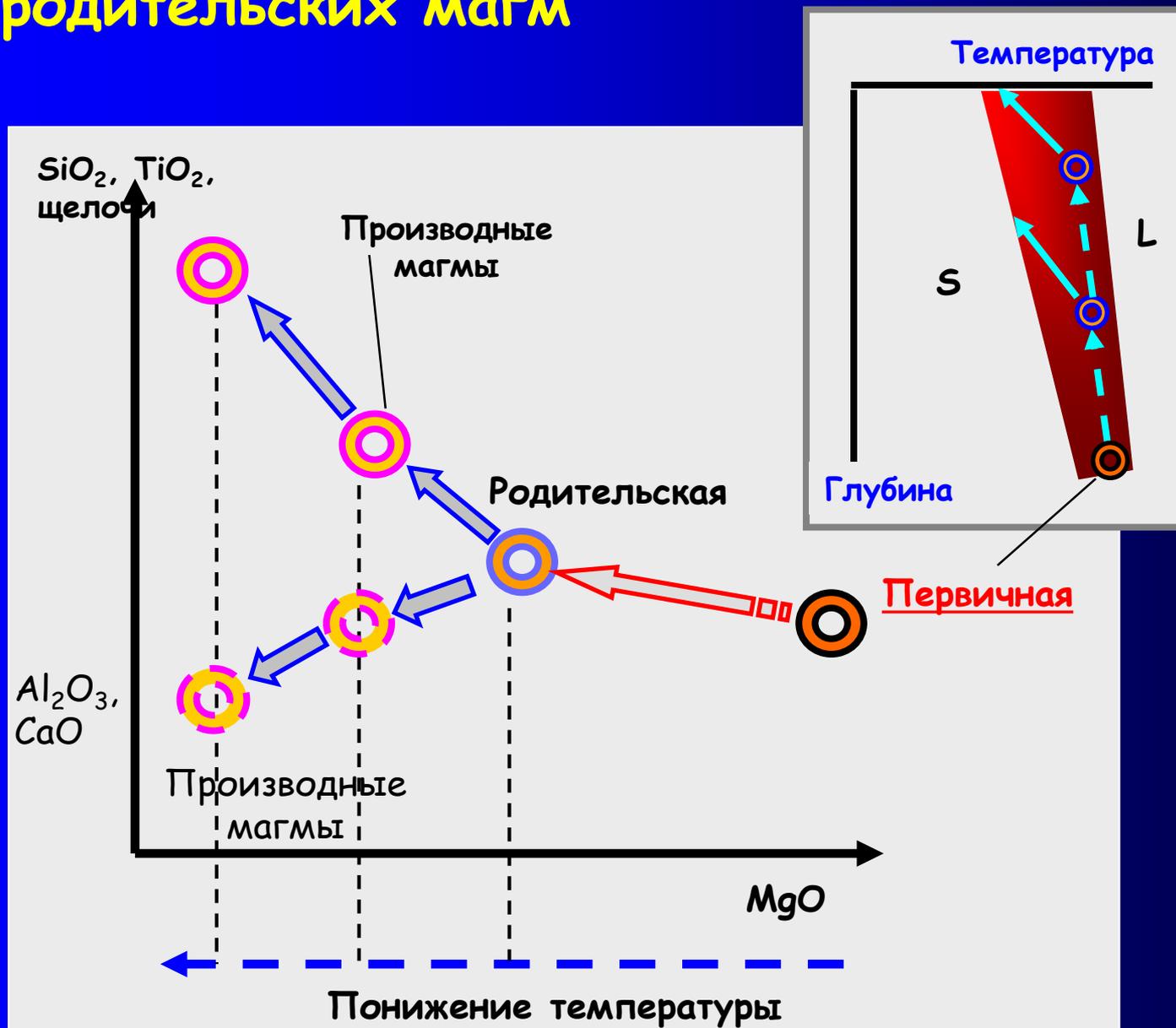
	All-77-76-61	ARP-74-10-16	Y-87-6-20
SiO ₂	51.20	49.47	47.52
TiO ₂	0.84	1.04	0.73
Al ₂ O ₃	15.00	14.57	14.39
FeO	7.90	8.08	9.52
MnO	0.16	0.20	-
MgO	9.02	10.66	14.51
CaO	13.3	12.21	10.98
Na ₂ O	1.89	2.19	1.84
K ₂ O	0.08	0.16	-
P ₂ O ₅	-	0.09	-
Mg#	0.67	0.70	0.73

Факторы, определяющие вариации состава примитивных расплавов N-MORB

- химический состав мантийного источника
- степень плавления источника
- глубина магмогенерации



Возможные генетические соотношения первичной и родительских магм



Три этапа решения проблемы образования и эволюции нормальных толеитовых магм:

- 1) Идентификация главных серий или ассоциаций базальтов N-MORB, оценки условий кристаллизации
- 2) Определение состава первичной магмы и параметров магмогенерации
- 3) Расшифровка природы связи родительских магм и первичных расплавов

Экспериментальные исследования условий зарождения и дифференциации примитивных магм

Методы “ПРЯМОГО” и ОБРАТНОГО *экспериментального моделирования*

Непосредственное плавление мантийных пород (лерцолиты, гарцбургиты, пироксениты)

