

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. Глубоковод- ные осадки

II. Пиллоу-лавы и дайковый комплекс

III. Изотропные и расслоенные габбро

IV. Расслоенные и тектонизирован- ные перидотиты

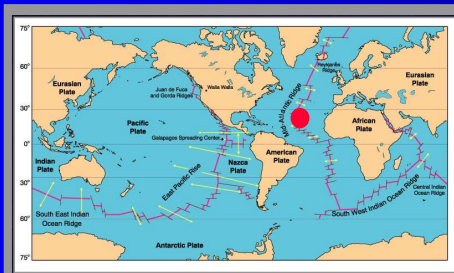
Lithology		Ocean Crustal Layers	Typical Ophiolite	Normal Ocean Crust	
			Thickness (km)	ave.	P wave vel. (km/s)
Deep-Sea Sediment		1	~ 0.3	0.5	1.7 - 2.0
Basaltic Pillow Lavas		2A & 2B	0.5	0.5	2.0 - 5.6
Sheeted dike complex		2C	1.0 - 1.5	1.5	6.7
Gabbro		3A	2 - 5	4.7	7.1
Layered Gabbro		3B			
Layered peridotite		4	up to 7		8.1
Unlayered tectonite peridotite					



Л.В. Дмитриев
(1927-2005)

Протяженные
обнажения
океанических
перидотитов
(мантйных
реститов)

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



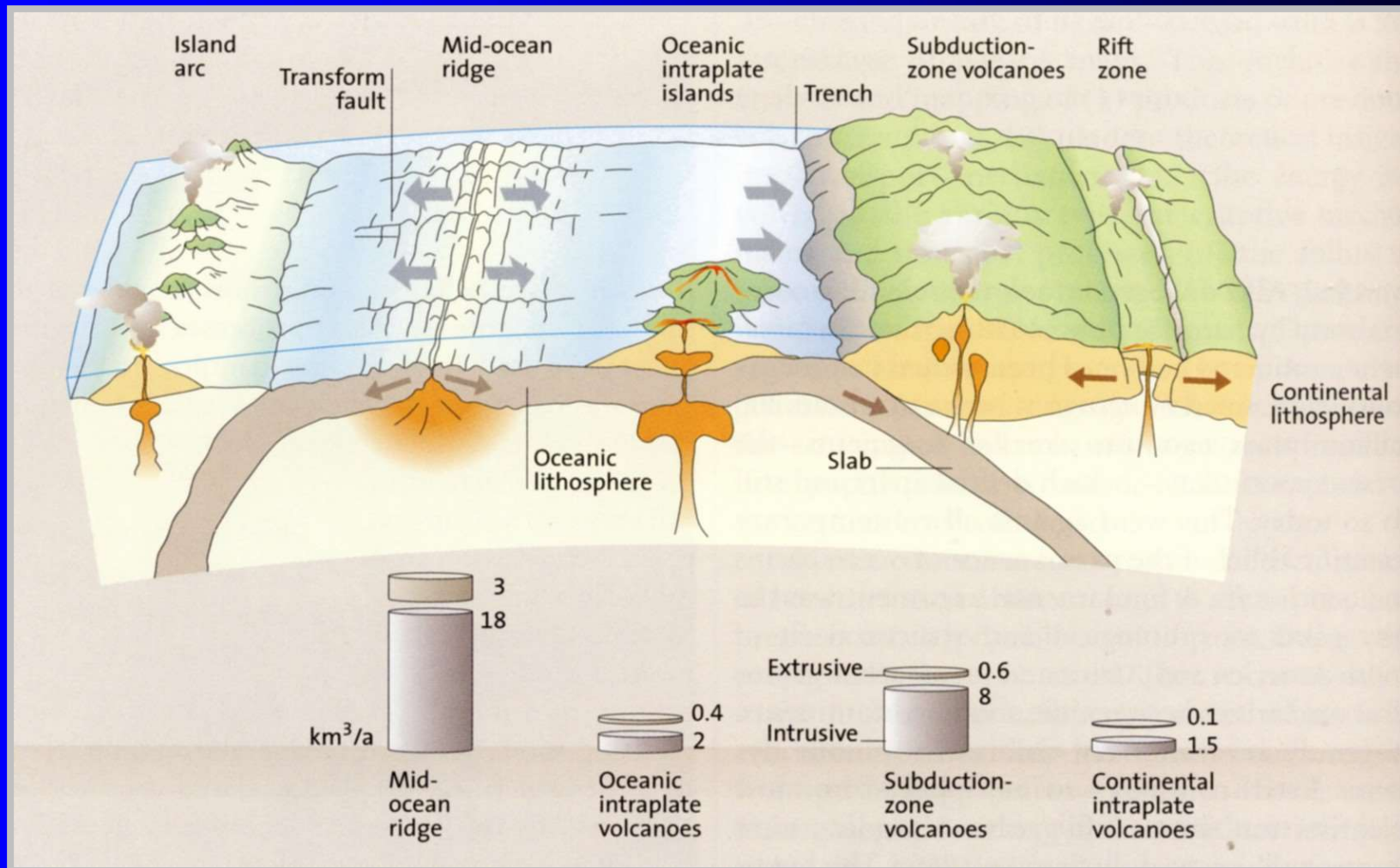
Рисунок, выполненный профессором Л.В. Дмитриевым
с борта ГОА "Наутил" в 1992 г. (проект FARA)

Расслоенные габбро офиолитов Омана (пример слоя 3В)



Sandrin Feig permission

**Соответственно главным структурам океанов
выделяются плутонические комплексы:**
срединно-океанических хребтов (СОХ)
океанических островов и подводных гор

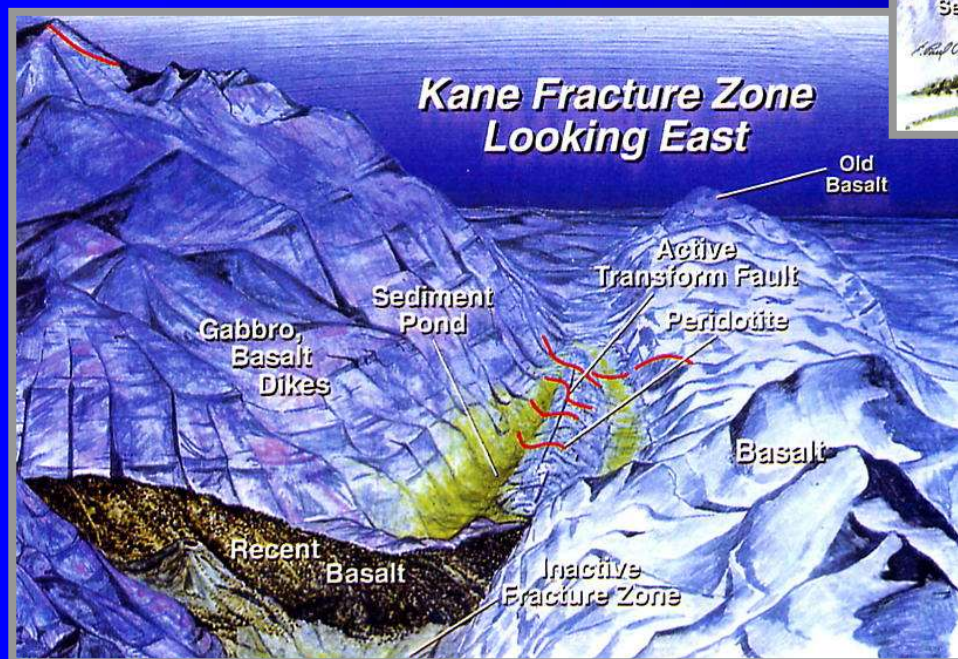
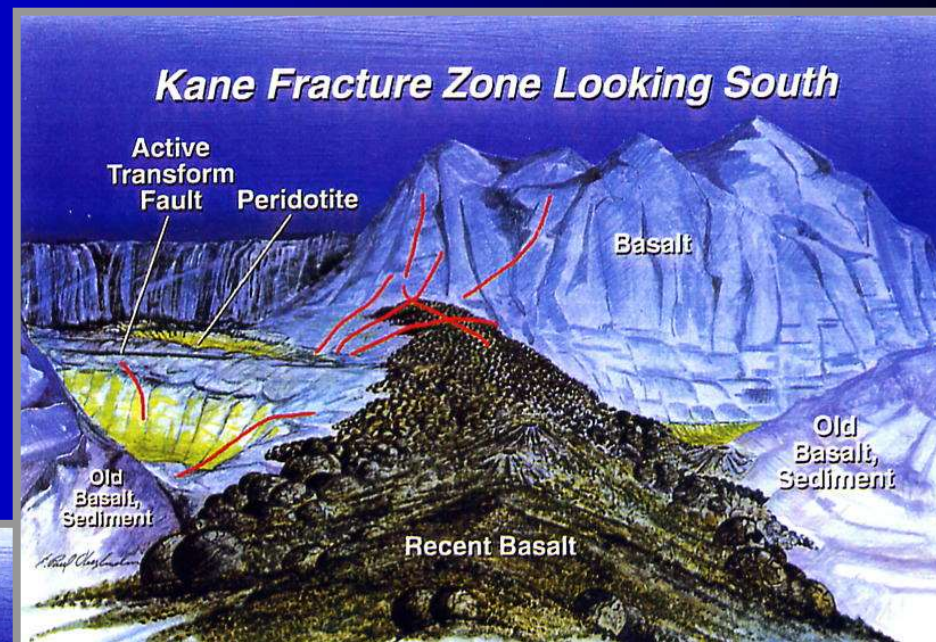
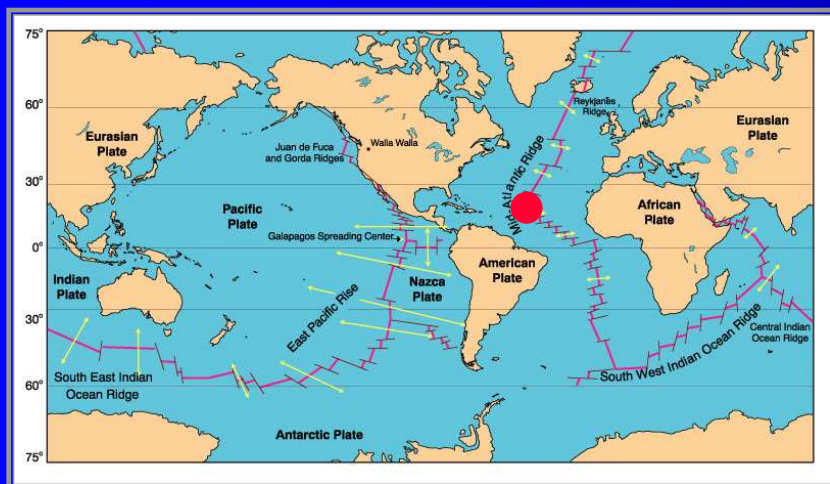


Плутонические комплексы СОХ подразделяются на:

- низкоскоростные и
- высокоскоростные зоны
окенанического 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

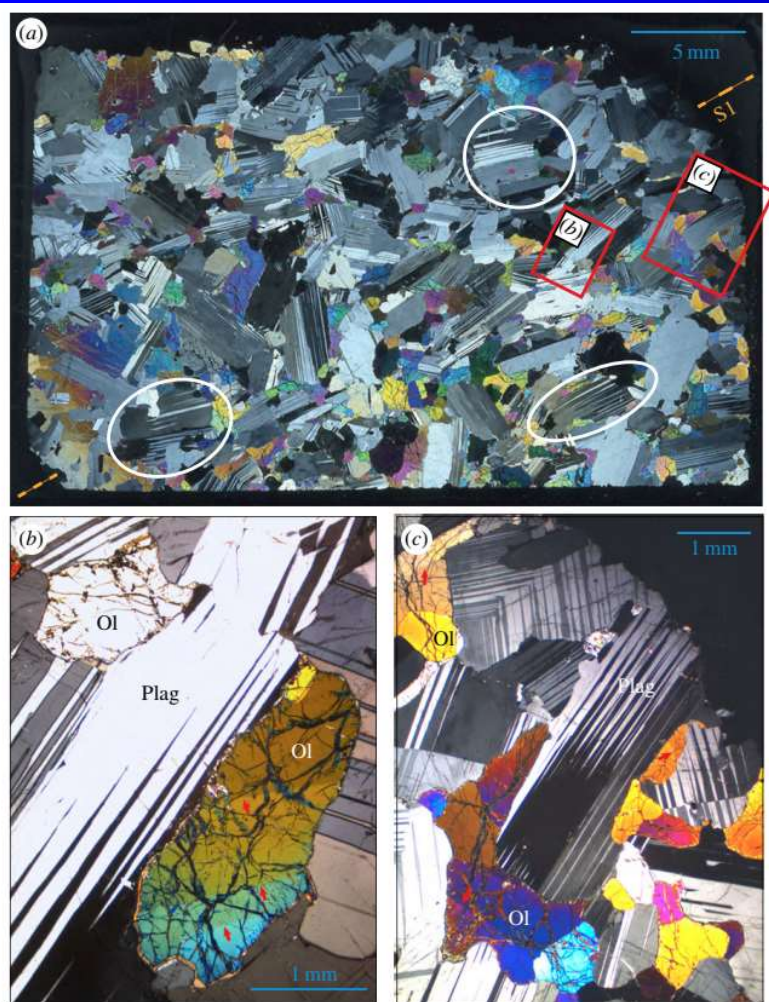
1. **Нормальные габброиды:**
троктолиты, Ol-Cpx-Pl-
габбро и габбронориты,
2. **Гнейсовидные габбро:**
Pl-Cpx-Opx-Mt-Ilm-Ap $\pm$ Bi

Метаморфизованные
аналоги

АМФИБОЛИТЫ

1. массивные,
2. сланцеватые

Структуры свежих океанических габброидов с признаками пластических деформаций



PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS A

royalsocietypublishing.org/journal/rsta

Research

Cite this article: Lissenberg CJ, MacLeod CJ, Bennett EN. 2019 Consequences of a crystal mush-dominated magma plumbing system: a mid-ocean ridge perspective. *Phil. Trans. R. Soc. A* **377**: 20180014.



