

# ПЕТРОЛОГИЯ, часть 2. Магматизм

## Лекция 9. Магматизм срединно-океанических хребтов

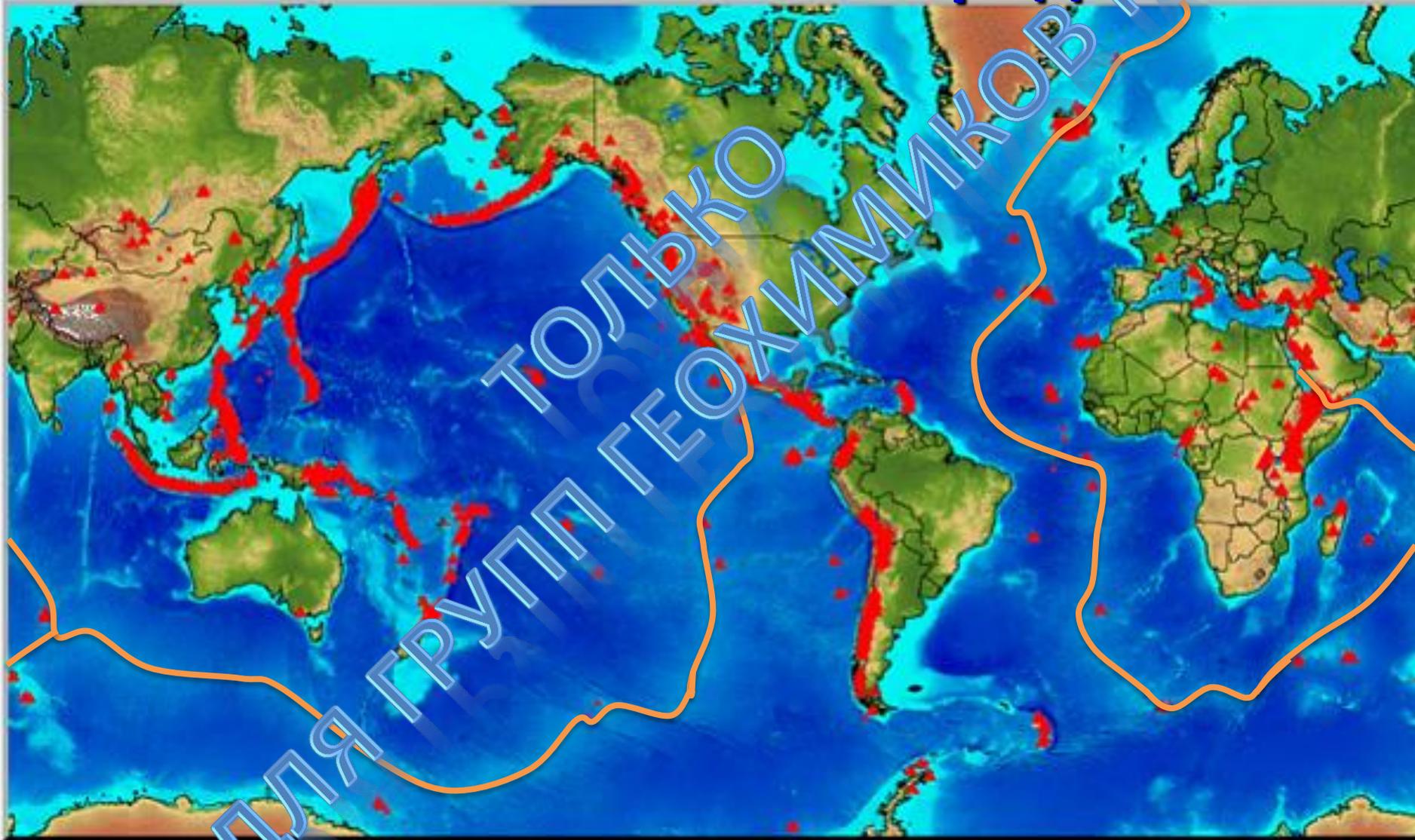
Магматизм срединно-океанических хребтов. Петрография, классификация, породообразующие минералы и условия формирования магматических пород срединно-океанических хребтов. Строение офиолитовой формации. Мантийные перидотиты, их фации и условия плавления под срединно-океаническими хребтами. Расслоенные интрузивы основных-ультраосновных пород хромитовые и сульфидные руды, условия формирования и гипотезы происхождения.