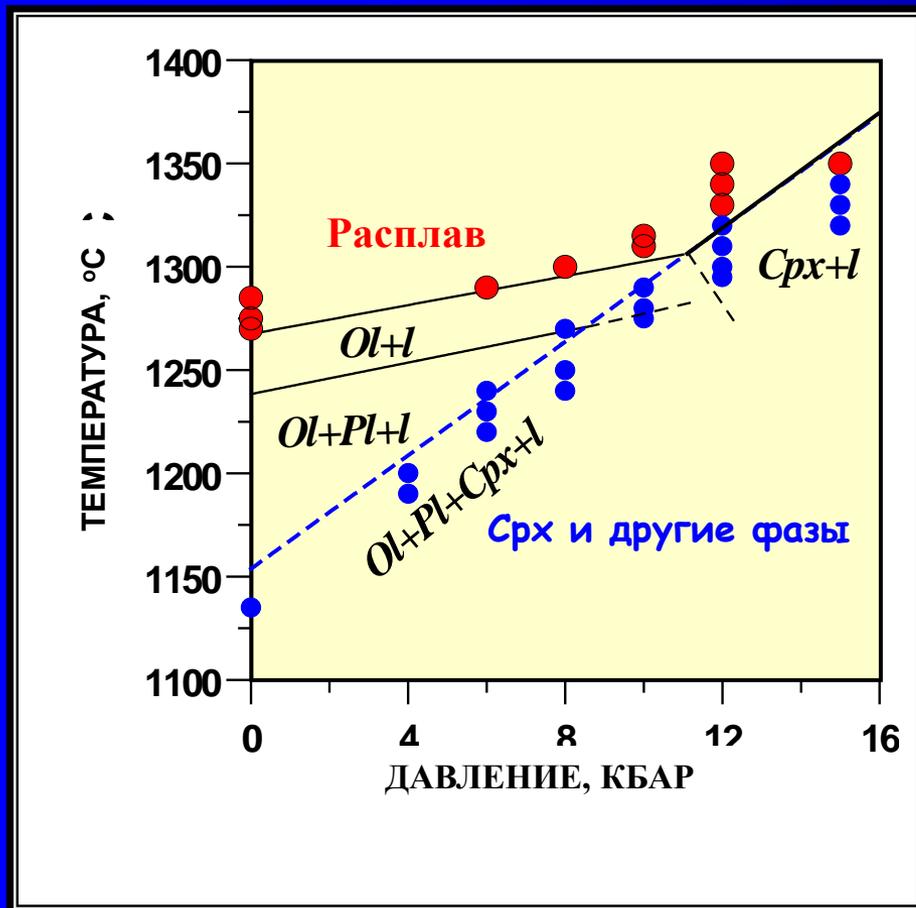
с целью определения степени плавления и P - T параметров,

при которых состав модельной выплавки даст реалистичный прогноз первичной магмы

Для заданного состава высокомагнезиального базальта найти давление равновесия с ассоциацией минералов мантийного рестита

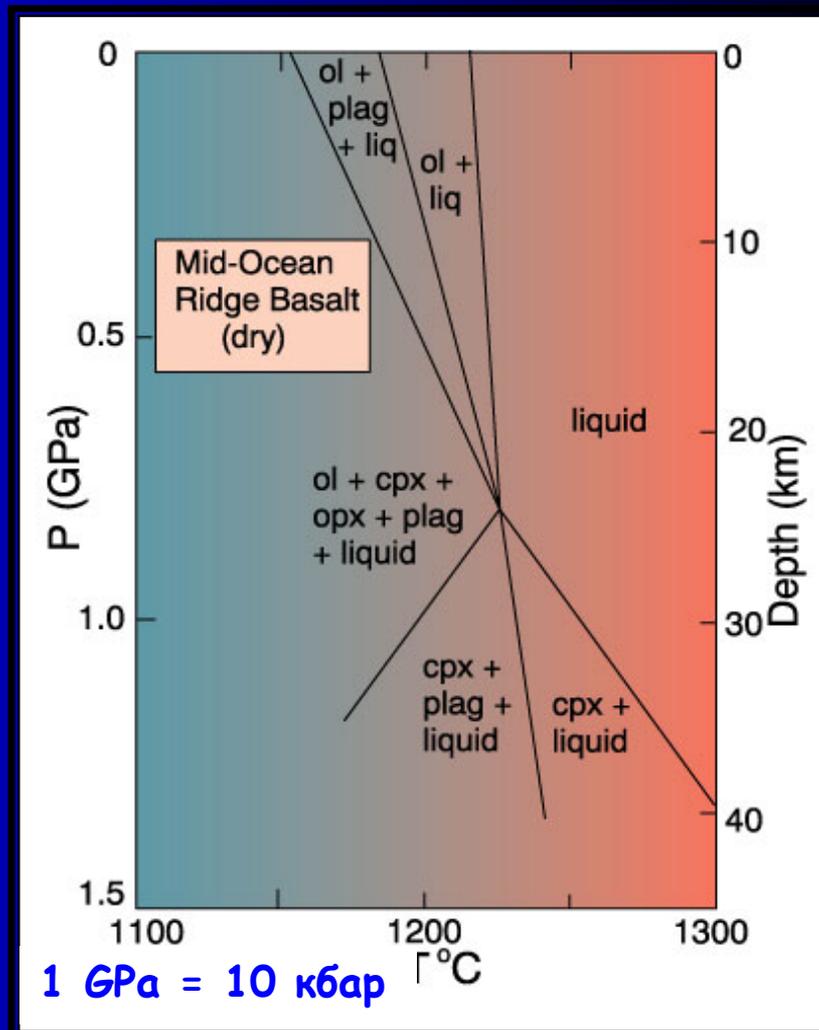
Изучение смены ликвидусных минералов по мере увеличения давления

P-T диаграммы магнезиальных базальтов СОХ как основа обратного моделирования источника ($H_2O=0$)



Данные опыты позволили установить:

- При давлении > 8 кбар на ликвидусе расплава примитивного толеита стабильны Ol и Cpx => перидотитовый состав источника расплавов
- Расширение поля стабильности высоко-Са пироксена с увеличением давления



“Прямое” (*forward*) плавление мантийных гипербазитов как основа реконструкции условий образования первичных магм

Включает экспериментирование с разнообразными гипербазитами (*лерцолиты, гарцбургиты, пироксениты*) и породами основного состава (*амфиболиты, эклогиты*)

Поиск условий плавления, при которых получают экспериментальные стекла близкие по составу наиболее примитивным магнезиальным MORB

Главный результат:

В составе океанической мантии доминируют плагиоклазовые и шпинелевые лерцолиты (Ol-Pl-Cpx-Opx-Sp)

Сравнение экспериментальных и природных "первичных расплавов" для толеитов океанических рифтов (ТОР)

Состав расплава	5 кбар, 1300°C	10 кбар, 1350°C	ТОР-1 <i>(Дмитриев и др., 1984)</i>
SiO ₂	54.1	50.3	49.32
TiO ₂	0.5	0.7	0.60
Al ₂ O ₃	11.0	17.1	15.10
FeO	8.0	7.6	7.65
MnO	-	-	0.20
MgO	13.0	10.4	13.08
CaO	10.0	11.6	12.38
Na ₂ O	1.7	2.2	1.61
K ₂ O	0.3	-	0.06
P ₂ O ₅	-	-	-
Mg#	0.75	0.73	0.75

Оценка степени плавления и диапазона давлений по результатам "прямых" экспериментов

- **Степень плавления исходного вещества** (обычно $F_I = 10-15\%$)

$$C_{ист} = F_I \times C_{расплав} \rightarrow F_I = C_{ист} / C_{расплав}$$

- **Примерный диапазон давлений**

метод графического проецирования природных составов на барометрически калиброванные тройные диаграммы