Consequences of a crystal mush-dominated magma plumbing system: a mid-ocean ridge perspective

C. Johan Lissenberg, Christopher J. MacLeod and Emma N. Bennett

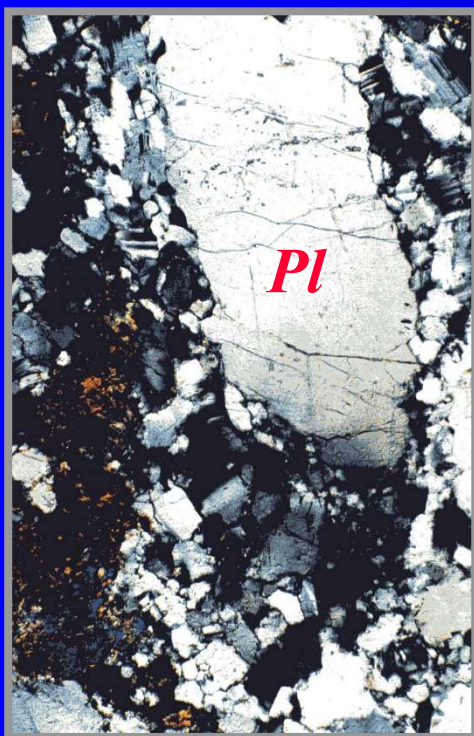
School of Earth and Ocean Sciences, Cardiff University, Park Place, Cardiff CF10 3AT, UK

CJL, 0000-0001-7774-2297

Figure 2. Photomicrographs illustrating microtextural evidence for compaction in oceanic cumulates. (a) Full thin section scan of troctolite from IODP Hole U1309D at Atlantis Massif (30°N, Mid-Atlantic Ridge). A magmatic foliation, outlined by orange dashed lines (S1), is defined by subparallel plagioclase laths. Plagioclase laths are characterized by tapered deformation twins, with some prominent examples outlined by the white ellipses. (b,c) Close-ups of red rectangular boxed areas in (a), showing a series of kink bands in olivine (outlined by the red arrows) and deformation twins in plagioclase. Ol, olivine; Plag, plagioclase; S1, foliation. (Online version in colour.)

Типичные структуры океанических габбро и дунита, формирующиеся в результате:

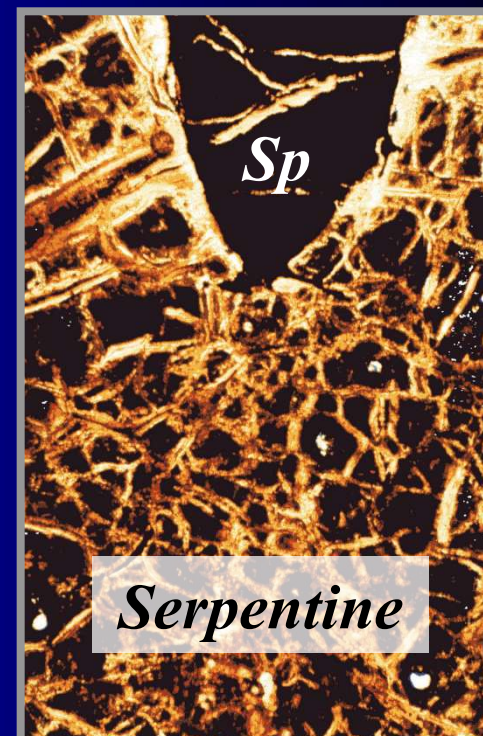
(а) перекристаллизации, (б) катакластического
воздействия, (в) метасоматических процессов



(а) Гнейсовидное габбро
с реликтовыми зернами
и необластами Pl

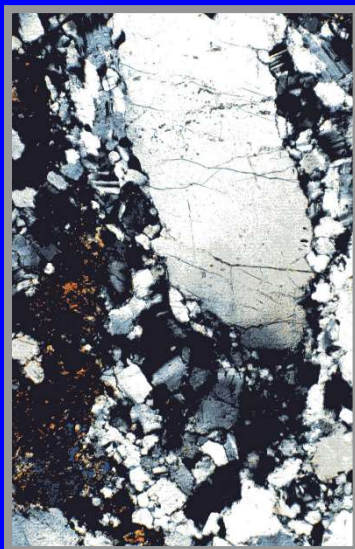


(б) Офитовое габбро
с признаками
катаклаза* в двойниках



(в) Серпентинизиро-
ванный дунит
(wall rock process)

Что такое “катаклиз”?



Катаклáз (от греч. κατακλάω, «ломать, сокрушать») — **деформация и раздробление минералов и горных пород** под действием тектонических движений, обычно в условиях невысоких температур без химических изменений и перекристаллизации, частный вид динамометаморфизма^[1].



При катаклазе происходят повороты и относительные сдвиги фрагментов породы с уменьшением их размера и зачастую с изменением объёма породы. **Обычно катаклиз происходит в зоне разрывных нарушений.**

Породы, образованные при катаклазе, называются, в зависимости от раздробленности, тектоническими **брекчиями** при нарушении связности или **катаклазитами** — при сохранении связности исходной породы.

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

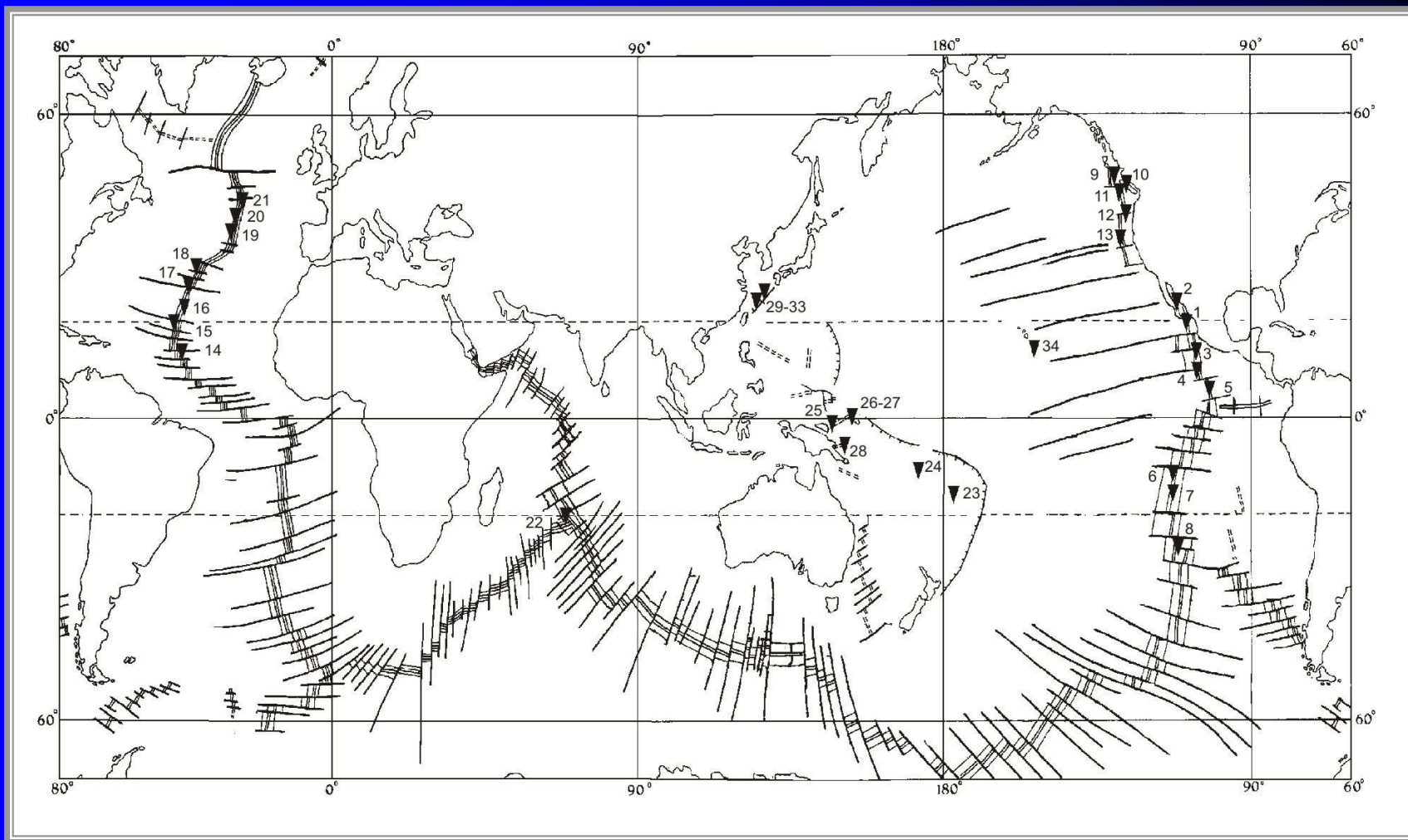
Формируют вещественный состав консолидированной океанической коры и в конечном счете определяют детали пространственного строения plutonic complex COX



ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ

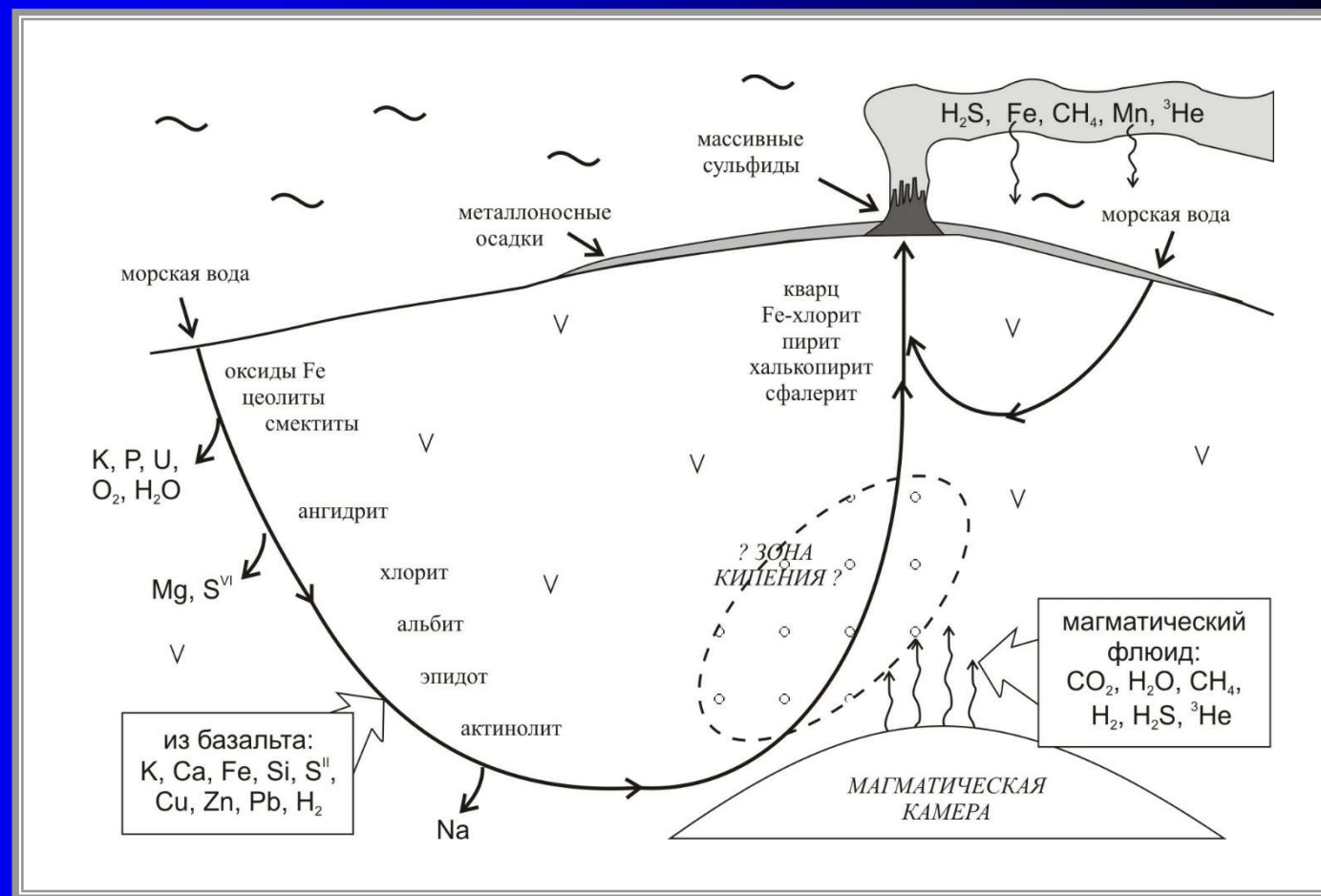
Задают металлогеническую специфику и баланс вещества гидротермальных систем COX ("черные курильщики", "метановые струи" и другие)

Распределение известных субмаринных гидротермальных систем



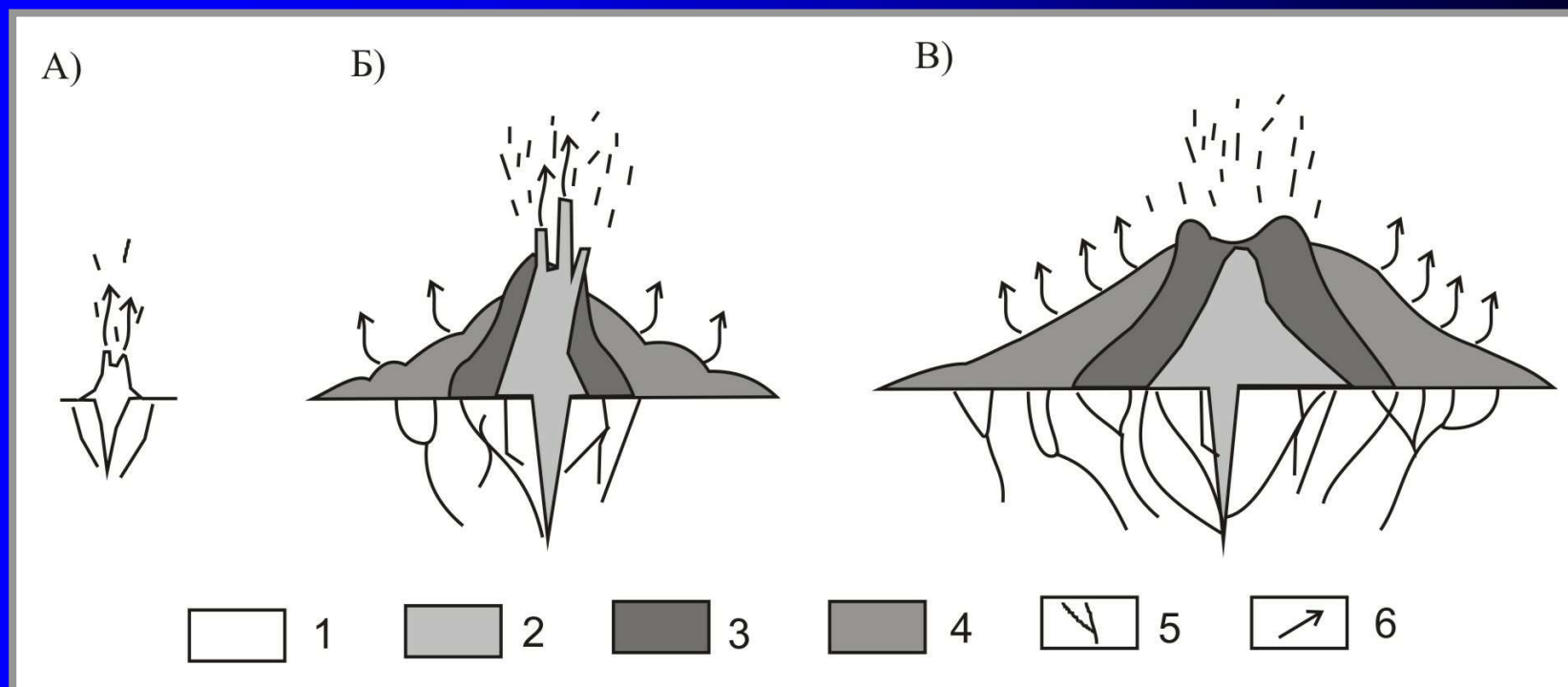
Гричук, 2004

Схема геохимических процессов в гидротермальной системе срединно-океанического хребта