каф.петрологии

Геологический факультет МГУ

2013

# Где происходит образование магматических пород?



Проявления вулканизма трассируют области современного магматизма

# Продуктивность современных геодинамических обстановок



Вулканические

Интрузивные

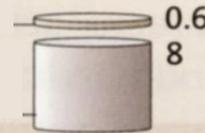
км<sup>3</sup>/год



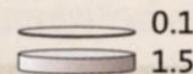
СОХ



Океанические острова



Зоны субдукции



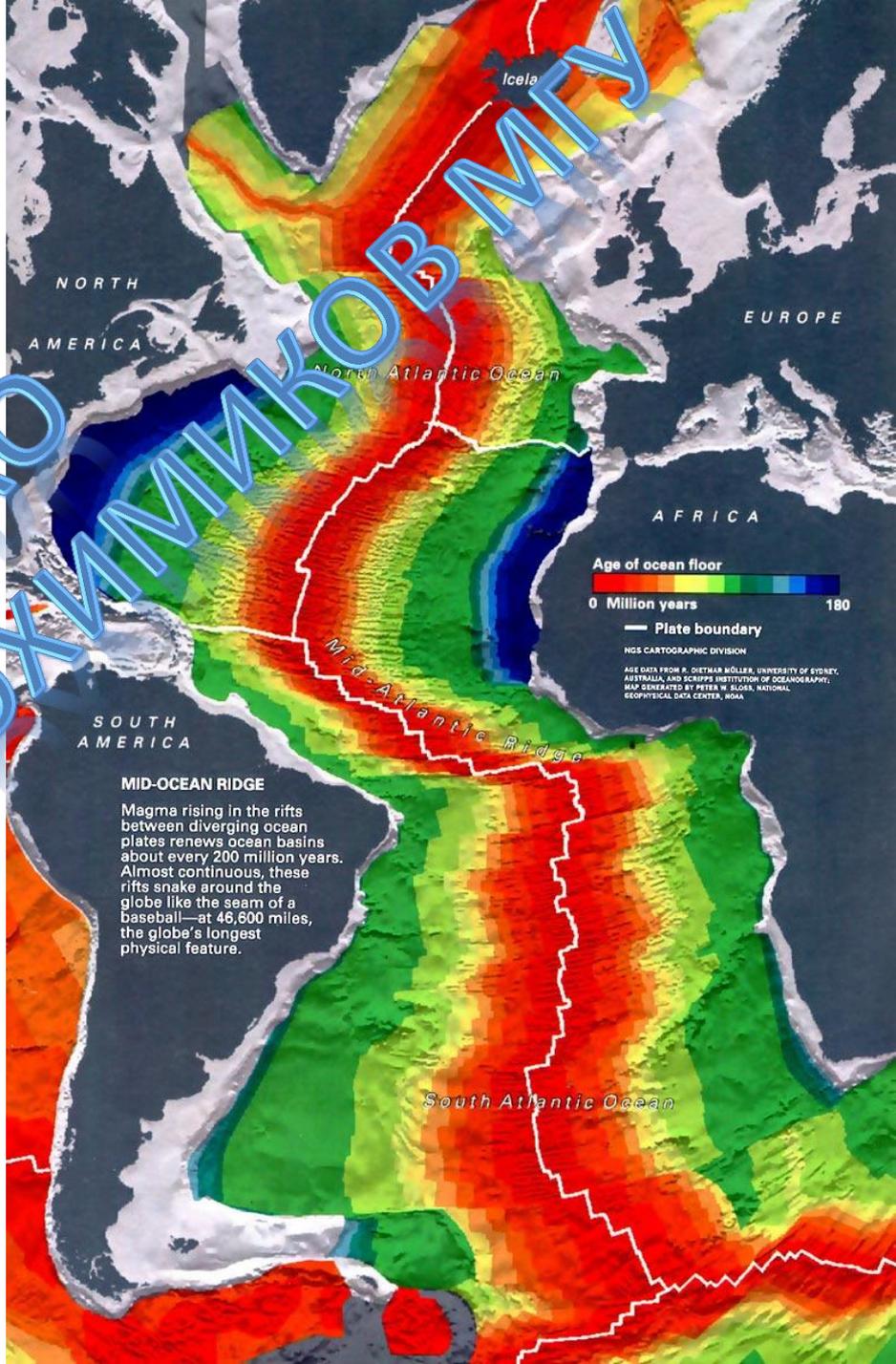
Континентальные рифты

ТОЛЬКО  
ДЛЯ ГРУППЫ  
ГЕОХИМИКОВ  
В АМГУ

# Базальтовые лавы и возраст океанов

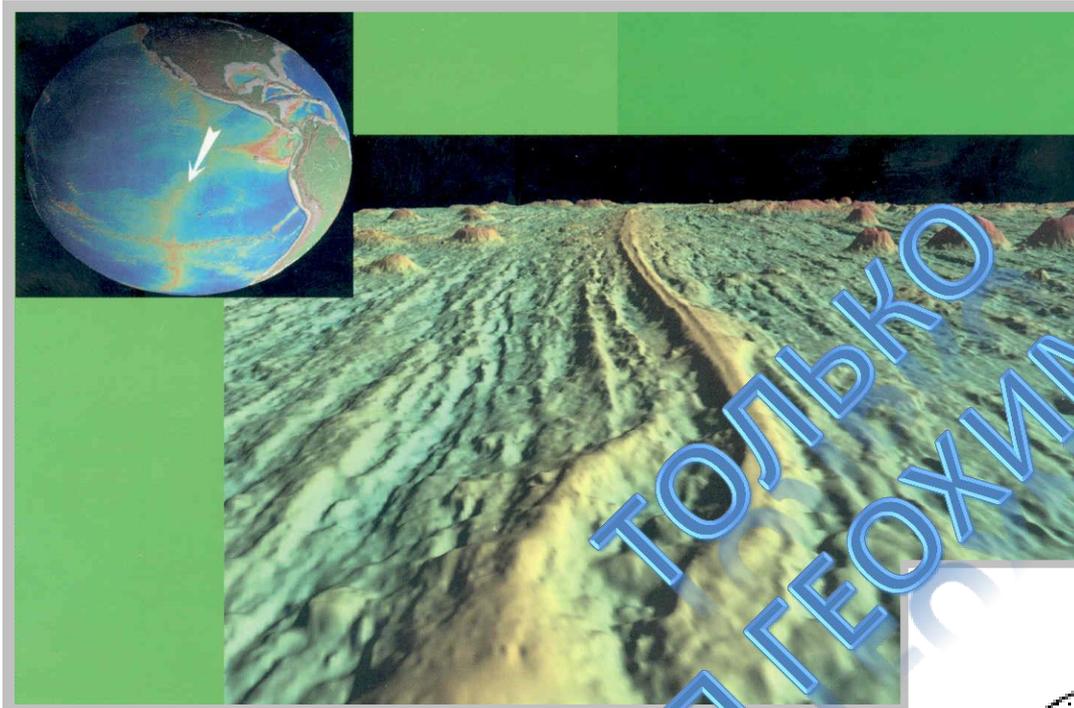


	Юра		Мел
	Палеоген		N+Q



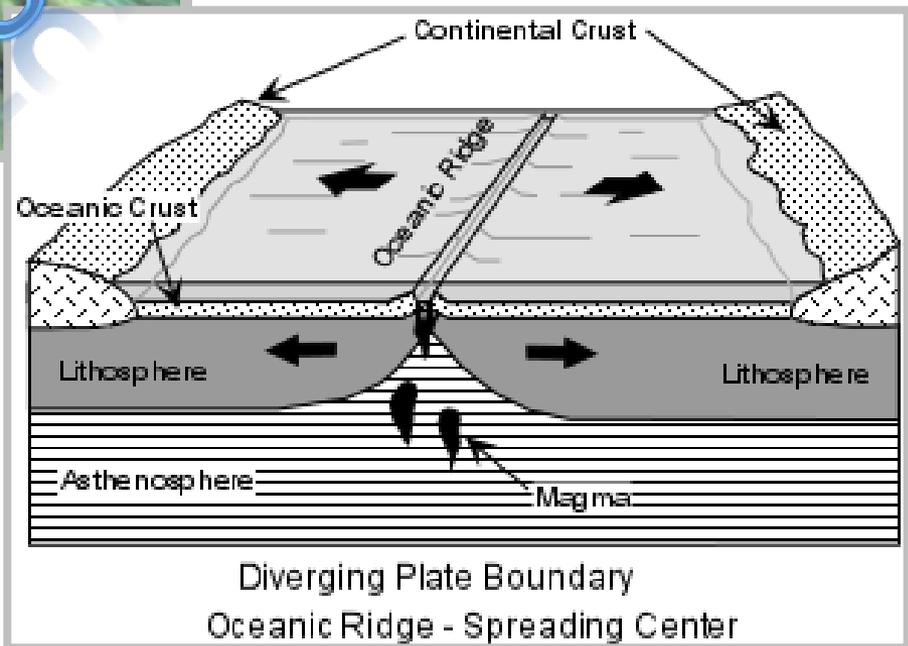
ДЛЯ ГРУПП ТОЛЬКО ГЕОХИМИКОВ МГУ

# Срединно-океанические хребты (СОХ)



Морфология  
океанических  
хребтов

Схема строения  
спрединговой зоны



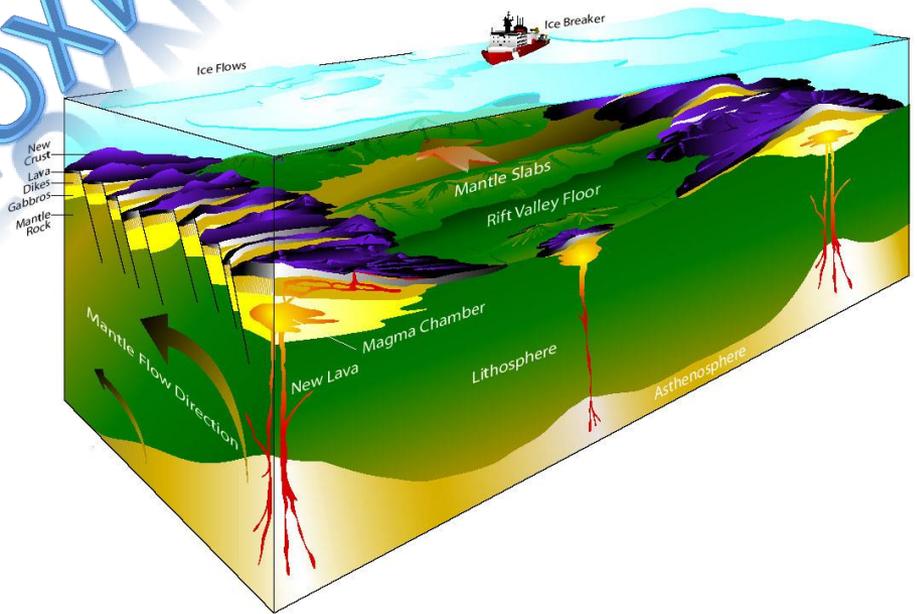


Рифтовая долина при быстром спрейндинге



Рифтовая долина при медленном спрейндинге

Зависимость  
морфологии рифтовой  
долины от скорости  
спрейндинга



Сверхмедленный спрейндинг на хребте Гаккеля, Dick et al., Nature, 2003

# Объем и характер извержений БСОХ

Общий объем извергаемого в срединных хребтах вулканического материала составляет **3-4 км<sup>3</sup> в год**