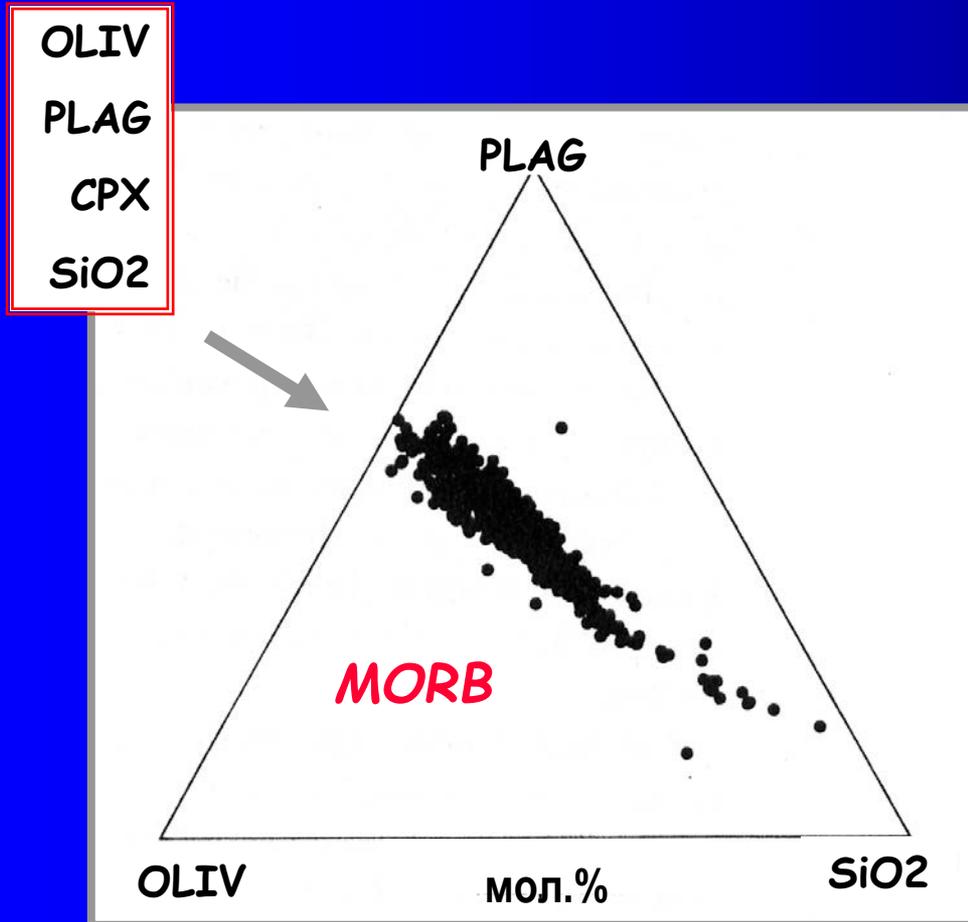
Проецирование составов экспериментальных стекол как основа построения барометрических диаграмм

Состав расплава	5 кбар, 1300°C	10 кбар, 1350°C
SiO ₂	54.1	50.3
TiO ₂	0.5	0.7
Al ₂ O ₃	11.0	17.1
FeO	8.0	7.6
MnO	-	-
MgO	13.0	10.4
CaO	10.0	11.6
Na ₂ O	1.7	2.2
K ₂ O	0.3	-
P ₂ O ₅	-	-
Mg#	0.75	0.73



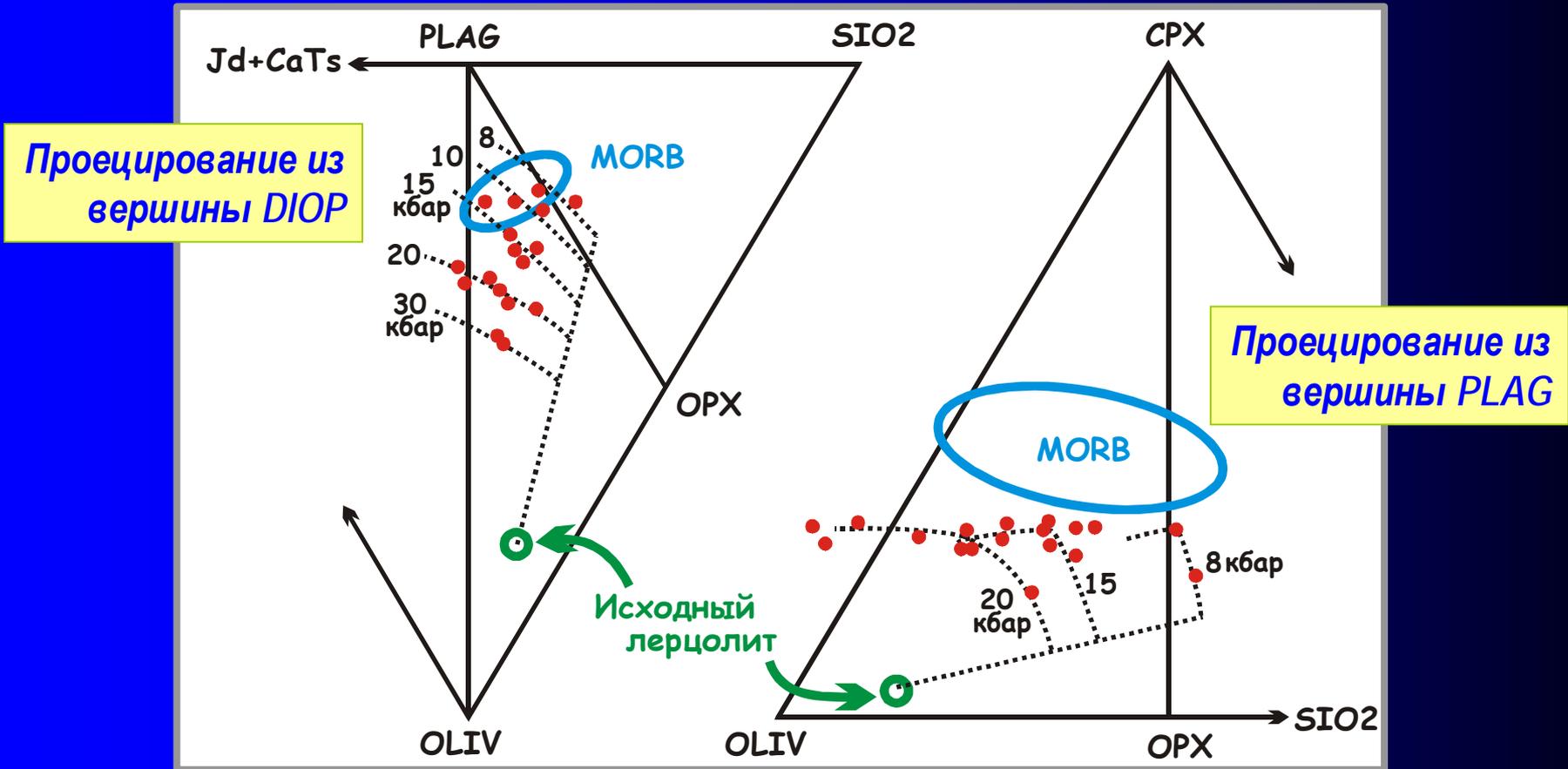
Нормативный состав	5 кбар, 1300°C	10 кбар, 1350°C
Qtz
Ort
Ab
An
Di
Opx
Oliv
Ap
Ilm
Mt
Mg#	0.75	0.73