Гричук, 2004

Схема эволюции “черного курильщика”



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

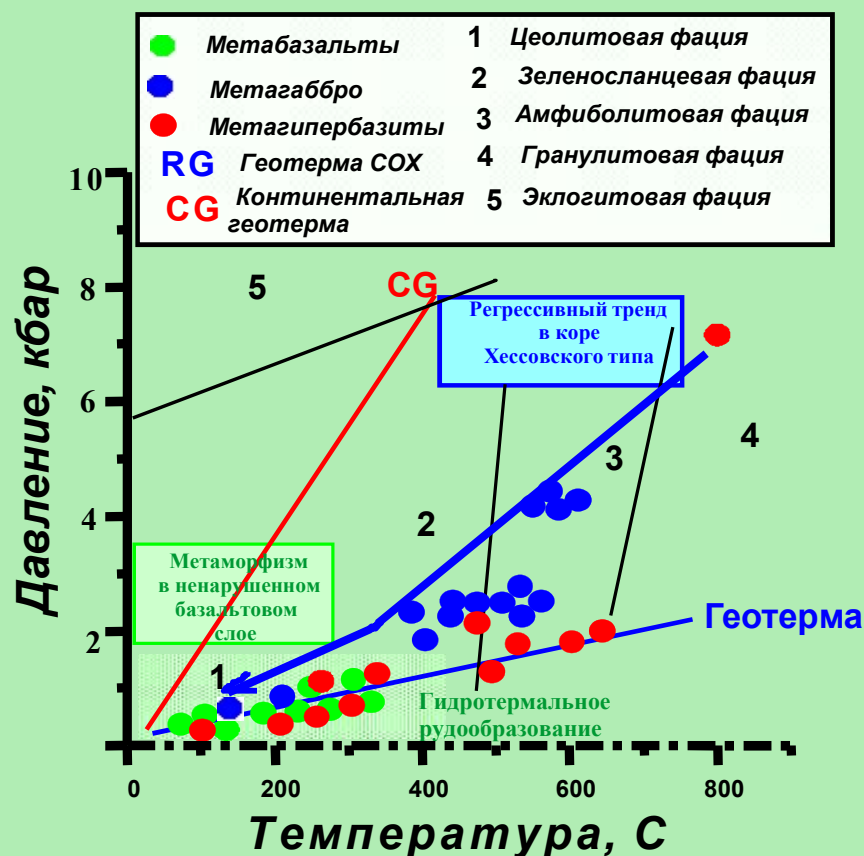
А) стадия формирования ангидритовой “эмбриональной” постройки на дне;

Б) стадия высокотемпературной гидротермальной деятельности и формирования сульфидной постройки;

В) стадия диффузной гидротермальной деятельности: 1 – ангидрит; 2 – сульфиды Si 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



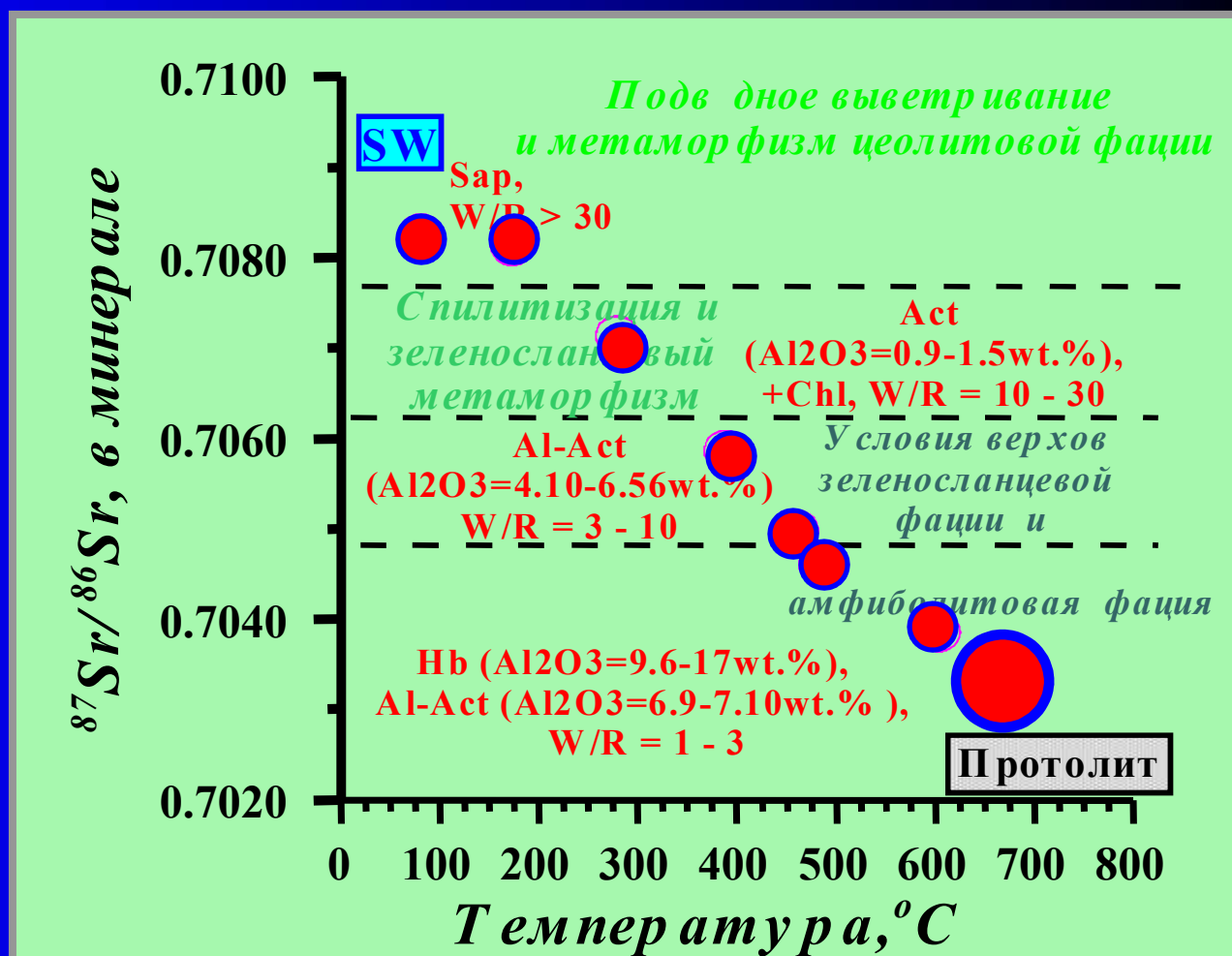
Метаморфизм в хессовском разрезе океанической коры: регрессивный тренд, описывающий тектоническую и вещественную эволюцию корово-мантийного субстрата по мере подъема под осевой зоной СОХ

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, P3Э*)
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, PЗЭ, минеральный состав*)
2. Степень плавления мантийного источника (*Cr# в реликтовой шпинели, Mg# в Ol и пироксенах, Al и Na в Орх и Срх, MgO/SiO₂ и Al₂O₃/SiO₂ в породах*)
3. Температура субсолидусного переуравновешивания (*составы сосуществующих минералов*)

НА МЕТАМОРФИЧЕСКОЙ СТАДИИ

4. Условия метаморфического преобразования протолита (T°C, W/R):
тип минерального парагенезиса, состав минералов (Al и Cl в Amph, 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 рститы, 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

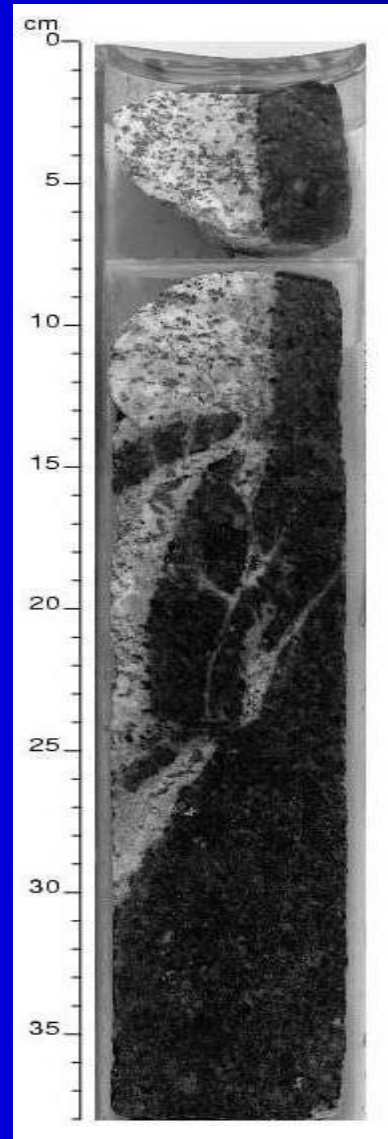
Сегментация САХ и условия метаморфизма коррелируют с мощностью литосферы и глубиной отделения расплава от мантийного диапира

Жильные плагиограниты в офиолитах Омана



Sandrin Feig permission

Плагиограниты из керна скважин современных океанов



After Koepke et al. (2007)

Table 1 Compilation of analyses from oceanic plagiogranites

Setting ^a	Location	No. ^b	References
Plagiogranites from recent oceans			
MOR	MAR	2	Aumento (1969)
MOR	West Indian Ridge	1	Engel and Fisher (1975)
MOR	SWIR, ODP site 735B	1	Robinson et al. (1993)
MOR	SWIR, ODP site 735B	4	Shipboard Scientific Party (1999)
MOR	SWIR, ODP site 735B	1	Dick et al. (2000)
MOR	SWIR, ODP site 735B	19	Niu et al. (2002)
Plagiogranites from ophiolites			
MOR	Corsica, France	3	Beccaluva et al. (1977)
MOR	Iran	11	Ghazi et al. (2004)
MOR	Newfoundland	7	Malpas (1979)
Cont rif	Hartenstein, Austria	2	Steyer and Finger (1995)
Cont rif	Ligurian Alps	10	Borsi et al. (1996)
MOR/spot	Nicoya, Costa Rica	3	Beccaluva et al. (1999)
SSZ	Albania	6	Béblen et al. (1997)
SSZ	Anatoly, Turkey	27	Floyd et al. (1998)
SSZ	Andaman	1	Shastri et al. (2001)
SSZ	Newfoundland	1	Irvine and Findlay (1972)
SSZ	Crete, Greece	11	Koepke (1986)
SSZ	Guevgueli, Greece	5	Béblen (1991)
SSZ	Karmoy, Norway	18	Pedersen and Malpas (1984)
SSZ	Koziakas, Greece	3	Hatzipanagiotou et al. (1995)
SSZ	New Zealand	5	Thompson et al. (1997)
SSZ	Samothraki, Greece	9	Tskouras and Hatzipanagiotou (1998)
SSZ	Sarmiento, Chile	14	Saunders et al. (1979)
SSZ	Taiwan	1	Jahn (1986)
SSZ	Troodos, Cyprus	4	Coleman and Donato (1979)
SSZ	Troodos, Cyprus	2	Coleman and Peterman (1975)
SSZ	Troodos, Cyprus	9	Moores and Vine (1971)
SSZ	Vourinos, Greece	2	Moores (1969)
SSZ?	Fidalò, Washington	20	Brown et al. (1979)
SSZ?	Silvretta, Alps	2	Müller et al. (1996)
SSZ/MOR	Oman	5	Alabaster et al. (1982)
SSZ/MOR	Oman	4	M. Benoit, unpublished data
SSZ/MOR	Oman	11	J. Koepke, unpublished data
SSZ/MOR	Oman	2	Coleman and Donato (1979)
Arc com	Smartville, California	26	Beard (1998)
Arc com	Sparta, Oregon	6	Phelps and Avé Lallemant (1980)
Anatexis	Oregon	11	Gerlach et al. (1981)
Anatexis	Appalachians	4	Flagler and Spray (1991)
Anatexis	Karmoy, Norway	11	Pedersen and Malpas (1984)
Anatexis	Newfoundland	10	Malpas (1979)
Anatexis	Shetland, Scotland	4	Spray and Dunning (1991)

^a MOR mid-ocean ridge, cont rif continental rift system, MOR/spot mid-ocean ridge influenced by hot spot, SSZ supra-subduction setting, SSZ? according to the authors supra-subduction setting probable, arc com arc complexes, anatexis formation by anatexis in high-temperature shear zones

^b Number of analyses

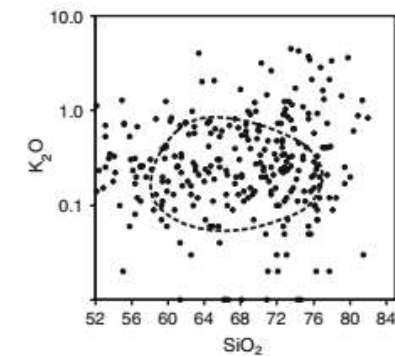


Fig. 1 K₂O versus SiO₂ for natural oceanic plagiogranites. The dashed line delimitates the field for oceanic plagiogranites after Coleman and Donato (1979)

Примеры ассоциации океанических габбро и плагиогранитов

Geochemistry, Geophysics, Geosystems

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2019GC008320

Key Points:

- Oceanic plagiogranite results from protracted fractional crystallization of parental ocean ridge basaltic magmas
- Fractional crystallization of Fe-Ti

Petrogenesis of ODP Hole 735B (Leg 176) Oceanic Plagiogranite: Partial Melting of Gabbros or Advanced Extent of Fractional Crystallization?