Тип извержений трещинный и центральный при спокойном экструзивно-эффузивном характере. Среди продуктов вулканизма преобладают **лавовые купола и потоки**

Поскольку глубины СОХ (3-4 км) характеризуются высоким гидростатическим давлением, превышающим давление растворенных в магме газов, то гиалокластиты редки (*это продукты дробления и распыления базальтовой лавы и состоящие из острогоугольных обломков вулканического стекла*)

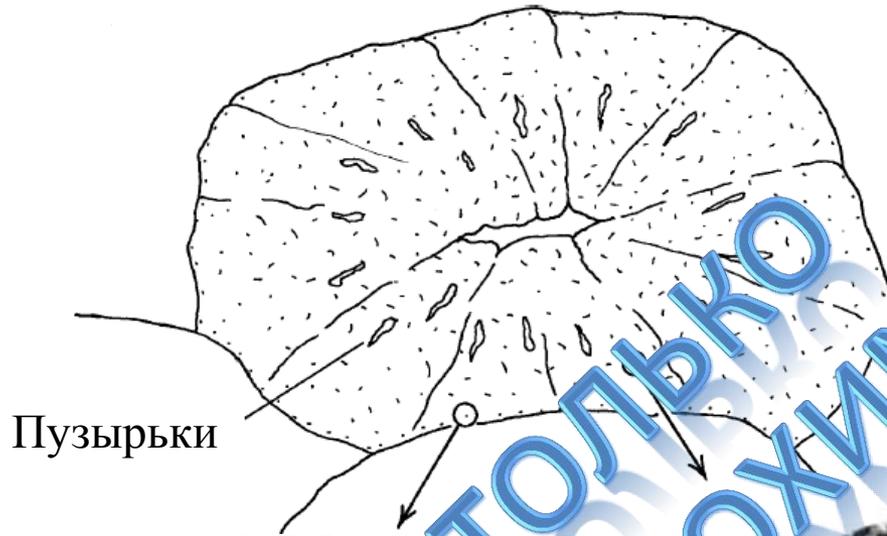
Вследствие несопоставимых скоростей вулканизма и осадконакопления роль осадочных пород в толщах вулканитов незначительна

# Пиллоу-лавы

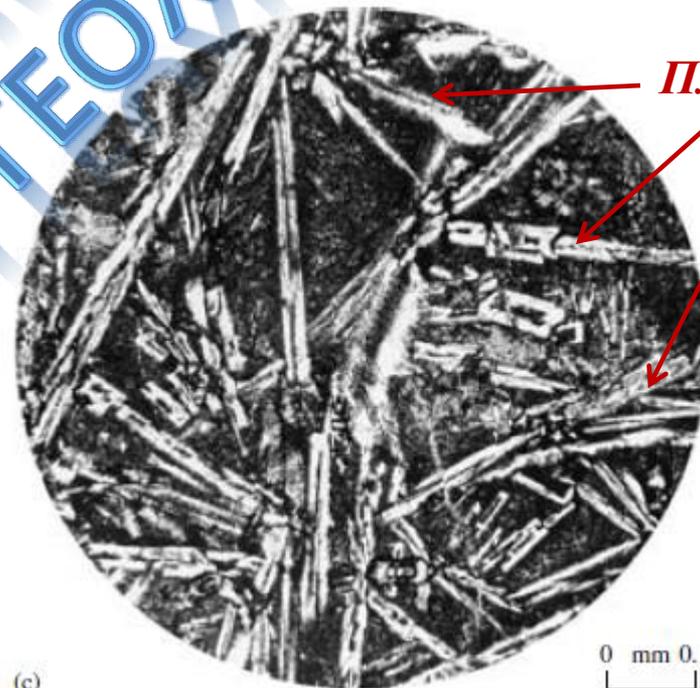
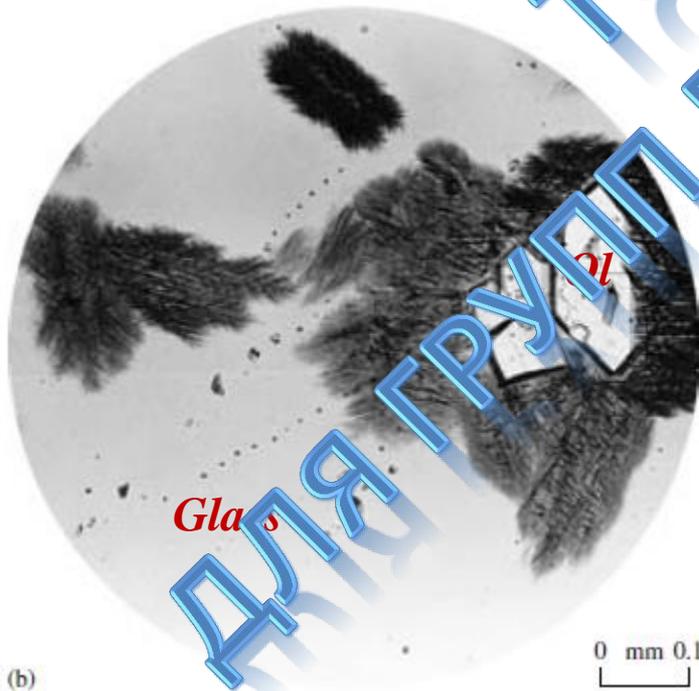


Свежие пиллоу-лавы в срединно-океанических хребтах

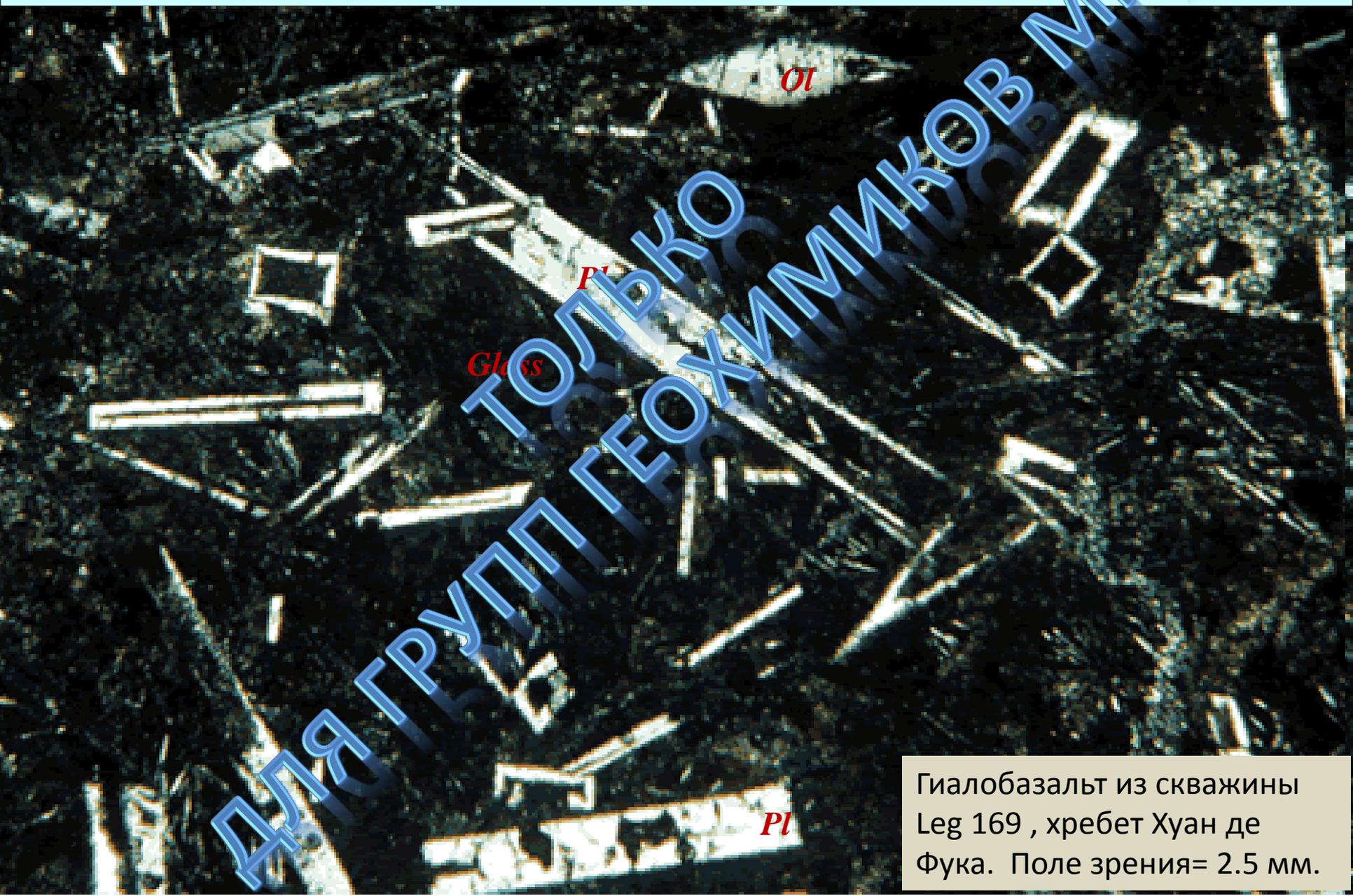
# Строение «подушек»