Проецирование составов природных стекол на плоскость OLIV - PLAG - SiO₂



При проецировании химических составов на тройные диаграммы, один из 4-х компонентов исключается (в данном случае CPX), а оставшиеся приводятся к 100%

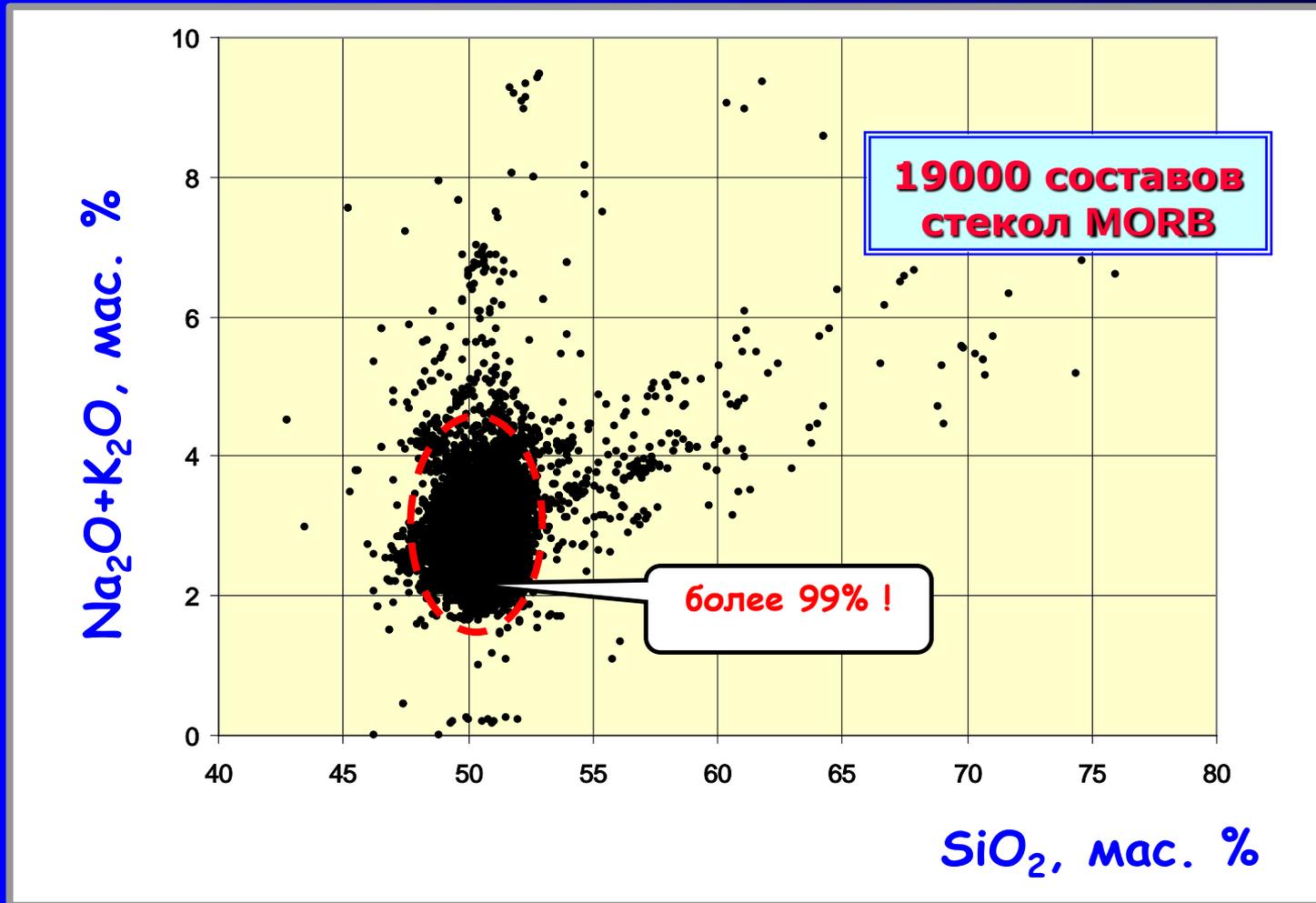
Проецирование по методу (Green and Falloon, 1987)



Чем выше давление, тем меньше лерцолитовые котектики содержат SiO₂ и больше нормативного OLIV

Область зарождения и эволюции первичных расплавов MORB – P < 15 кбар (т.е. глубинам < 50 км)