Yanhong Chen^{1,2}, Yaoling Niu^{1,2,3,4}, Xiaohong Wang^{3,4}, Hongmei Gong^{3,4}, Pengyuan Guo^{3,4}, Yajie Gao^{3,4}, and Fangyu Shen^{3,4}

AGU100 ADVANCING EARTH AND SPACE SCIENCE

Габбро и фельзитические прожилки из скв. 735В

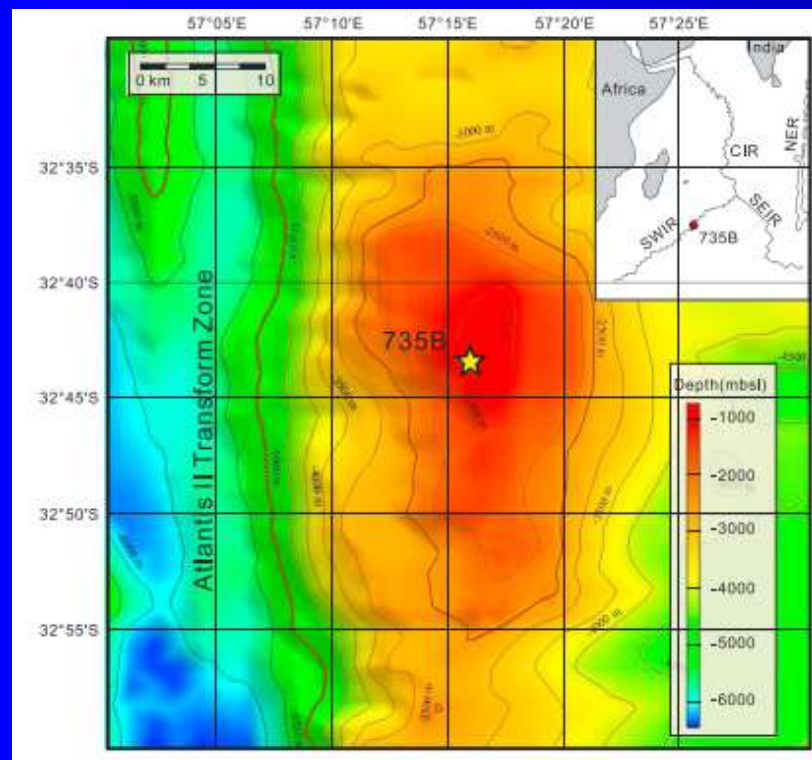
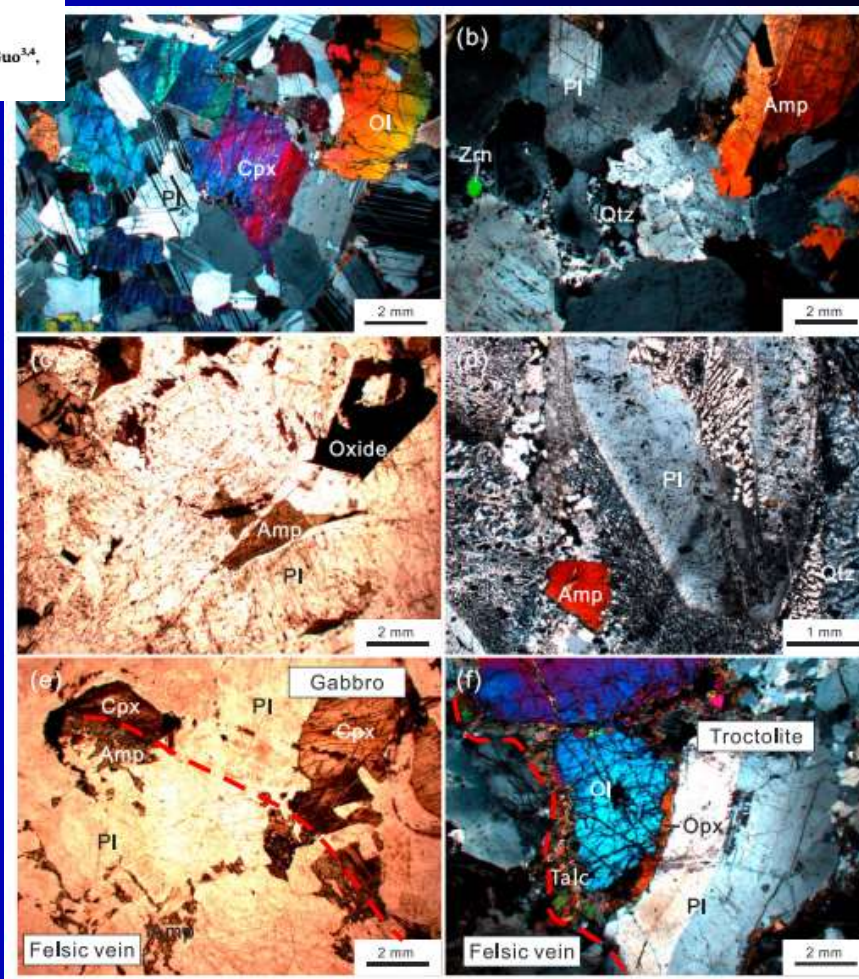


Figure 1. Bathymetric map of the Atlantis Bank showing the location of Ocean Drilling Program Hole 735B. CIR, SWIR, and SEIR refer to Central, Southwest, and Southeast Indian Ridges; NER, Ninety East Ridge. The topography data are from Smith and Sandwell (1997).



Экспериментальные работы Юргена Кёпке по плавлению океанических габбро

Contrib Mineral Petrol (2004) 146: 414–432
DOI 10.1007/s00410-003-0511-9

ORIGINAL PAPER

Jürgen Koepke · Sandrin T. Feig · Jonathan Snow
Marcus Freise

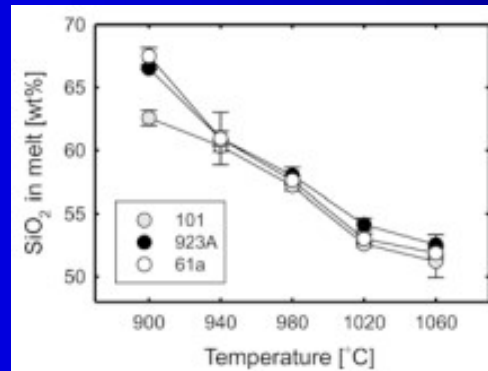
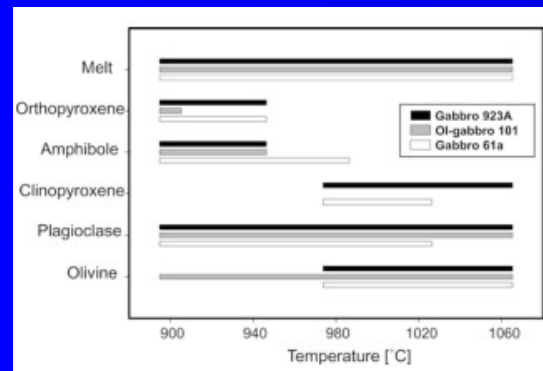
Petrogenesis of oceanic plagiogranites by partial melting of gabbros: an experimental study

Contrib Mineral Petrol (2007) 153:67–84
DOI 10.1007/s00410-006-0135-y

ORIGINAL PAPER

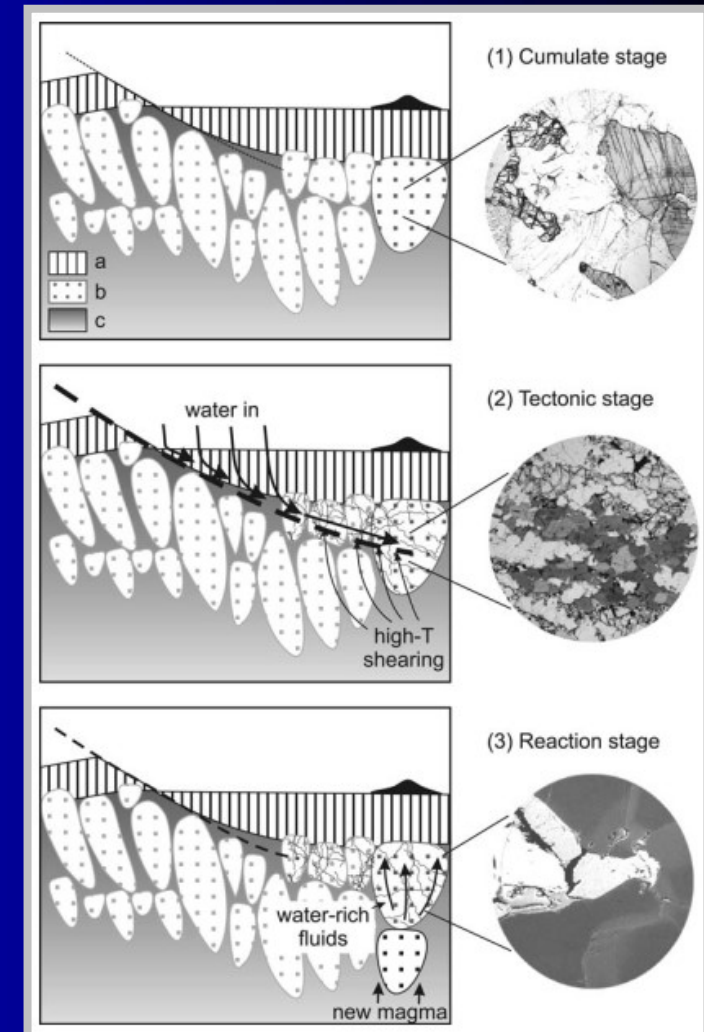
The formation of SiO₂-rich melts within the deep oceanic crust by hydrous partial melting of gabbros

Juergen Koepke · Jasper Berndt · Sandrin T. Feig ·
Francois Holtz



After Koepke et al. (2004)

After Koepke et al. (2007)



Фракционная кристаллизация расплавов MORB как альтернатива частичному плавлению габброидов

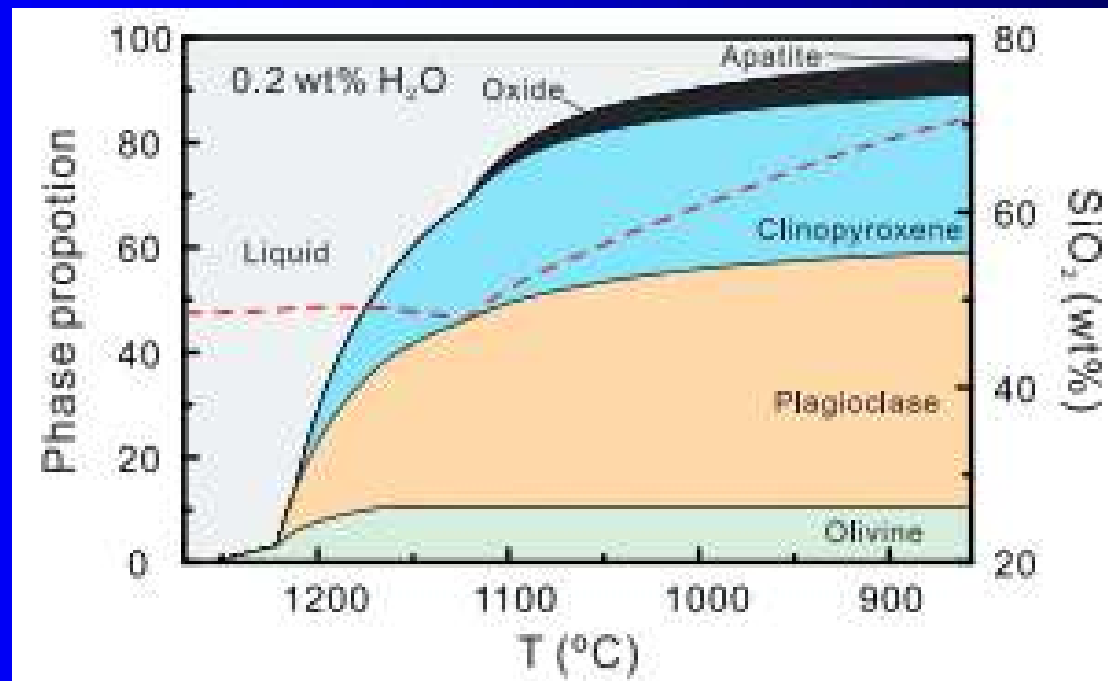


Figure 10. Liquid line of descent (SiO₂ wt% shown at right axis) and phase proportions (left axis) of primitive Southwest Indian Ridge mid-ocean ridge basalt melt fractionation in response to cooling (x axis) using Rhyolite-MELTS at 0.2 GPa, quartz-fayalite-magnetite oxygen buffer, and 0.2 wt% H₂O (see Figure 4 for experimental conditions and calculation parameters). With decreasing temperature, olivine crystallizes first, followed by plagioclase, clinopyroxene, oxide, and finally apatite. The corresponding cumulate rocks are dunite, troctolite, olivine gabbro, gabbro, and oxide gabbro. The red dash lines indicate SiO₂ contents in the residual melt, which does not increase until oxides begin to crystallize.



ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ПРИРОДА И ВОЗРАСТ ПЛАГИОГРАНИТ/ГАББРО-НОРИТОВОЙ АССОЦИАЦИИ ВНУТРЕННЕГО ОКЕАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА НА 5°10' ю.ш.