«Подушки» зональны – к центру увеличивается степень раскисления и, часто, количество вкрапленников.



# Петрография базальтов СОХ



Гиалобазальт из скважины  
Leg 169 , хребет Хуан де  
Фука. Поле зрения= 2.5 мм.

# Структуры базальтов СОХ

В базальтах СОХ широко развиты **афировые**, реже **пофидовые** структуры.

Варьирует степень кристалличности - от стекловатых пород до полностью раскристаллизованных

Во вкрапленниках преобладают следующие парагенезисы:



Вулканические стекла двух разновидностей:

- чистые прозрачные *гуаломеланы* и
- темно-бурые непрозрачные *сидеромеланы*



Раскристаллизованные породы слагают дайки и силлы. Основная масса сложена Pl, Crx (авгит, пижонит) и поздним Ti-Mt, реже ильменитом. В отличие от толеитов других обстановок пироксен во вкрапленниках относительно редок

# Химический и минеральный состав БСОХ

**Table 13-2.** Average Analyses and CIPW Norms of MORBs (BVTP Table 1.2.5.2)

Oxide (wt%)	All	MAR	EPR	IOR
SiO <sub>2</sub>	50.5	50.7	50.2	50.9
TiO <sub>2</sub>	1.56	1.49	1.77	1.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.3	15.6	14.9	15.2
FeO*	10.5	9.85	11.3	10.3
MgO	7.47	7.69	7.10	7.69
CaO	11.5	11.4	11.4	11.8
Na <sub>2</sub> O	2.62	2.66	2.66	2.57
K <sub>2</sub> O	0.16	0.17	0.16	0.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.12	0.1	0.10
Total	99.74	99.68	99.63	99.64
Norm				
q	0.94	0.76	0.93	1.60
or	0.95	1.0	0.95	0.83
ab	22.17	22.51	22.11	19.64
an	29.44	30.13	29.42	30.53

Типичные базальты MORB

**SiO<sub>2</sub> 48.5 – 51.0**

**K<sub>2</sub>O < 0.2 %**

**TiO<sub>2</sub> 1- 2 %**

**K/Ti < 0.1**

**H<sub>2</sub>O < 0.25 wt %**

All: Ave of  
MAR: Ave.  
IOR: Ave.

**Оливин:** Fo<sub>90</sub> в пикритах, до Fo<sub>80</sub> в менее магнезиальных разностях

**Плагиоклазы вкрапленников:** An<sub>60-90</sub> (в брадор-битовнит), в основной массе присутствуют микролиты плагиоклаза An<sub>60-50</sub>

**Шпинелиды:**

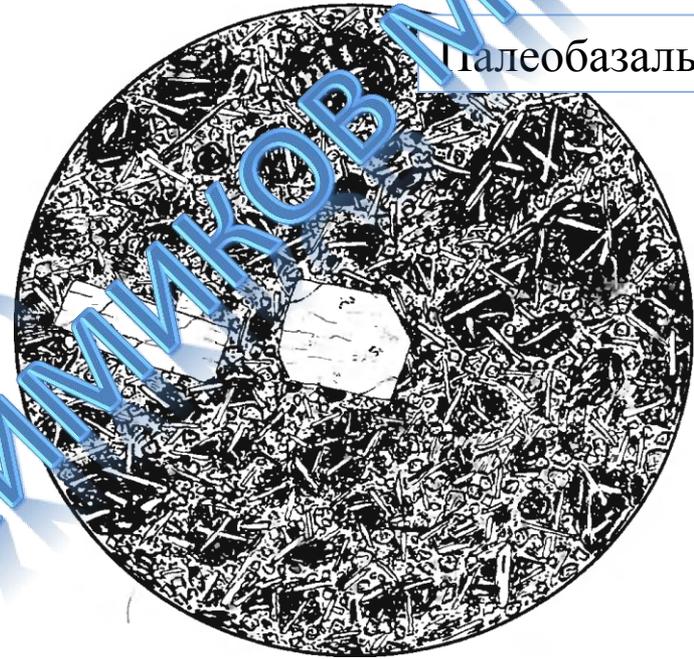
- *Магнезиально-хромистые и хромистые* обычны в пикритах и высокомагнезиальных базальтах. Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в них достигает 25-45%, а Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 12-20%.

# Общие черты БСОХ=MORB

Афировые или  
редкопорфировые структуры

Расщепленные кристаллы  
плагиоклаза в основной  
массе

Малое количество газовых  
пузырьков, которые часто  
имеют округлую форму и  
заполнены вторичными  
минералами (саладонит,  
гетит, халцедон, хлорит и  
т.д.)