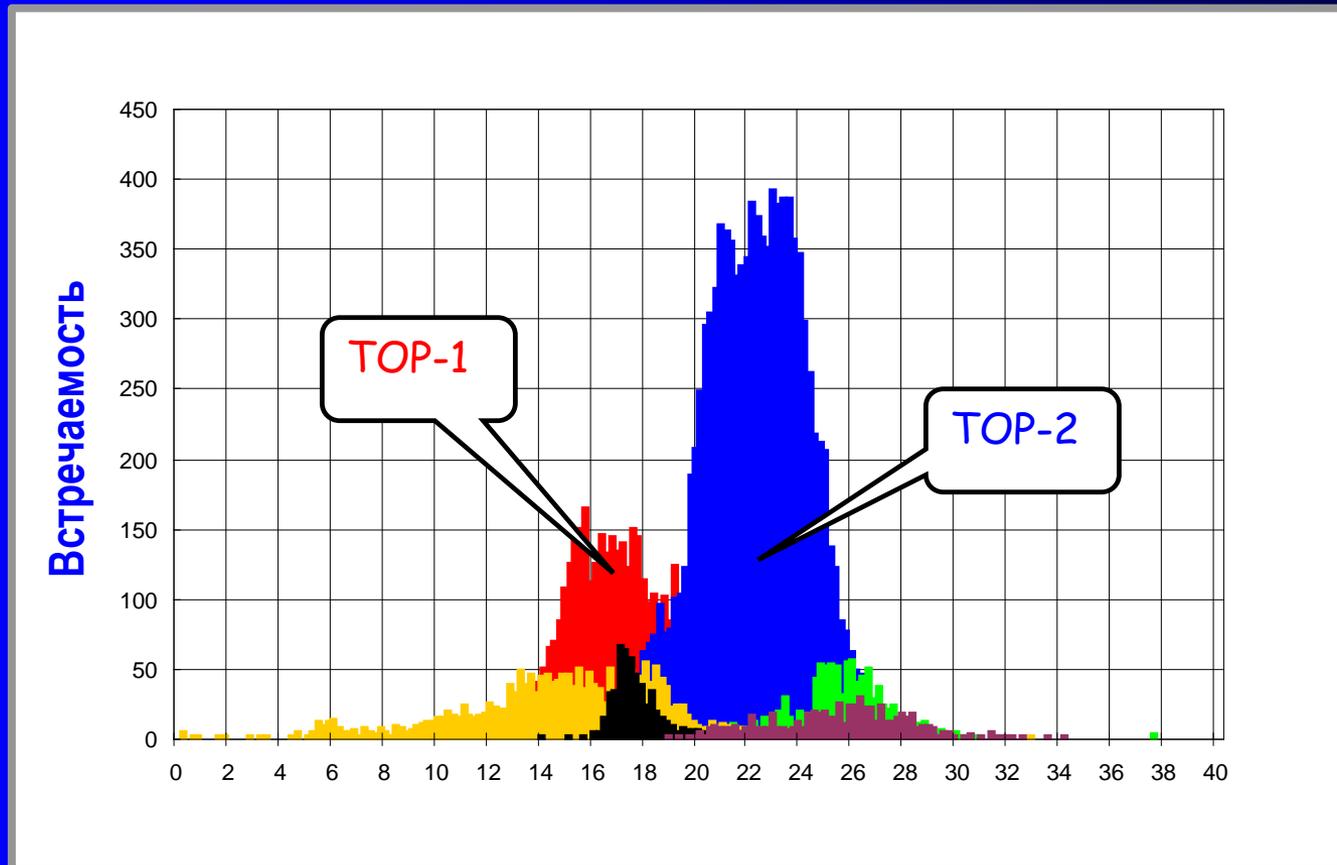
Современные данные о разнообразия базальтов срединно-океанических хребтов



Вариации общей щелочности более чем в 2 раза

Результаты "дискриминантного анализа" составов "толеитов океанических рифтов" (ТОР)

$$D = a(\text{SiO}_2) + b(\text{TiO}_2) + \dots - c(\text{Na}_2\text{O}) - d(\text{K}_2\text{O})$$



MORB	TOP-1	TOP-2	TOP-Na	TOP-K	TOP-Fe	TOP-FeTi
------	-------	-------	--------	-------	--------	----------

ВТП (N=6273)

SiO2	50.19	50.65	50.92	50.73	49.80	50.98
TiO2	1.14	1.63	2.22	1.84	1.30	2.56
Al2O3	15.88	15.01	14.28	15.79	15.09	13.30
FeO	9.19	10.33	11.80	9.69	12.21	13.79
MgO	8.55	7.55	6.38	6.95	7.70	5.77
CaO	12.52	11.81	10.79	11.04	11.49	10.17
Na2O	2.33	2.75	3.17	3.09	2.26	3.01
K2O	0.08	0.13	0.23	0.60	0.07	0.19
K/Ti	0.07	0.08	0.11	0.33	0.05	0.07
<i>n</i>	404	4700	486	338	8	337
%	6.4	74.9	8	5	0	5

САХ (N=7788)

SiO2	51.01	50.92	51.22	51.33	51.09	50.71
TiO2	1.08	1.52	2.06	1.65	1.35	1.94
Al2O3	15.40	15.49	15.14	15.71	14.14	13.41
FeO	9.57	9.94	10.65	9.40	12.34	14.28
MgO	8.20	7.65	6.60	7.09	7.04	6.04
CaO	12.34	11.46	10.62	11.26	11.78	10.94
Na2O	2.16	2.78	3.37	2.81	2.06	2.33
K2O	0.14	0.13	0.22	0.55	0.11	0.19
K/Ti	0.13	0.09	0.11	0.34	0.08	0.09
<i>n</i>	2342	3583	277	1074	399	113
%	30.1	46.0	3.6	13.8	5.1	1.5

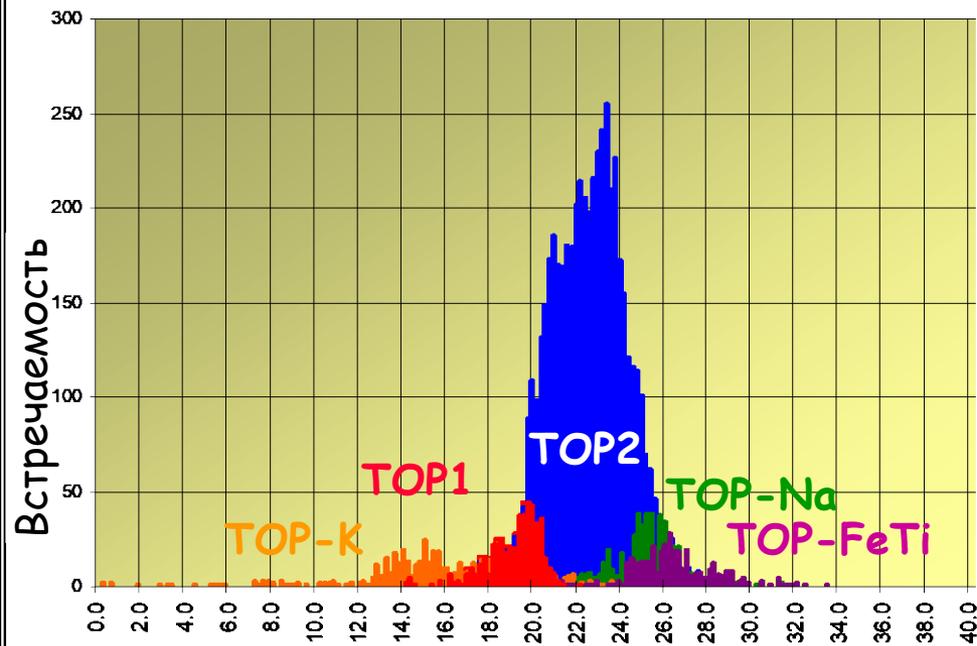
**Средние составы
главных групп
ТОР
(Дмитриев, 2006)**