© 2014 г. С. А. Силантьев*, Ю. Кепке**, А. А. Аriskин*, М. О. Аносова*,
Е. А. Краснова*, Е. О. Дубинина***, Г. Зур****

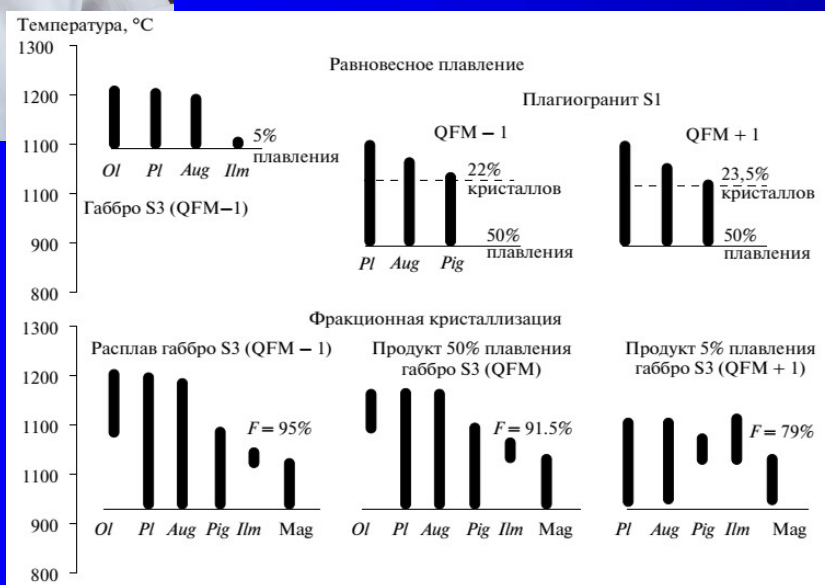


Рис. 13. Результаты моделирования с помощью программы КОМАГМАТ-5.2 (Ariskin et al., 2012, 2013) расплавно-минеральных ассоциаций для габброидной и плагитогранитной систем при 1 атм и “сухих” условиях. Три верхних рисунка относятся к равновесному плавлению габбро-норита (S3) и плагитогранита (S1). Нижние графики представляют модельный порядок фракционной кристаллизации расплава, отвечающего валовому составу габбро-норита и продуктам его частичного плавления.

Наши расчеты по модели
КОМАГМАТ-5 показывают,
что комплекс геохимических
данных предполагает
сочетание частичного
плавления габброидов и
последующей фракционной
кристаллизации этих
выплавов !

Схема процессов, формирующих строение океанической литосферы



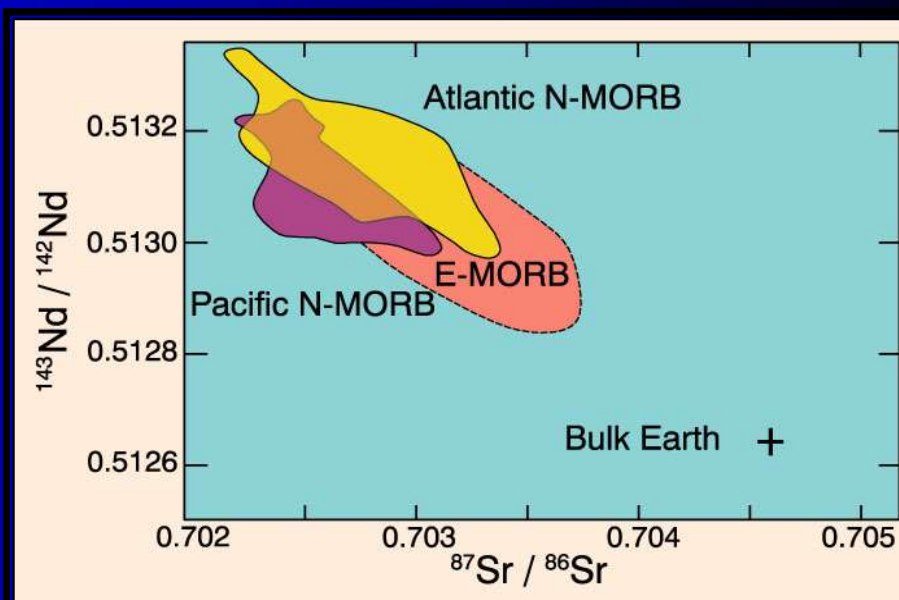
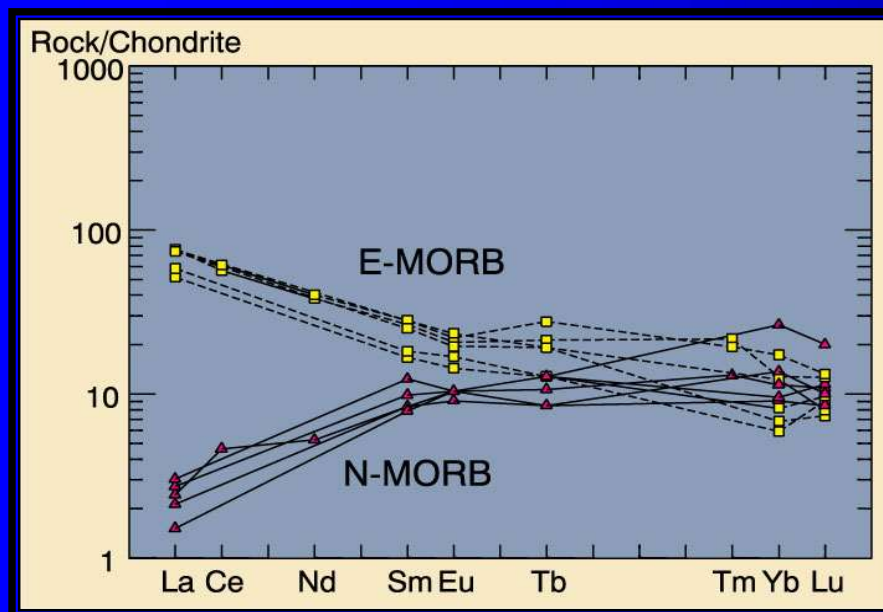
Общая тема:

**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

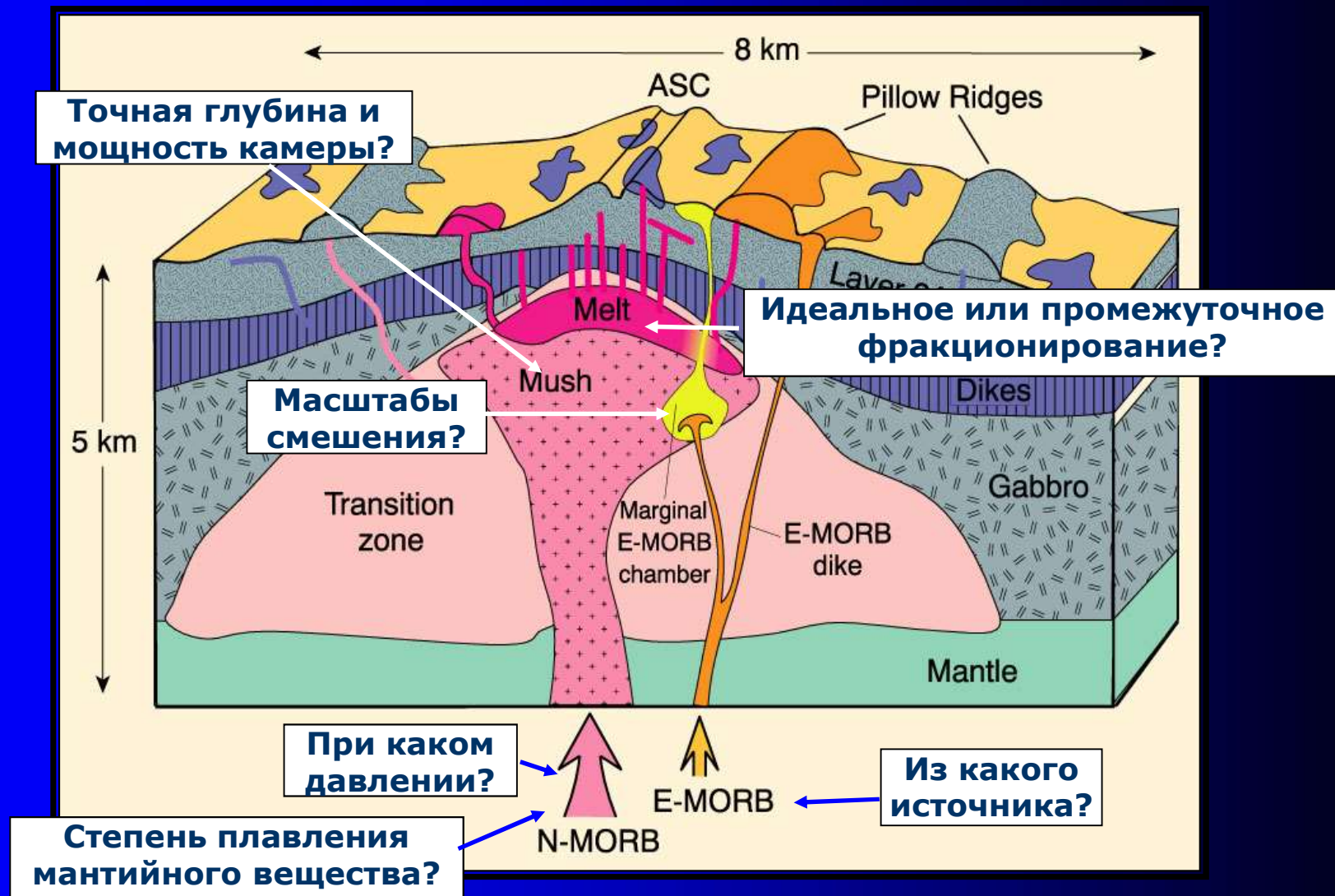
N-MORB

относительно
обедненный

E-MORB

относительно
обогащенный

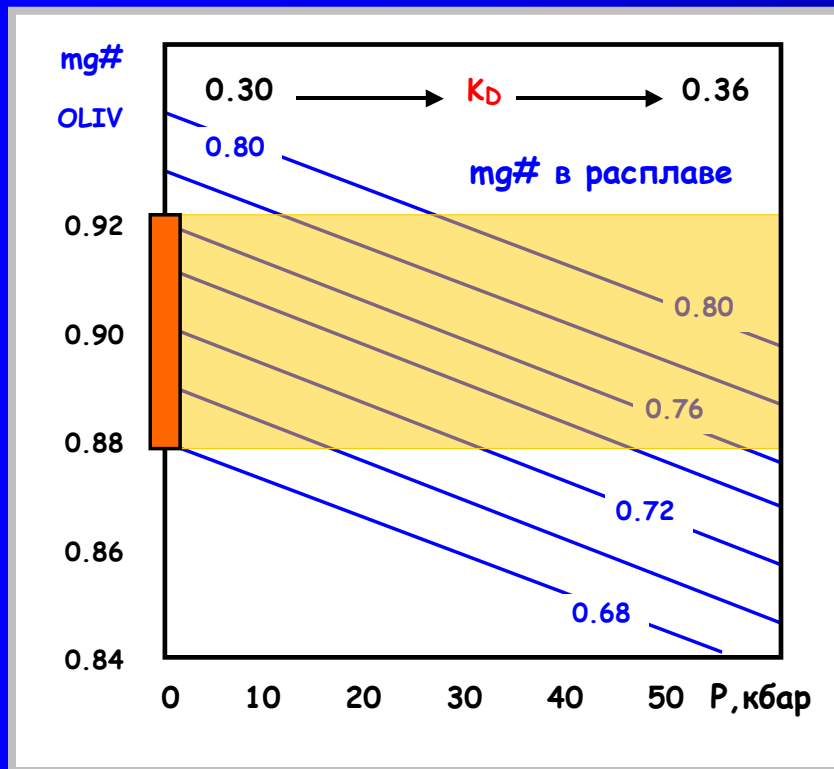
Конкретные проблемы образования базальтов N-MORB и E-MORB в зонах океанического спрединга



Оценка составов первичных и родительских магм срединно-океанических хребтов

Главные источники информации:

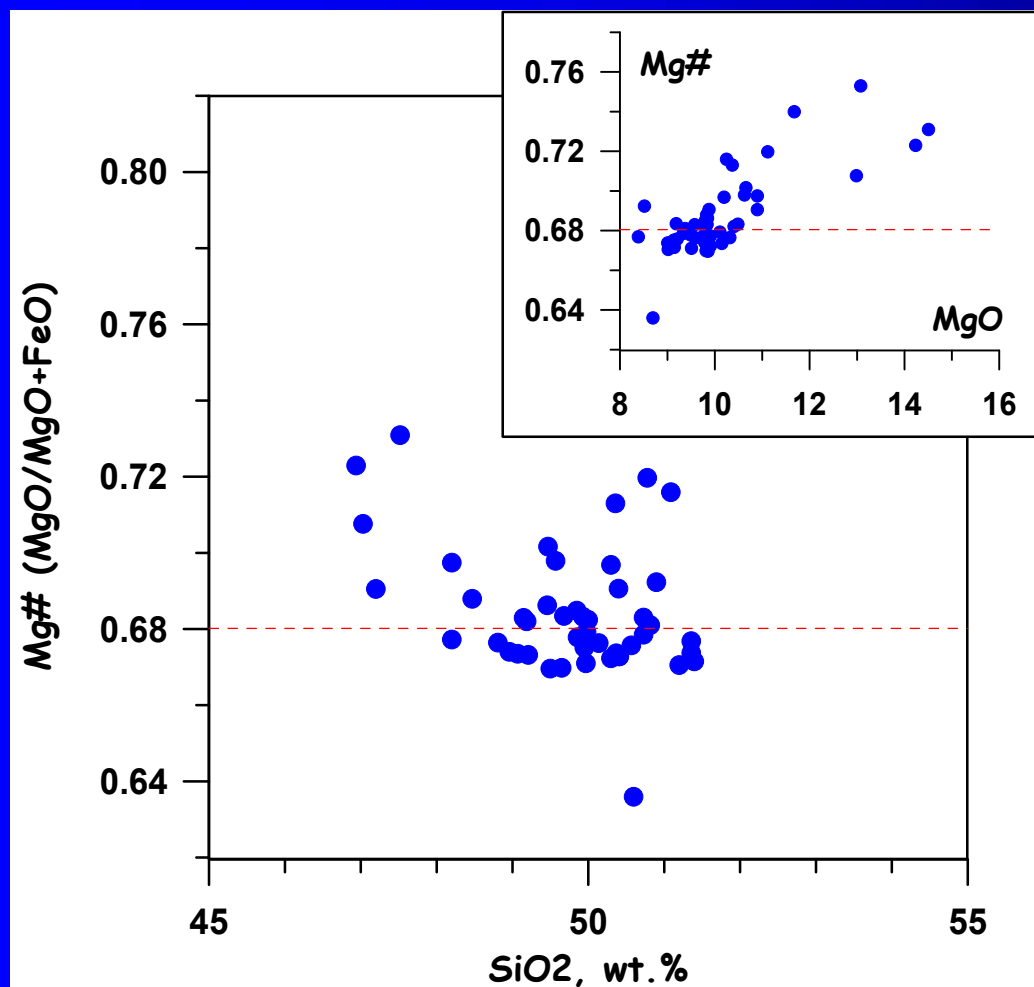
- (1) составы высоко-Mg стекол и базальтов;
- (2) составы примитивных включений в Ol