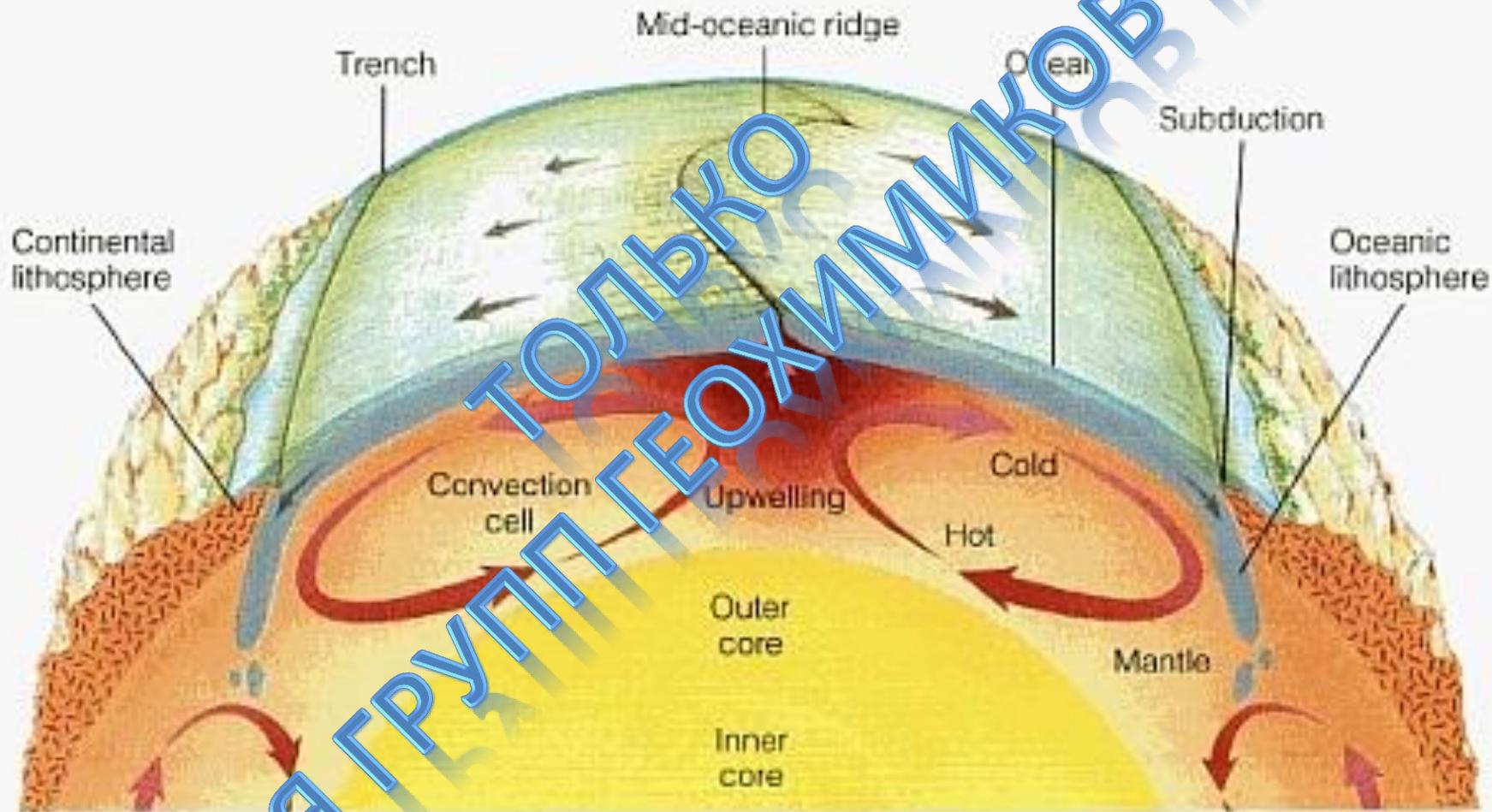


Палеобазальт ВТП



Палеобазальт ВТП

# Схема простой конвекции и образование СОХ



ТОЛЬКО  
ГРУПП  
ГЕОХИМИКОВ  
В МГУ  
ДЛЯ

# Главные минералы верхней мантии

Оливин  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

Состав: Форстерит  
 $100 \cdot \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  88-94  
Количество: 50-98%

Ортопироксен

$(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$

Состав: Энстатит  
 $100 \cdot \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  86-93  
Количество: 1-35%

Клинопироксен

$\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$

Состав: Диопсид  
 $100 \cdot \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) > 86-93$   
Количество: 1-25%

Плагиоклаз

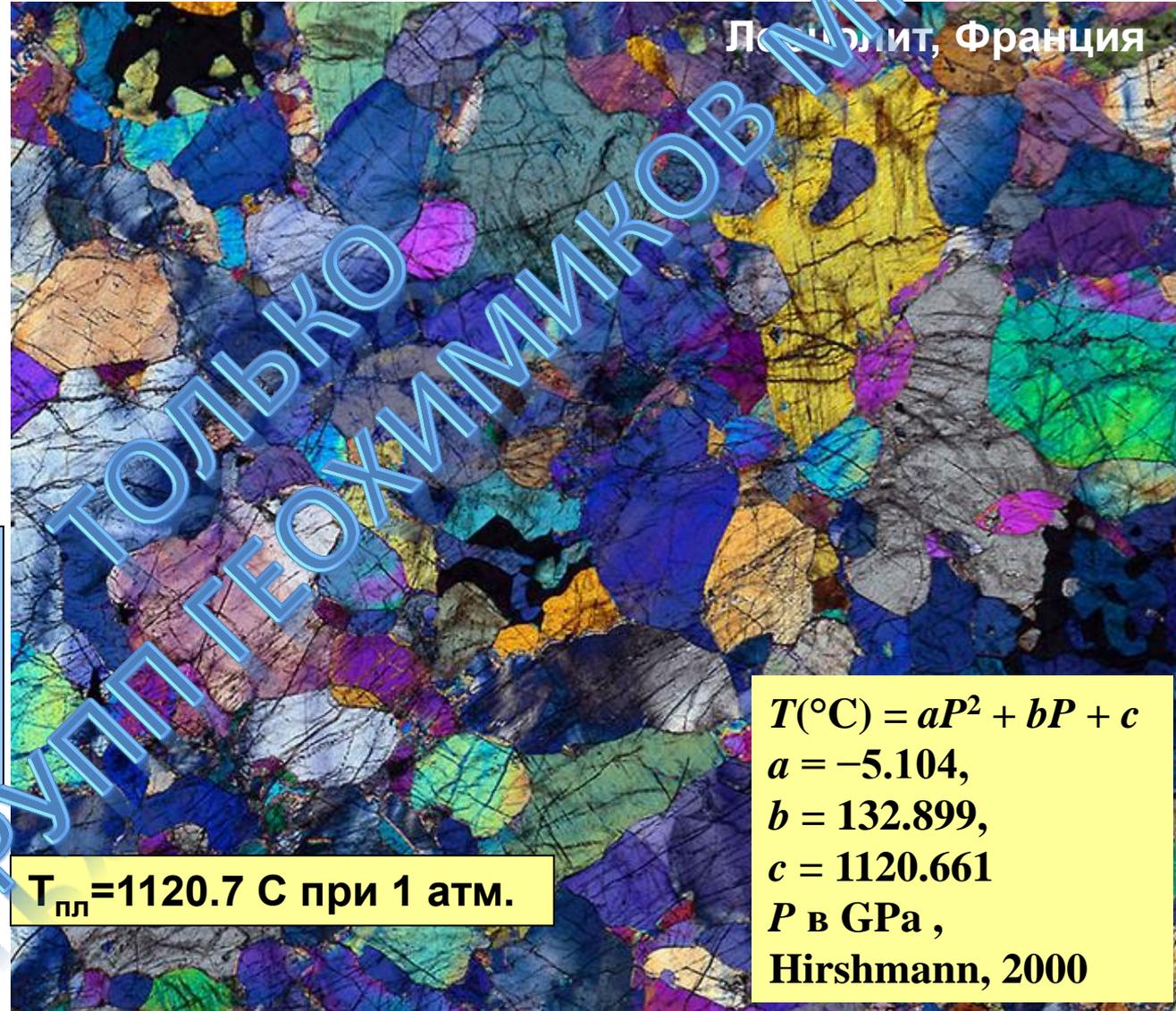
$(\text{Ca,Na})\text{Al}_{2-3}\text{Si}_{2-3}\text{O}_8$

Шпинель

$(\text{Mg,Fe})(\text{Al,Cr})_2\text{O}_4$

Гранат

$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Al,Cr})_2[\text{SiO}_4]_3$



Лавровит, Франция

$T_{\text{пл}} = 1120.7 \text{ C}$  при 1 атм.