- **Устойчивость средних составов независимо от географического положения**

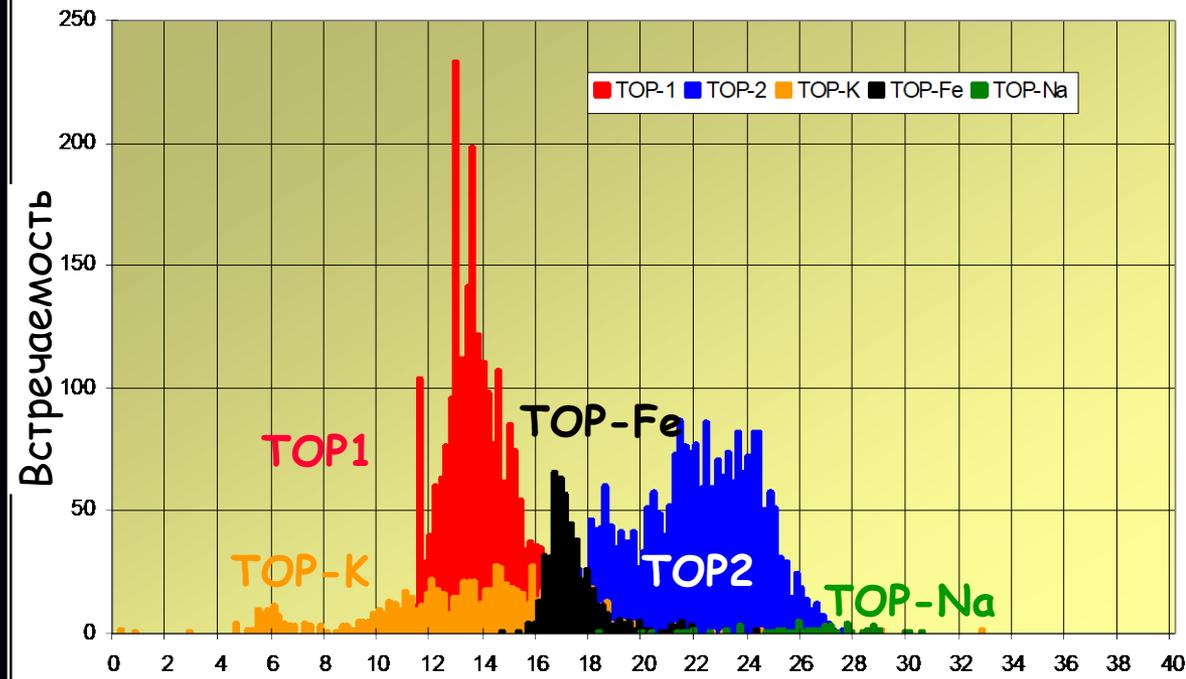
- **Разные пропорции в высоко- и низко-скоростных спрединговых центрах**

Встречаемость главных типов TOP

Восточно-Тихоокеанское поднятие
(зона быстрого спрединга)



Северный сегмент САХ
(медленный спрединг)



Параметры формирования первичных расплавов ТОР-1 и ТОР-2 (Соболев и др., 1984)

Состав расплава	ТОР-1 (Дмитриев и др., 1984)	ТОР-2 (Дмитриев и др., 1984)
SiO ₂	49.32	49.70
TiO ₂	0.60	0.90
Al ₂ O ₃	15.10	18.00
FeO	7.65	7.50
MnO	0.20	0.20
MgO	13.08	9.50
CaO	12.38	11.90
Na ₂ O	1.61	2.30
K ₂ O	0.06	0.05
P ₂ O ₅	-	-
Mg#	0.75	

Условия выплавления

(Кадик и др., 1991)

Лерцолитовый источник

Низкие содержания воды

ТОР-1: $P=10-15$ кбар, $T=1300^{\circ}\text{C}$,

$Ol+Opx+Cpx+Sp$

ТОР-2: $P=6-8$ кбар, $T=1250^{\circ}\text{C}$,

$Ol+Opx+Cpx+Pl\pm Sp$

Выводы по поводу примитивных расплавов

1. Наиболее примитивные расплавы:

MgO - 9-15%,
 $Mg\# > 0.7$,
фенокристаллы OI , $Fo > 90$

2. По результатам сопоставления природных составов с данными экспериментов:

Типичные MORB (MgO 5-8%) кристаллизовались при $P < 5$ кбар

Первичные магмы этих MORB с $MgO > 10\%$ выплавлялись
при $P < 8-10$ кбар

Признаки полибарической кристаллизации океанических толеитов

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ

- Присутствие мегакристаллов клинопироксена (Di составы, обогащение Cr)

P=8-10 кбар

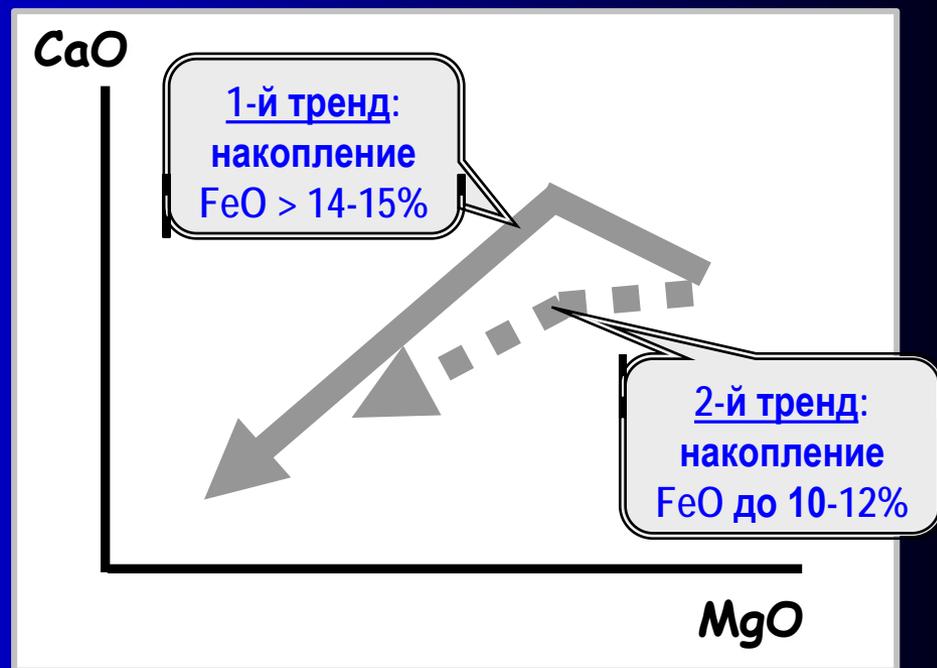
- Высокоглиноземистые шпинели ($Al_2O_3 < 45\%$, $Cr_2O_3 = 20\%$)