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 COX



Presnall & Hoover (1987)

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

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

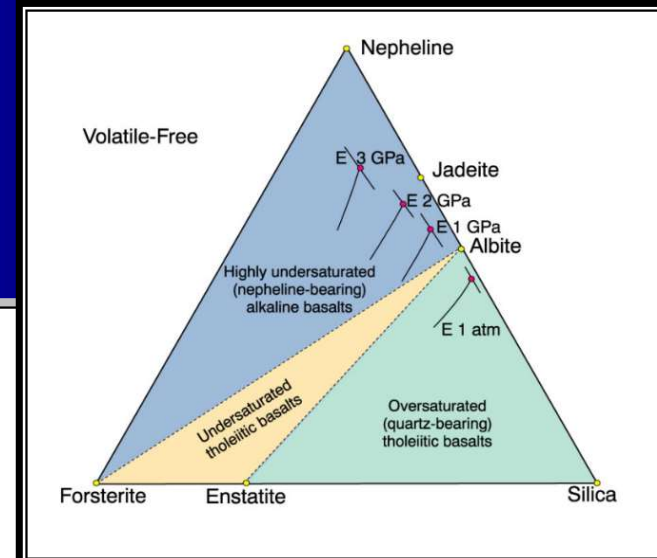
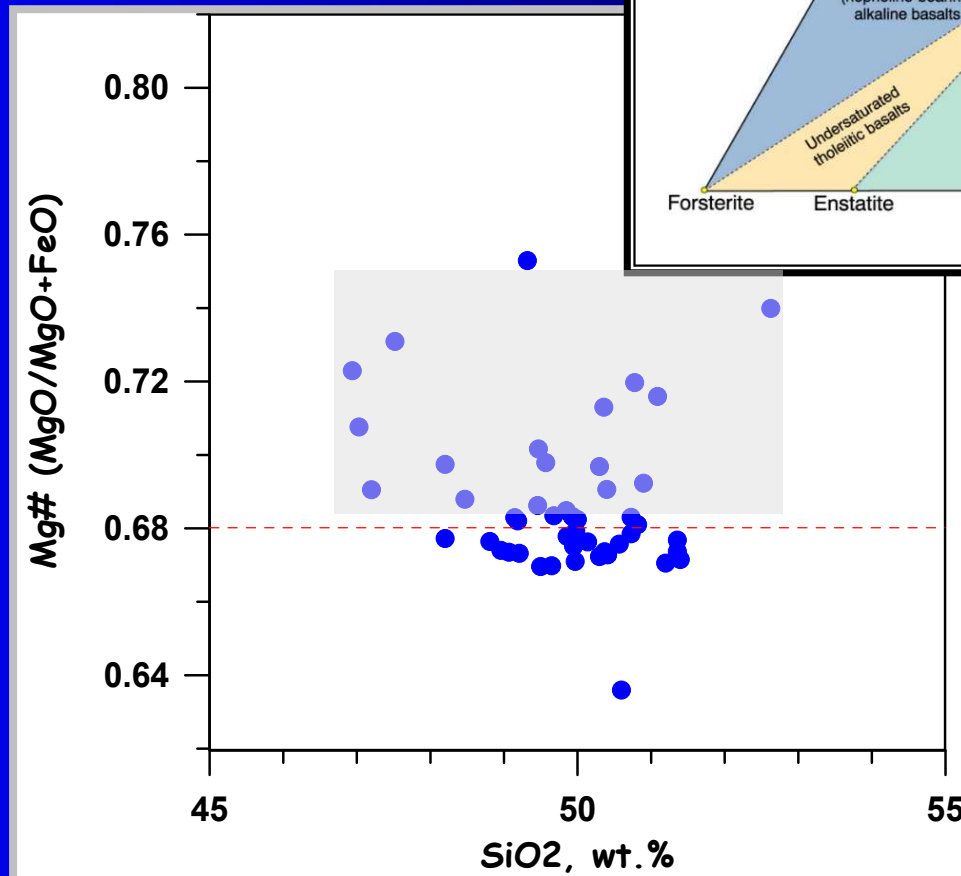
	All-77-76-61	ARP-74-10-16	Y-87-6-20
SiO ₂	51.20	49.47	47.52
TiO ₂	0.84	1.04	0.73
Al ₂ O ₃	15.00	14.57	14.39
FeO	7.90	8.08	9.52
MnO	0.16	0.20	-
MgO	9.02	10.66	14.51
CaO	13.3	12.21	10.98
Na ₂ O	1.89	2.19	1.84
K ₂ O	0.08	0.16	-
P ₂ O ₅	-	0.09	-
Mg#	0.67	0.70	0.73

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 толетитовых 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)

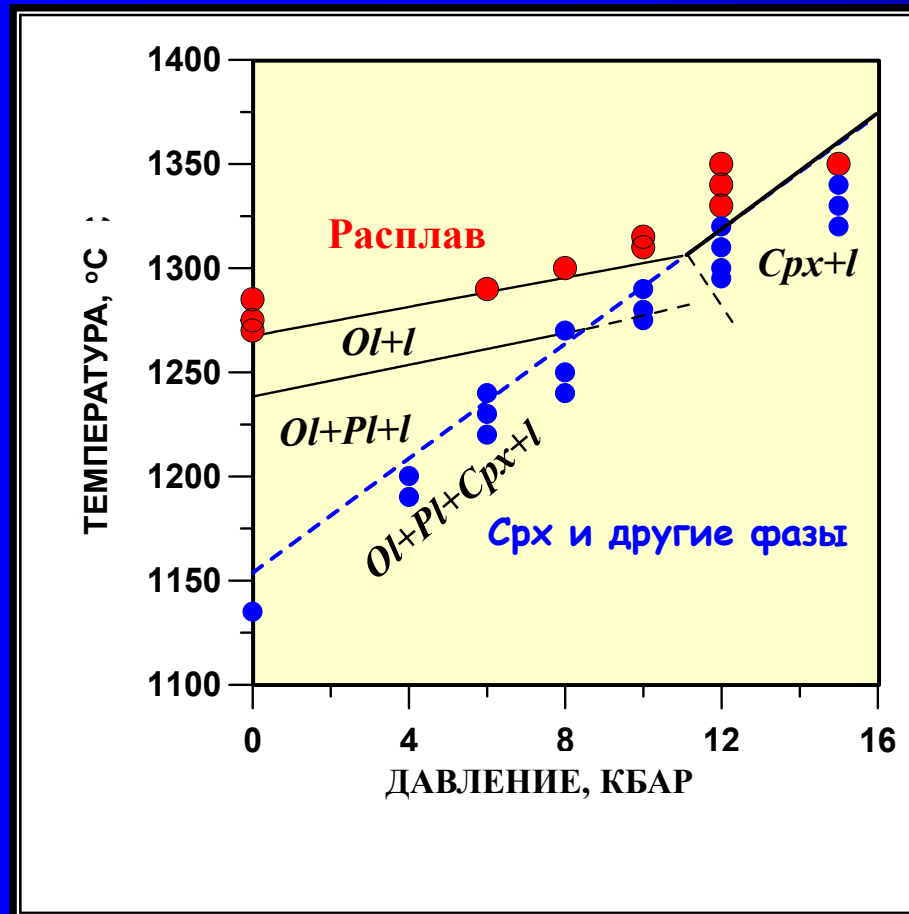
с целью определения степени
плавления и P - T параметров,

при которых состав модельной
выплавки даст реалистичный
прогноз первичной магмы

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

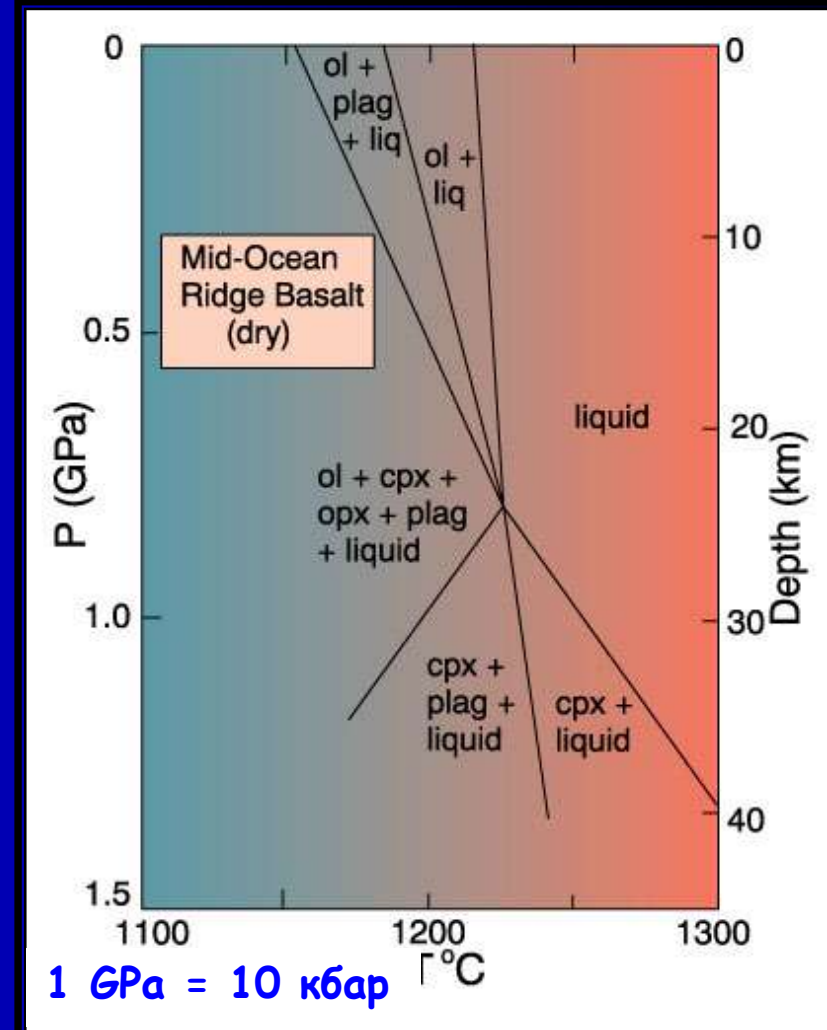
Изучение смены ликвидусных
минералов по мере увеличения
давления

Р-Т 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 $Cpx \Rightarrow$ 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 получаются 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 (Дмитриев и др., 1984)
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

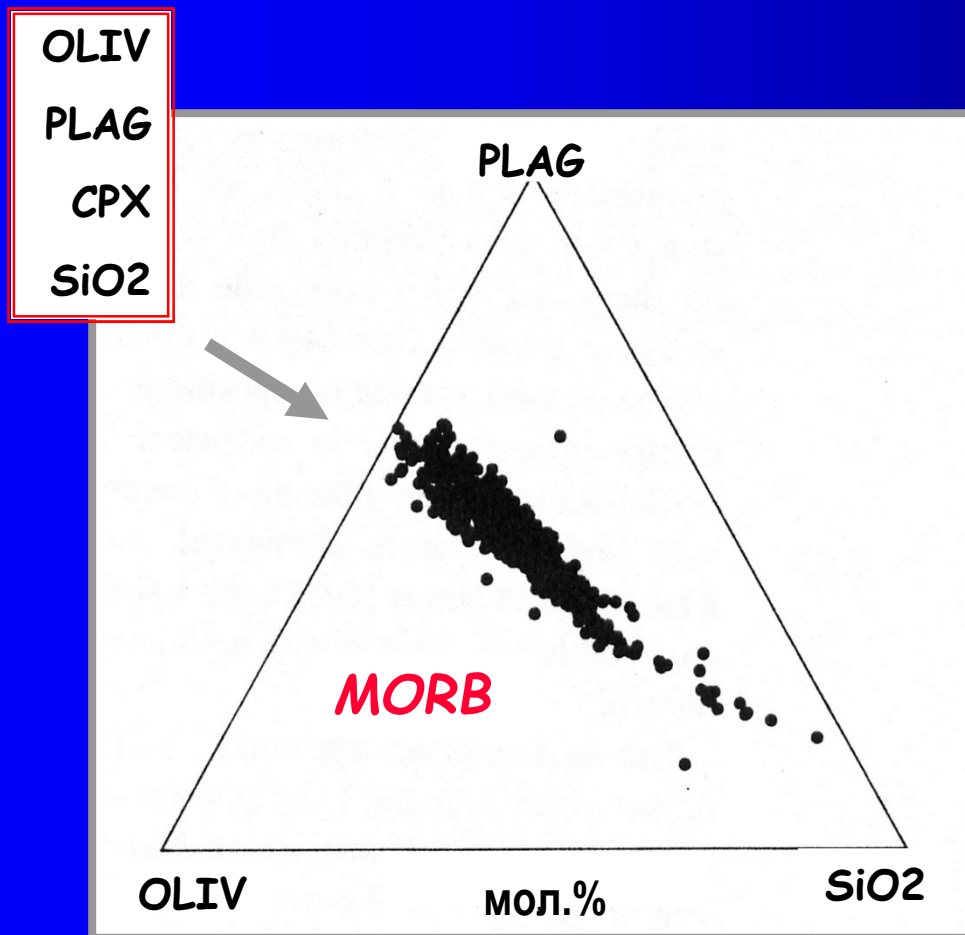
Проецирование составов экспериментальных стекол как основа построения барометрических диаграмм