$$T(^{\circ}\text{C}) = aP^2 + bP + c$$

$$a = -5.104,$$

$$b = 132.899,$$

$$c = 1120.661$$

$P$  в GPa ,

Hirshmann, 2000

Главные компоненты: Mg, Si, Ca, Al –  
в равновесии должно быть 4 минерала



# Декомпрессионное плавление мантии



Geochemistry  
Geophysics  
Geosystems **G<sup>3</sup>**

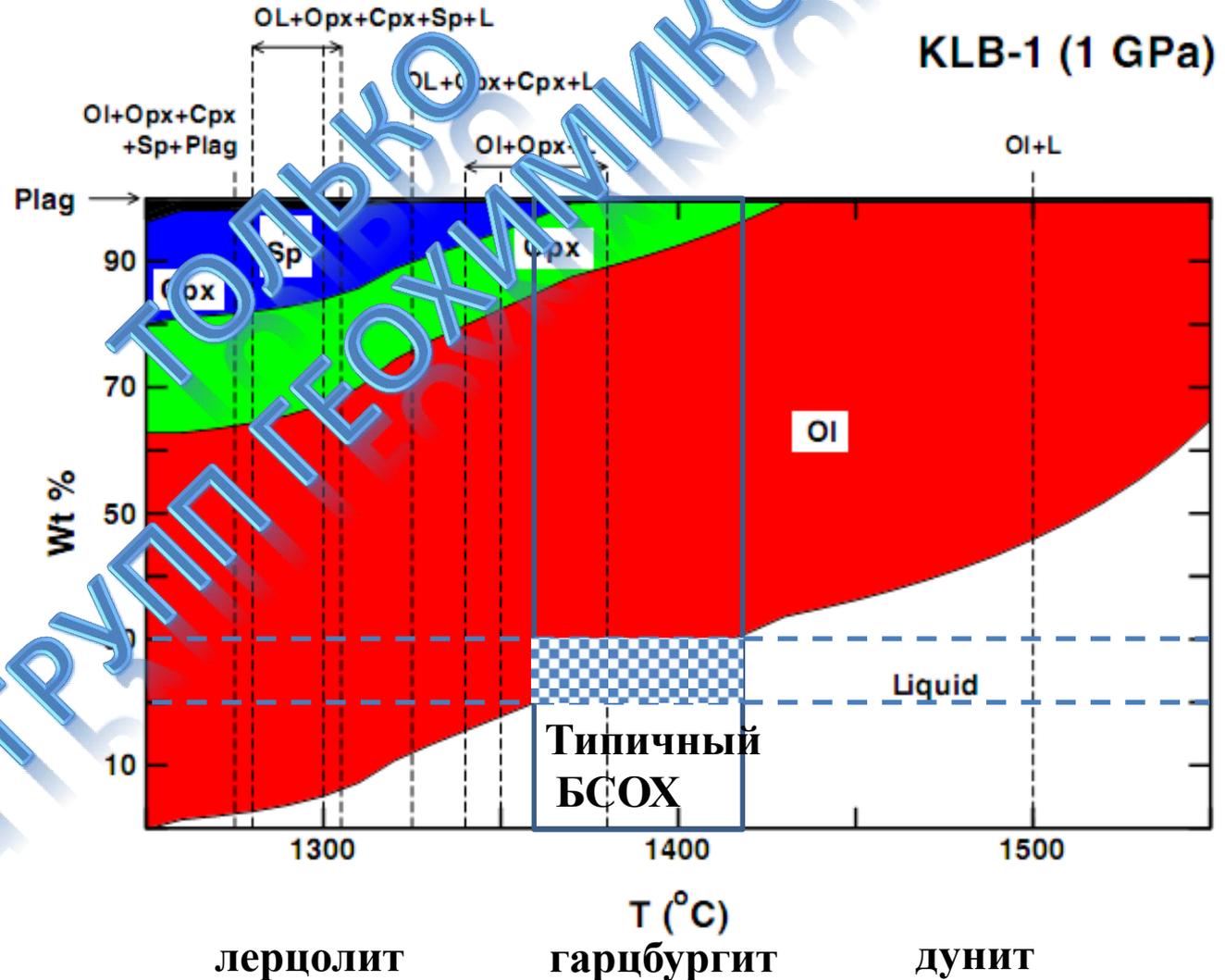
GHIORSO ET AL.: pMELTS, A REVISION OF MELTS

10.1029/2001GC000217



Пол Азимов,  
программа PMELTS

Плавление лерцолита  
при 1 GPa по  
программе PMELTS

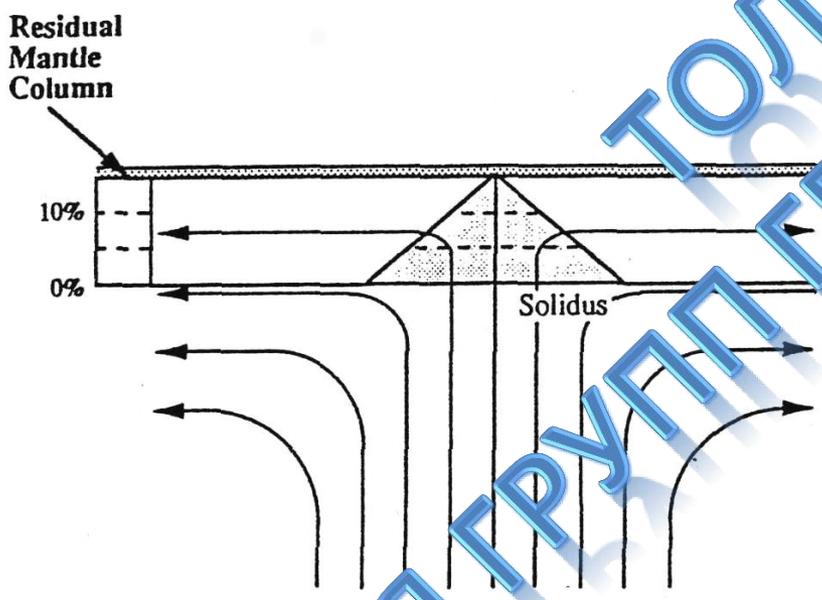


# Декомпрессионное плавление мантии

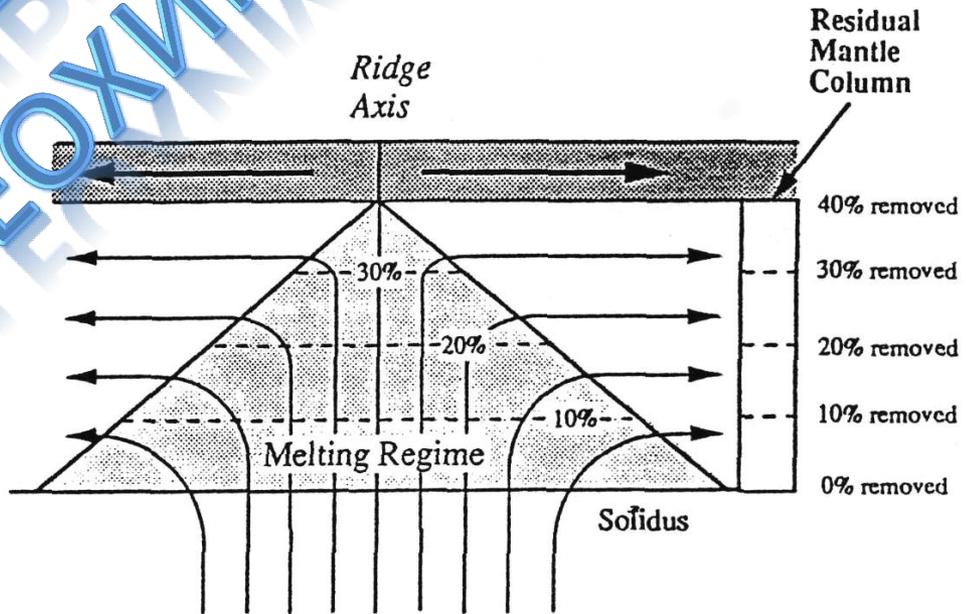
Мантийный диапир поднимается под СОХ и начинает частично плавиться. Образуется серия расплавов, которые отделяются от мантийного вещества и формируют магматические очаги в области СОХ. Мантийное вещество, оставшееся от плавления, удаляется из зоны плавления процессами срединга (мантийной конвекции).