P=5-6 кбар

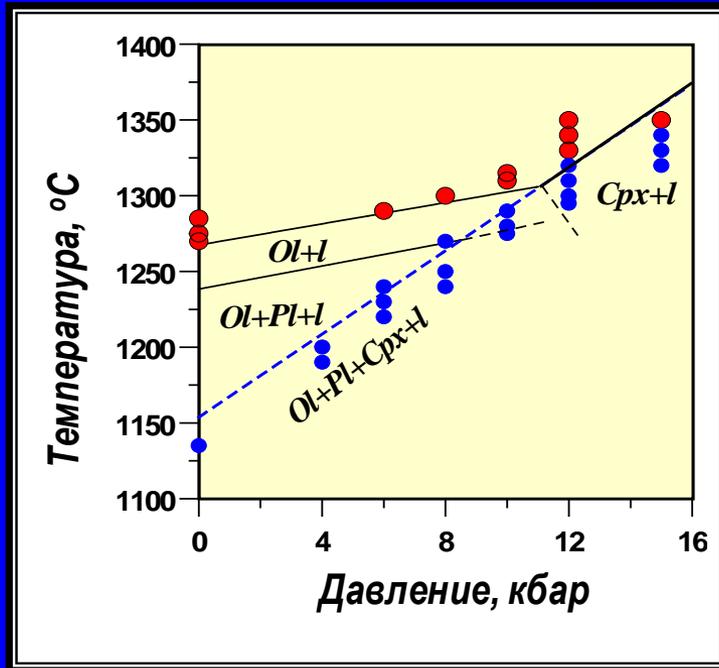
Соотношения CaO-MgO для серий MORB, различающихся по степени накопления FeO

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ

Срх- важная котектическая фаза с ранних стадий фракционирования магм
=> *фантомная кристаллизация пироксена*