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



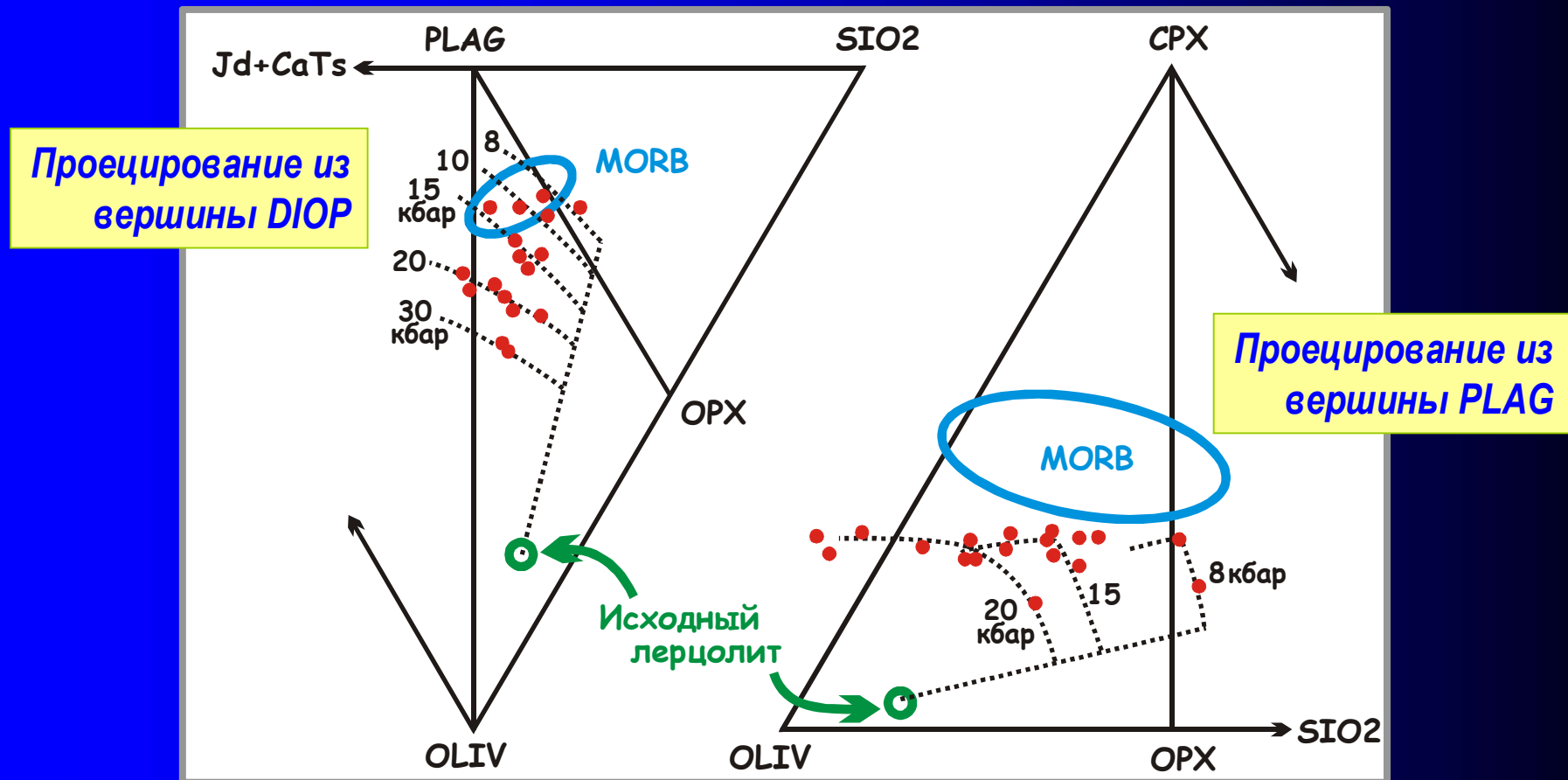
Нормативный состав	5 кбар, 1300°C	10 кбар, 1350°C
Qtz	...	...
Ort	...	...
Ab	...	...
An	...	...
Di	...	...
Opx	...	...
Oliv	...	...
Ap	...	...
Ilm	...	...
Mt	...	...
Mg#	0.75	0.73

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%

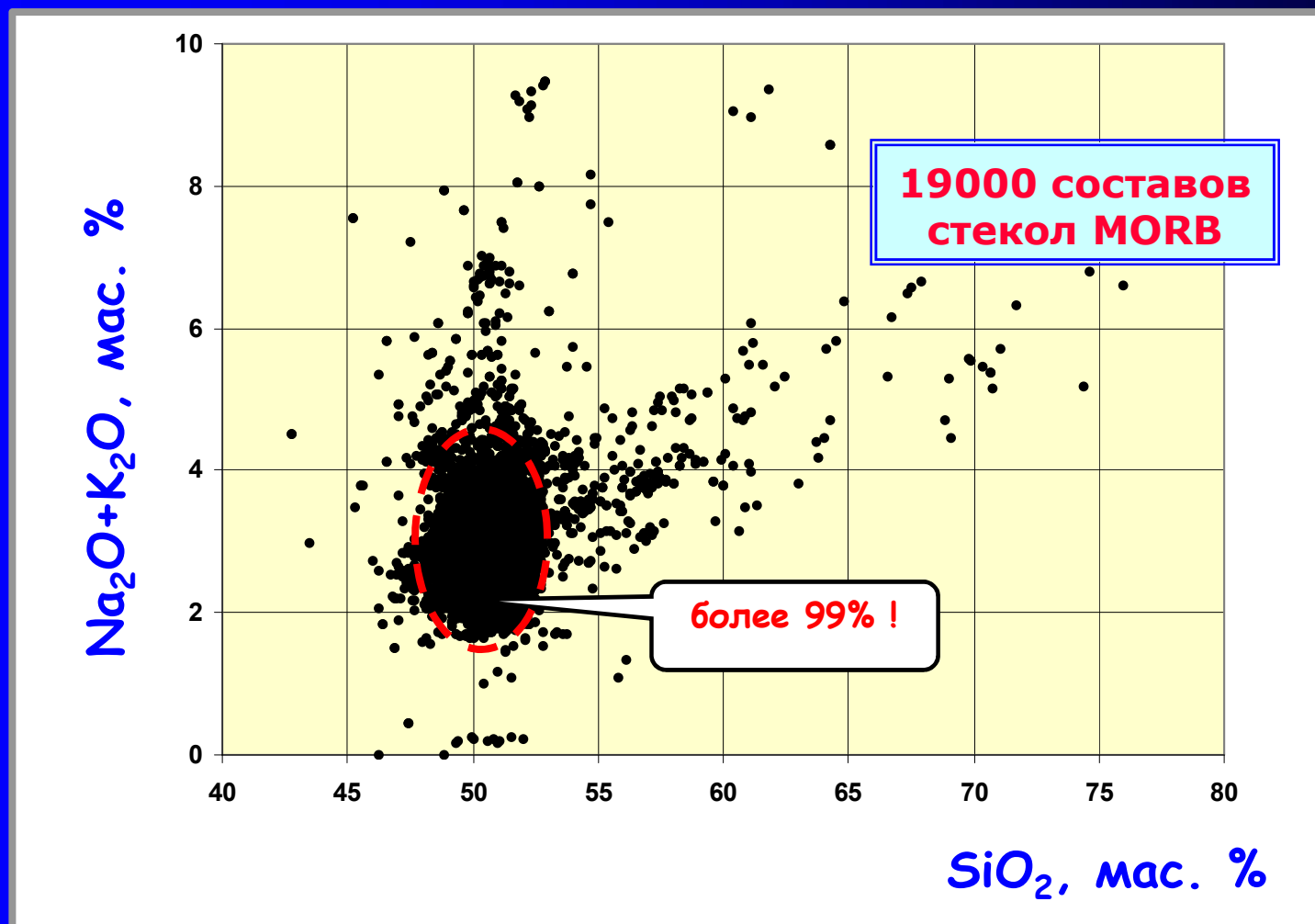
Проецирование по методу (Green and Falloon, 1987)



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

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

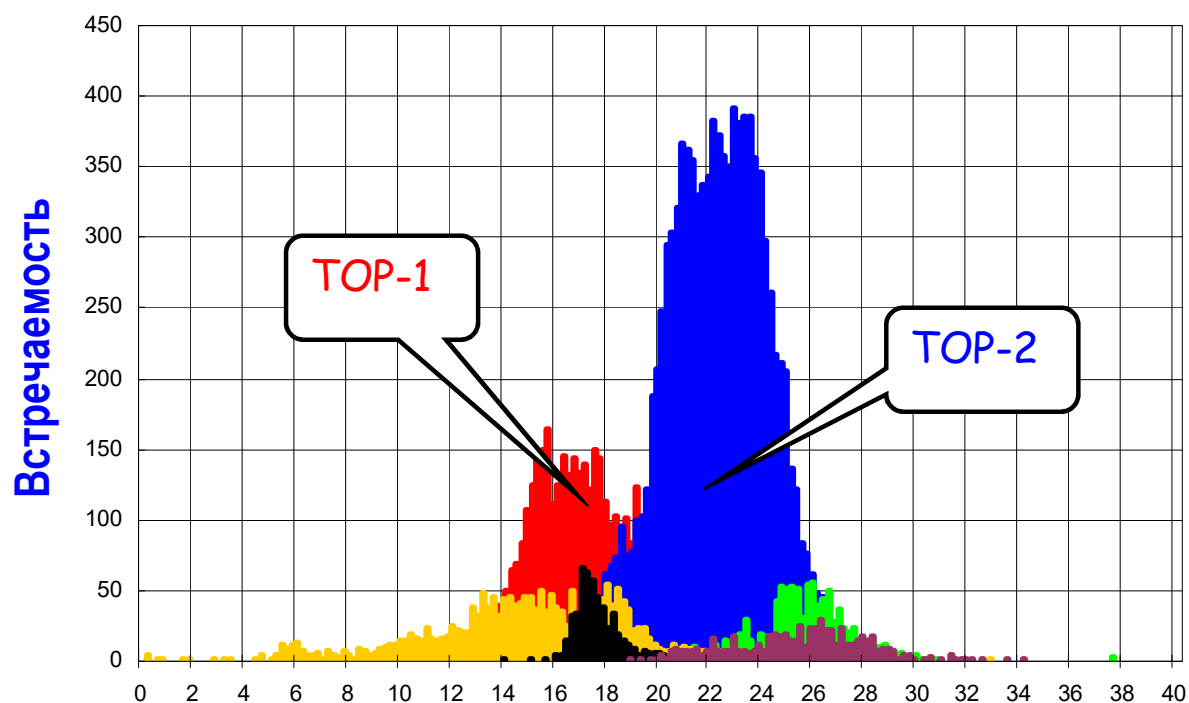
Современные данные о разнообразии базальтов срединно-океанических хребтов



Вариации общей щелочности более чем в 2 раза

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

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

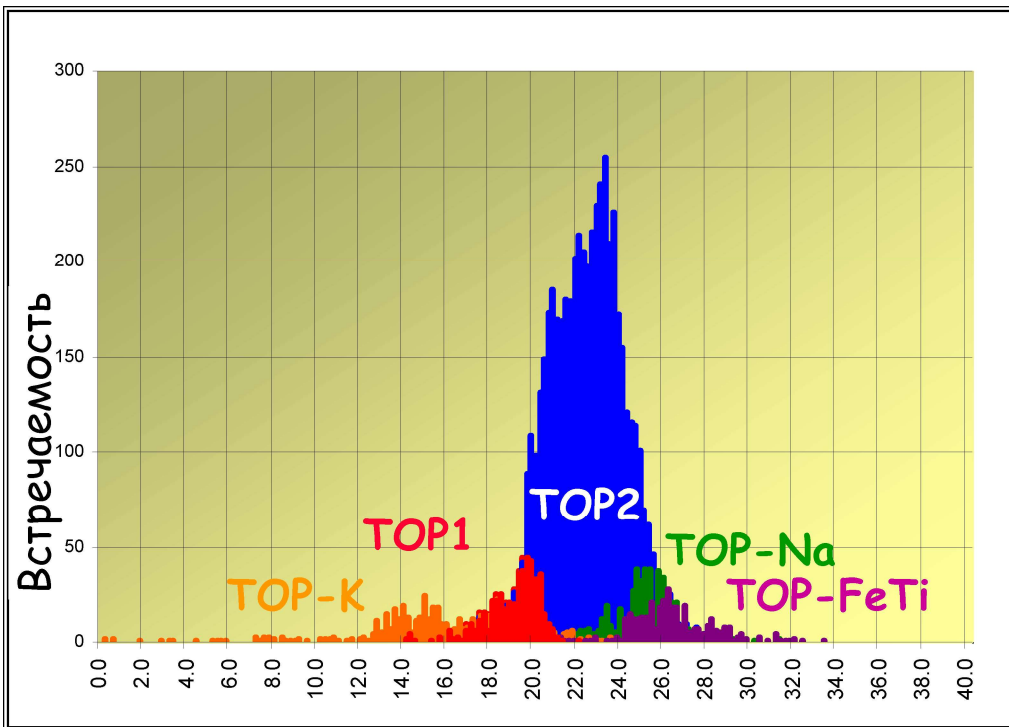


MORB	TOP-1	TOP-2	TOP-Na	TOP-K	TOP-Fe	TOP-FeTi
ВТП (N=6273)						
SiO ₂	50.19	50.65	50.92	50.73	49.80	50.98
TiO ₂	1.14	1.63	2.22	1.84	1.30	2.56
Al ₂ O ₃	15.88	15.01	14.28	15.79	15.09	13.30
FeO	9.19	10.33	11.80	9.69	12.21	13.79
MgO	8.55	7.55	6.38	6.95	7.70	5.77
CaO	12.52	11.81	10.79	11.04	11.49	10.17
Na ₂ O	2.33	2.75	3.17	3.09	2.26	3.01
K ₂ O	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)						
SiO ₂	51.01	50.92	51.22	51.33	51.09	50.71
TiO ₂	1.08	1.52	2.06	1.65	1.35	1.94
Al ₂ O ₃	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
Na ₂ O	2.16	2.78	3.37	2.81	2.06	2.33
K ₂ O	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

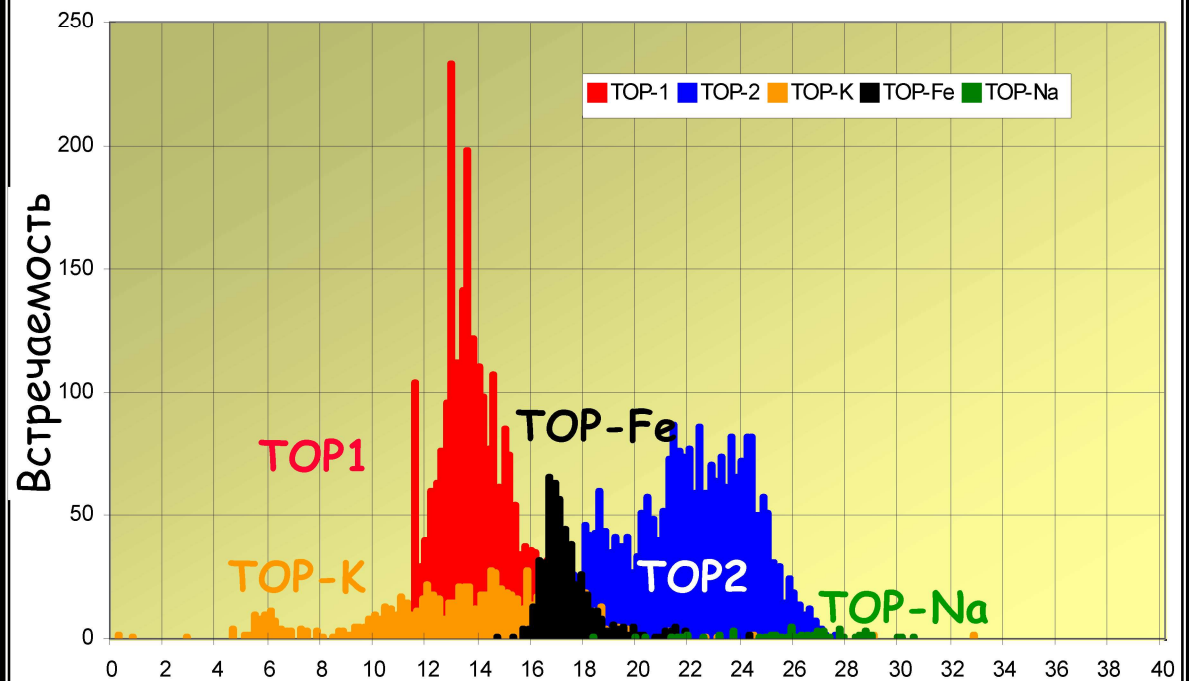
- Разные пропорции в высоко- и низко-скоростных спрединговых центрах