Charles H. Langmuir

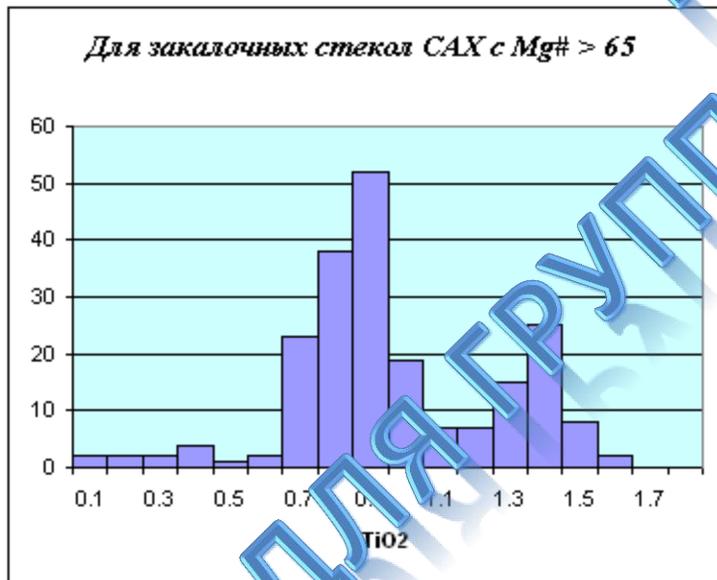
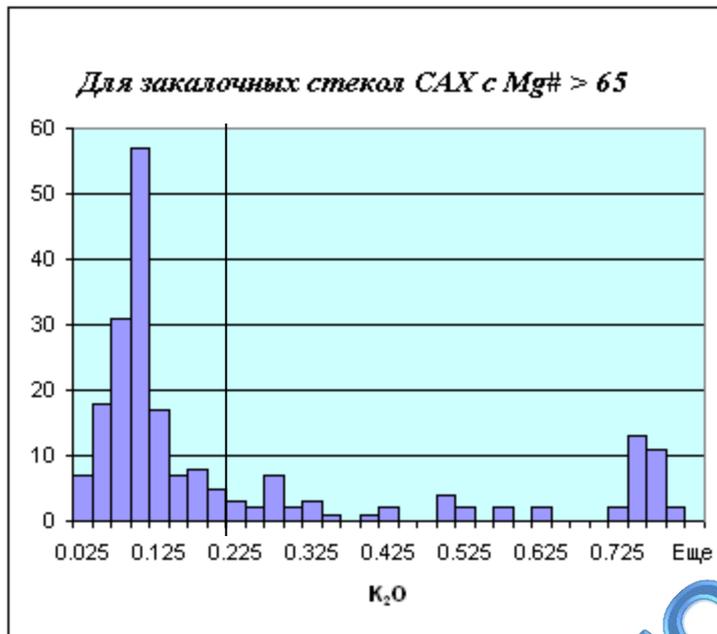