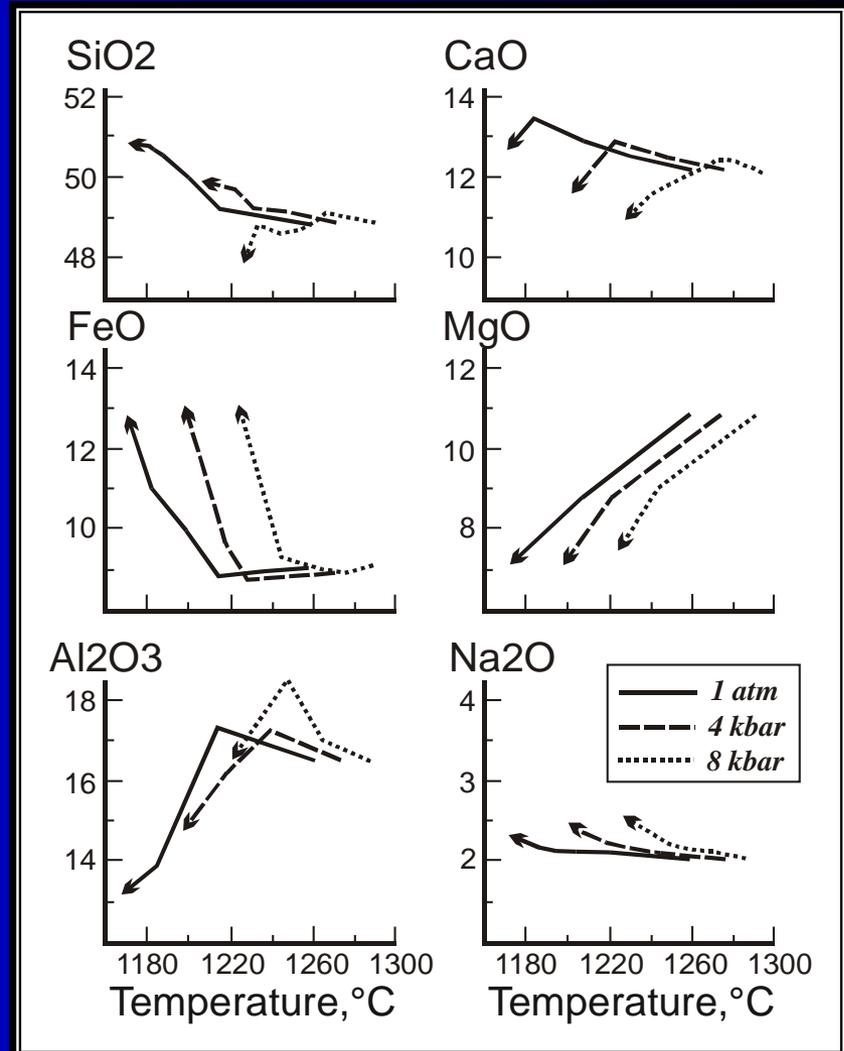


Особенности полибарического фракционирования ТОЛЕИТОВЫХ МАГМ

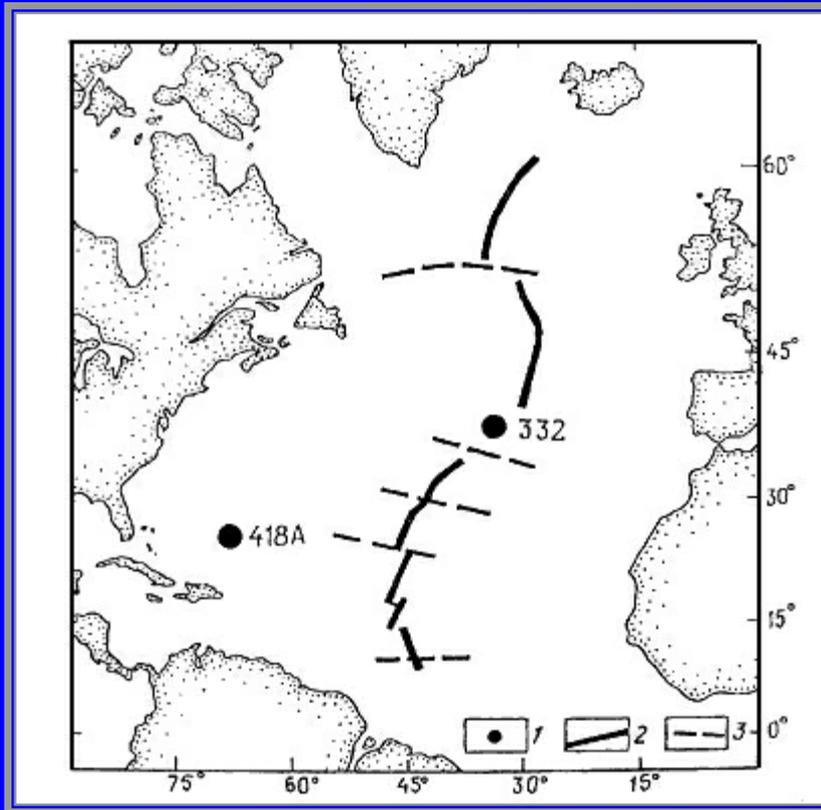


P-T диаграмма магнезиального толеита (Bender et al., 1978)

Эволюция состава расплава магнезиального толеита при фракционной кристаллизации при разных давлениях



Выбор объектов для ЭВМ-барометрии стекол MORB



Расположение скважин 332 и 418А в Северной Атлантике

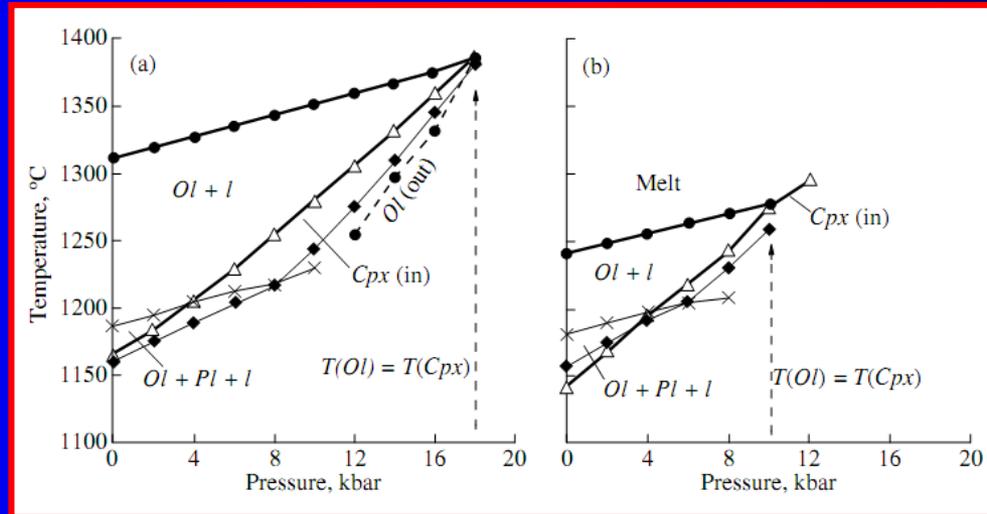
Составы исходных магм из скв. 332 и 418А, использованные при моделировании полибарического фракционирования

Component	TOR-1 (Hole 332)	MB (Hole 418A)
SiO ₂	49.32	49.37
TiO ₂	0.60	1.12
Al ₂ O ₃	15.10	15.02
FeO	7.65	9.77
MnO	0.20	0.19
MgO	13.08	10.61
CaO	12.38	11.72
Na ₂ O	1.61	1.99
K ₂ O	0.06	0.07
P ₂ O ₅	—	0.13
FeO/MgO	0.585	0.921
CaO/Al ₂ O ₃	0.820	0.780

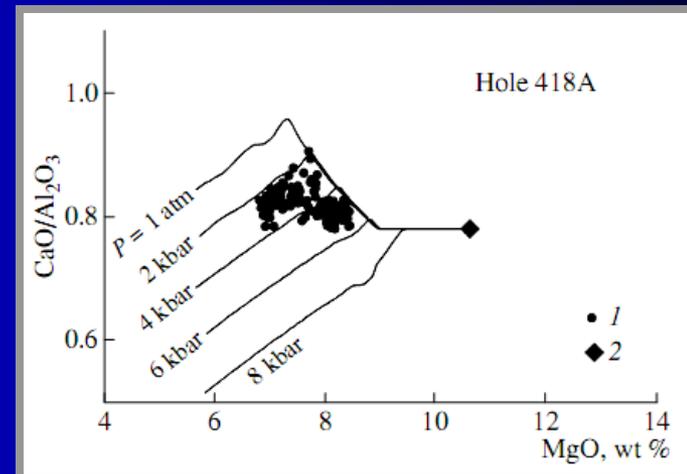
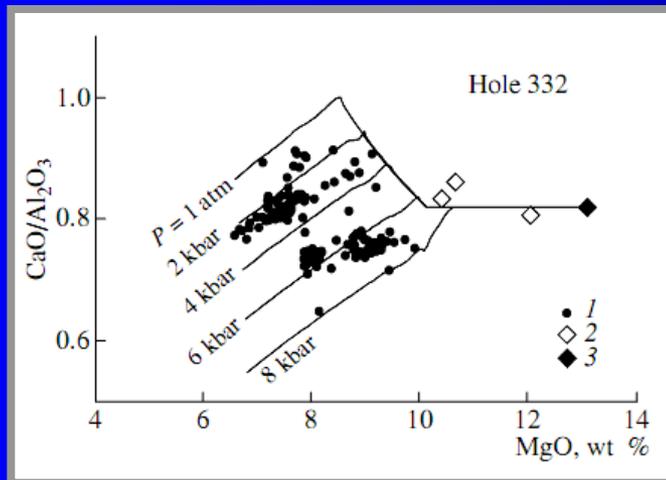
Составы приведены к 100 мас.%. TOR-1 - тугоплавкое включение в ОI из скв. 332 (Дмитриев и др., 1984); МБ - магнезиальный базальт из скв. 418А (85-1, 145-148 - Init. Rep. DSDP, 1977)

Сопоставление расчетных и природных петрохимических трендов

P-T диаграмма
исходной
магмы для
стекол из
скважины 332



P-T диаграмма
исходной
магмы для
стекол из
скважины 418A



Модельные и природные петрохимические тренды