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 Ol, 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

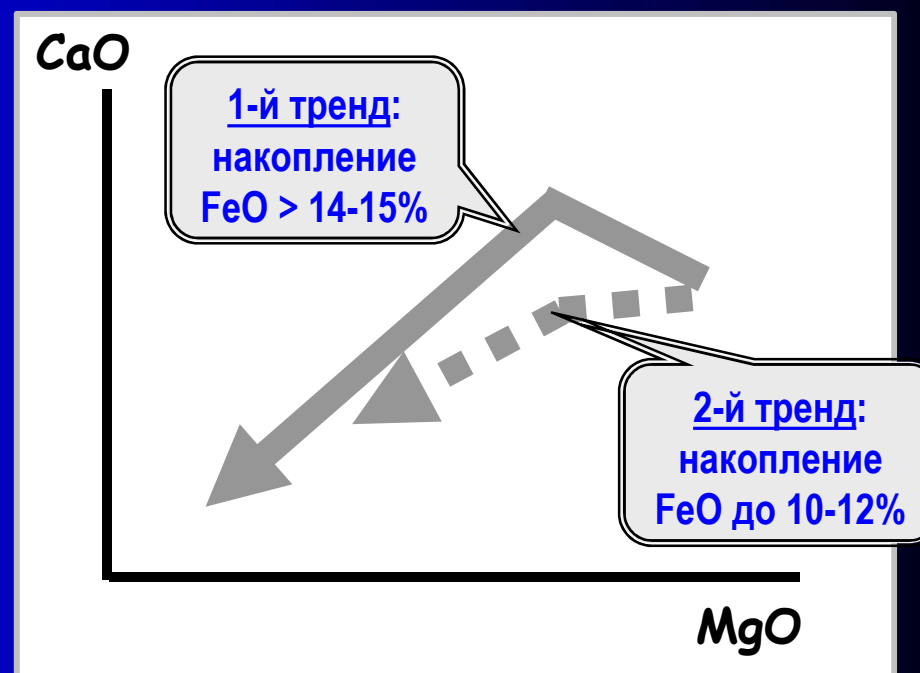
- Высокоглиноземистые шпинели ($Al_2O_3 < 45\%$, $Cr_2O_3 = 20\%$)

P=5-6 кбар

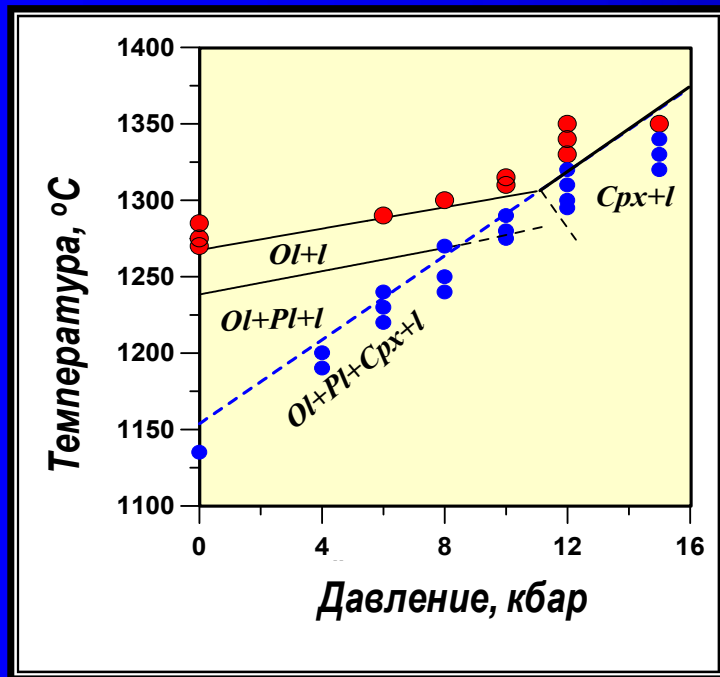
Соотношения CaO-MgO для серий MORB, различающихся по степени накопления FeO

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ

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

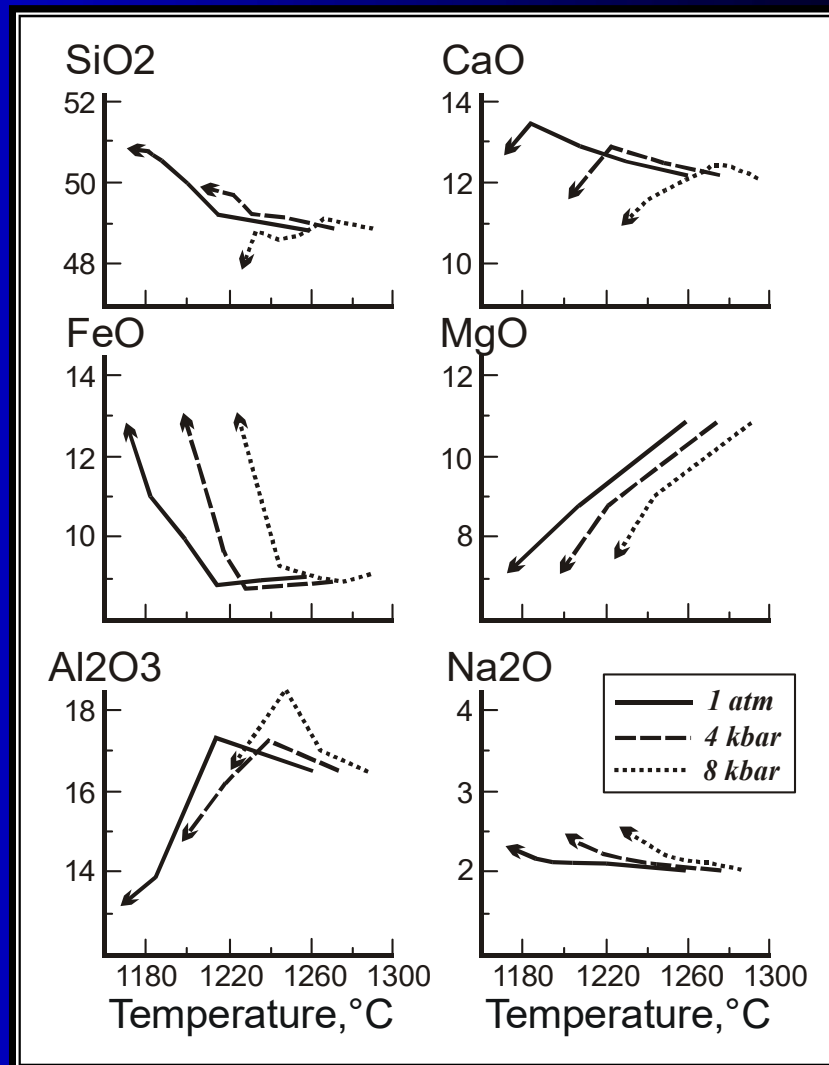


Особенности полибарического фракционирования ТОЛЕИТОВЫХ МАГМ

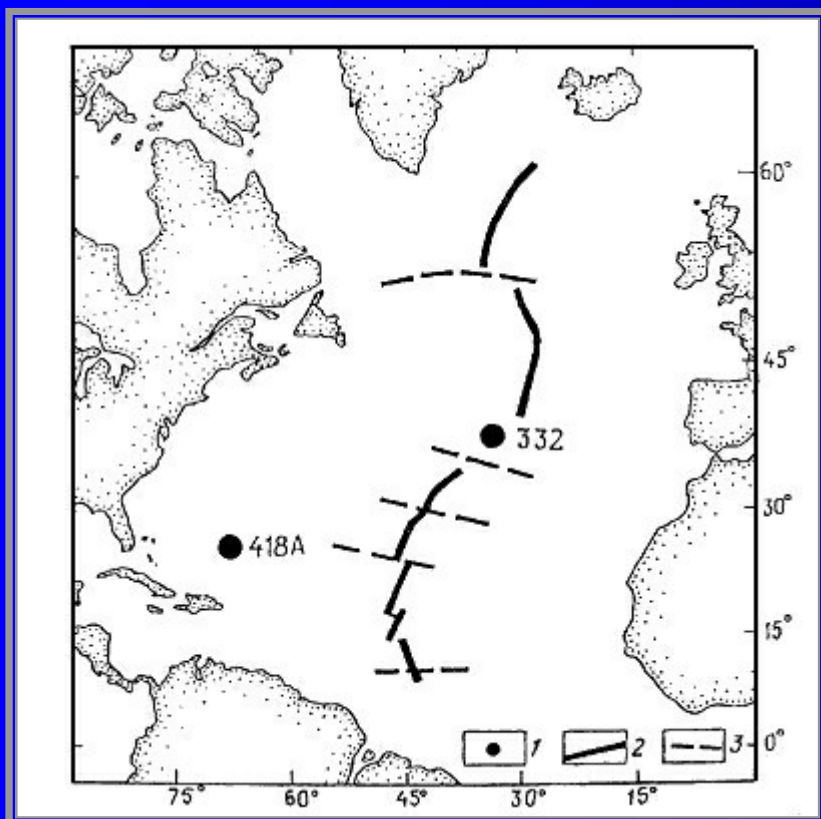


*P-T диаграмма магнезиального
толеита (Bender et al., 1978)*

*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

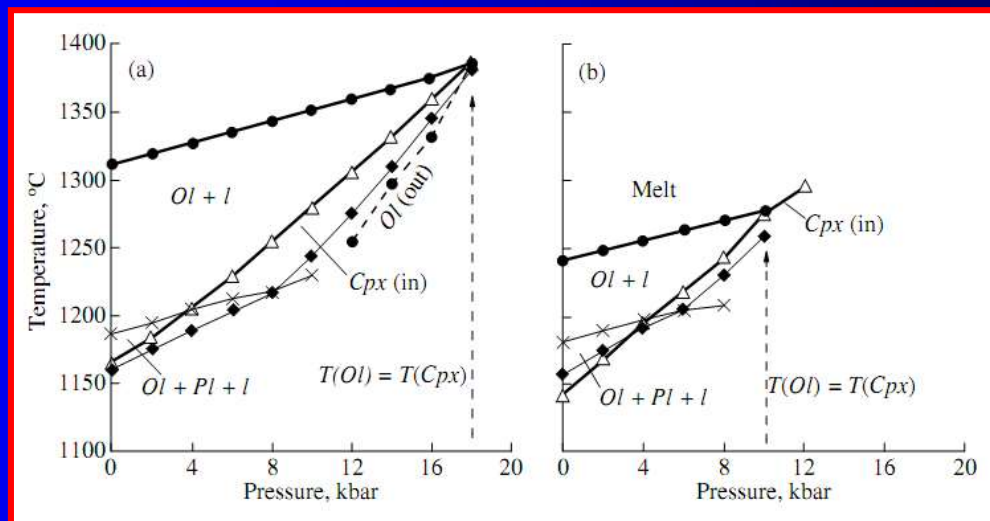
Составы исходных магм из скв. 332 и 418А, использованные при моделировании полибарического фракционирования

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

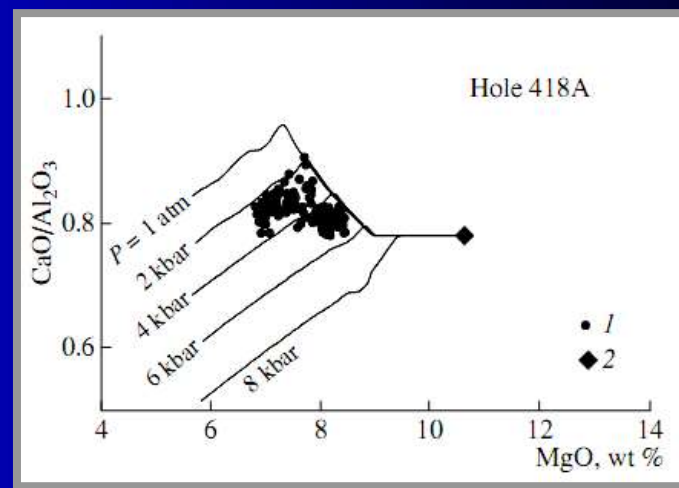
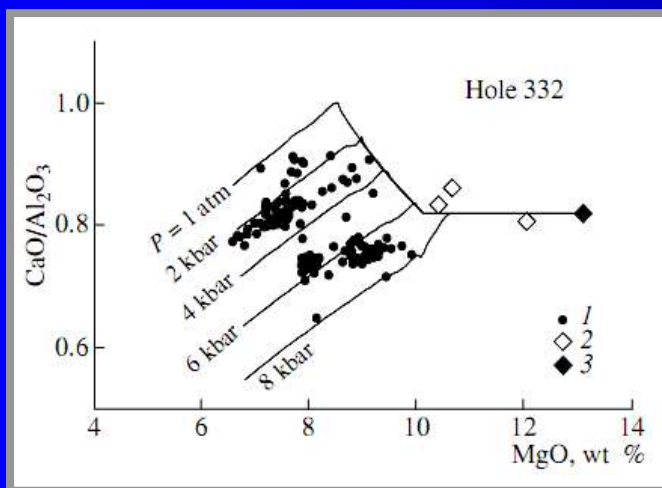
Составы приведены к 100 мас.%. TOR-1 - тугоплавкое включение в ОI из скв. 332 (Дмитриев и др., 1984); МБ - магнетиальный базальт из скв. 418А (85-1, 145-148 - Init. Rep. DSDP, 1977)

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