Холодная мантия



Горячая мантия

ТОЛЬКО ДЛЯ ГРУППЫ ГЕОХИМИКОВ В МГУ

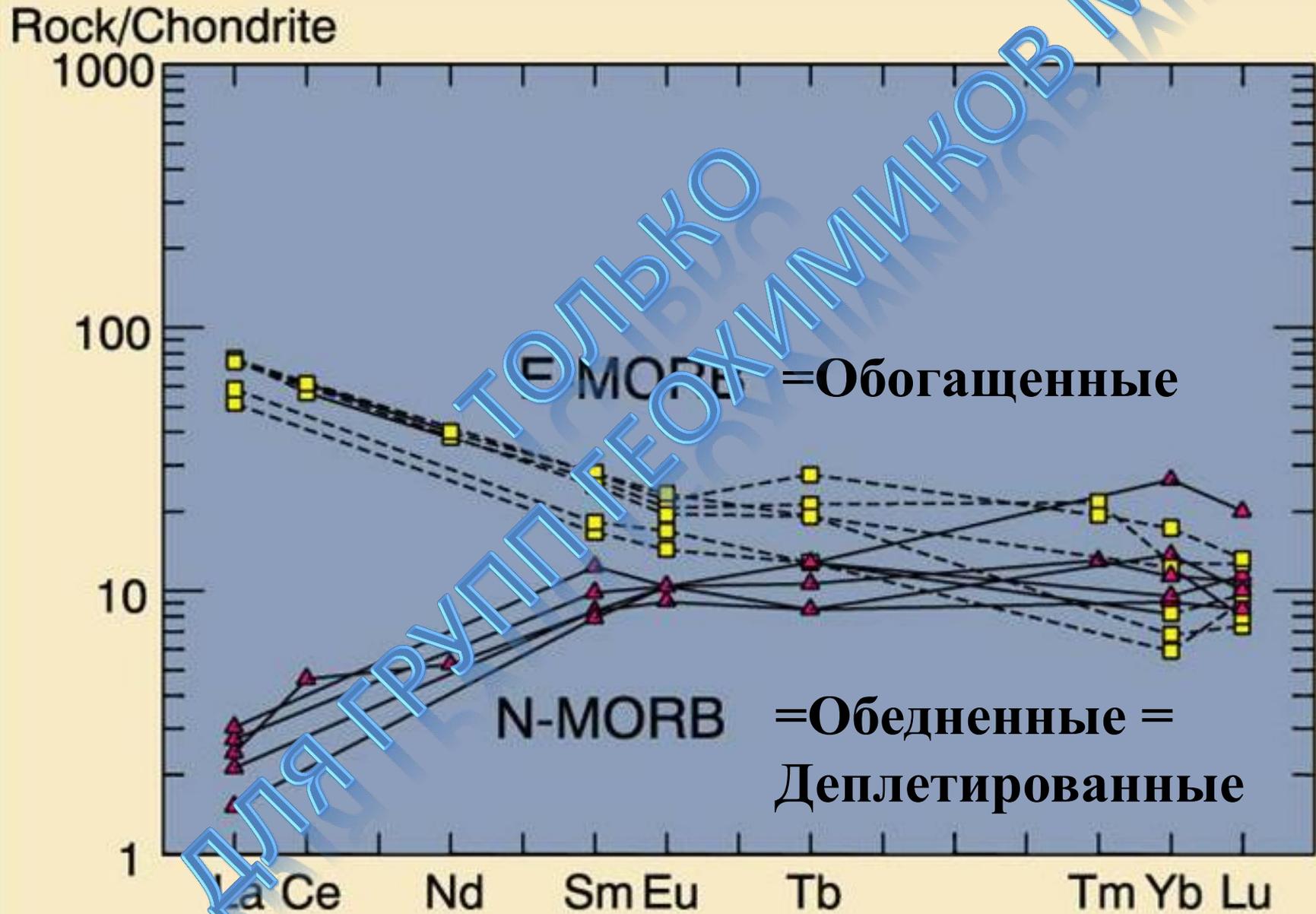


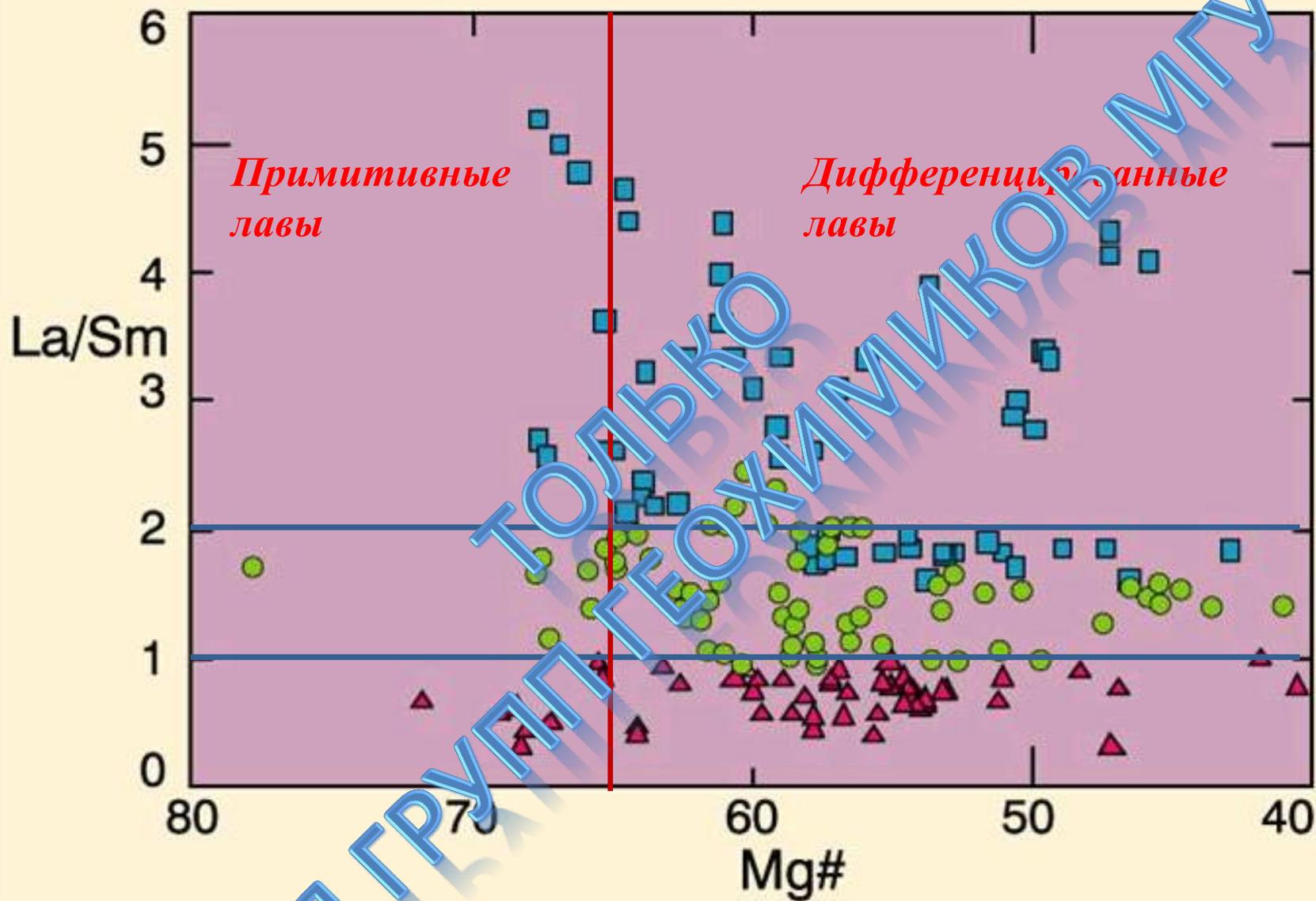
Гистограмма по K<sub>2</sub>O и TiO<sub>2</sub> для высокомагнезиальных закалочных стекол Срединно-Атлантического шельфа. Mg# всех стекол в выборке больше 65, что соответствует содержанию MgO 8-10.5 %.

Слабодифференцированные, близкие к исходным расплавы (с Mg# > 65 или MgO > 8%) отличаются слишком большим разнообразием, чтобы быть производными одного и того же мантийного субстрата.

Такие большие вариации в области высокомагнезиальных составов, а главное явную бимодальность распределения нельзя объяснить дифференциацией и, скорее всего, это вызвано отличиями в мантийном источнике при образовании исходных расплавов.

# Различия деплетированных и обогащенных базальтов



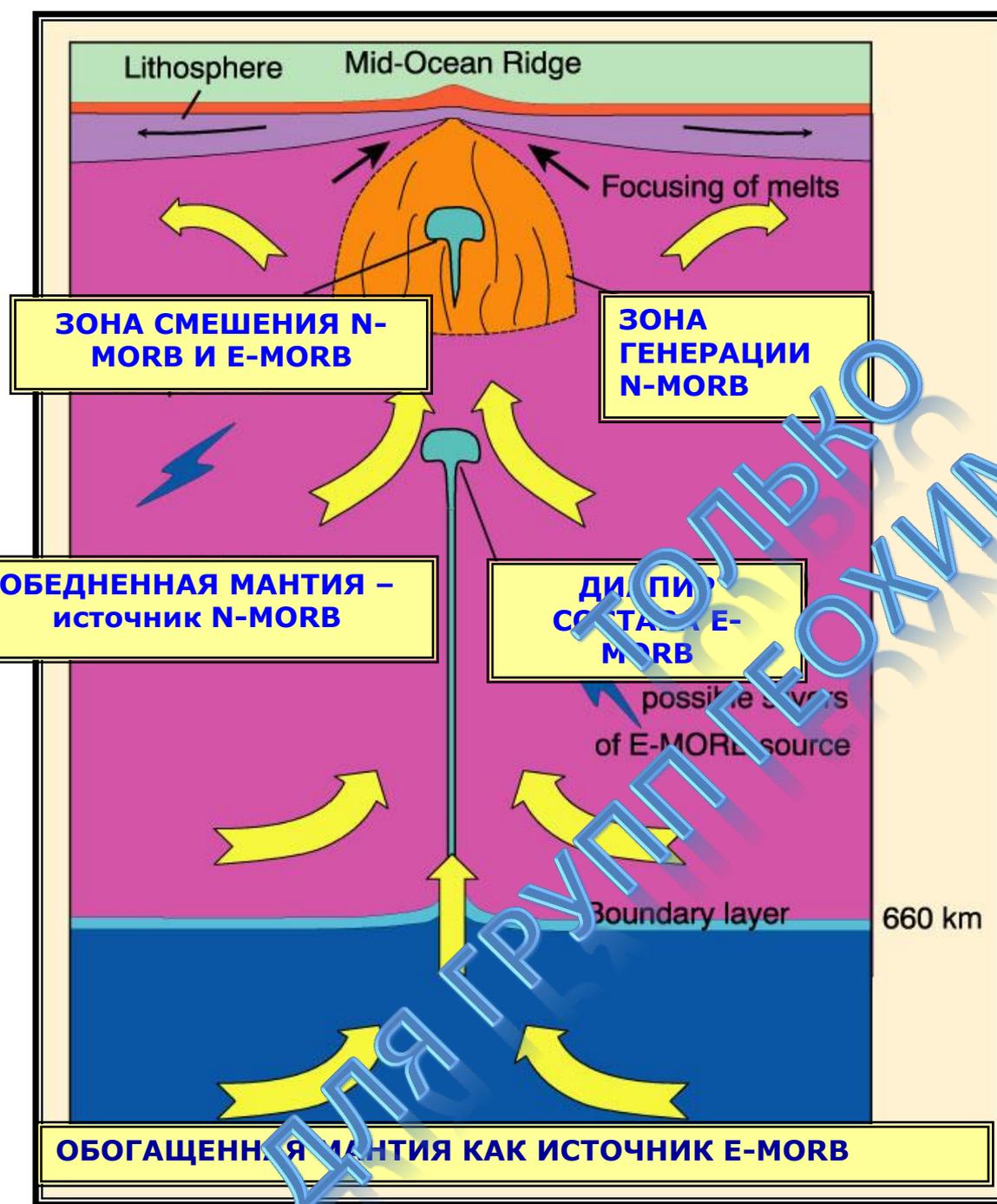


Разделение MORB по La/Sm отношению. Отношение ниже 1 характерно для N-MORB, выше 2 - для E-MORB (обогащенных), от 1 до 2 - промежуточные, transitional (T-MORB) - показаны зелеными кружочками.

**СОДЕРЖАНИЯ ГЛАВНЫХ И ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТИПОВЫХ  
БАЗАЛЬТАХ ТИПОВ N-MORB И E-MORB**

ГЛАВНЫЕ, мас. %	N-MORB	E-MORB	МИКРОЭЛЕМЕНТЫ	N-MORB	E-MORB
			ppm		
SiO <sub>2</sub>	50.4	49.2	Co	0.56	5.04
TiO <sub>2</sub>	1.36	2.57	Ba	6.3	57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.2	13.8	Th	0.12	0.6
FeO	9.31	11.4	Nb	2.33	8.3
MnO	0.18	0.17	La	2.5	6.3
MgO	8.96	10.0	Ce	7.5	15
CaO	11.4	10.8	Sr	90	155
Na <sub>2</sub> O	2.3	2.12	Y	28	22
K <sub>2</sub> O	0.09	0.51	Yb	3.05	3.37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.25	Lu	0.46	0.35

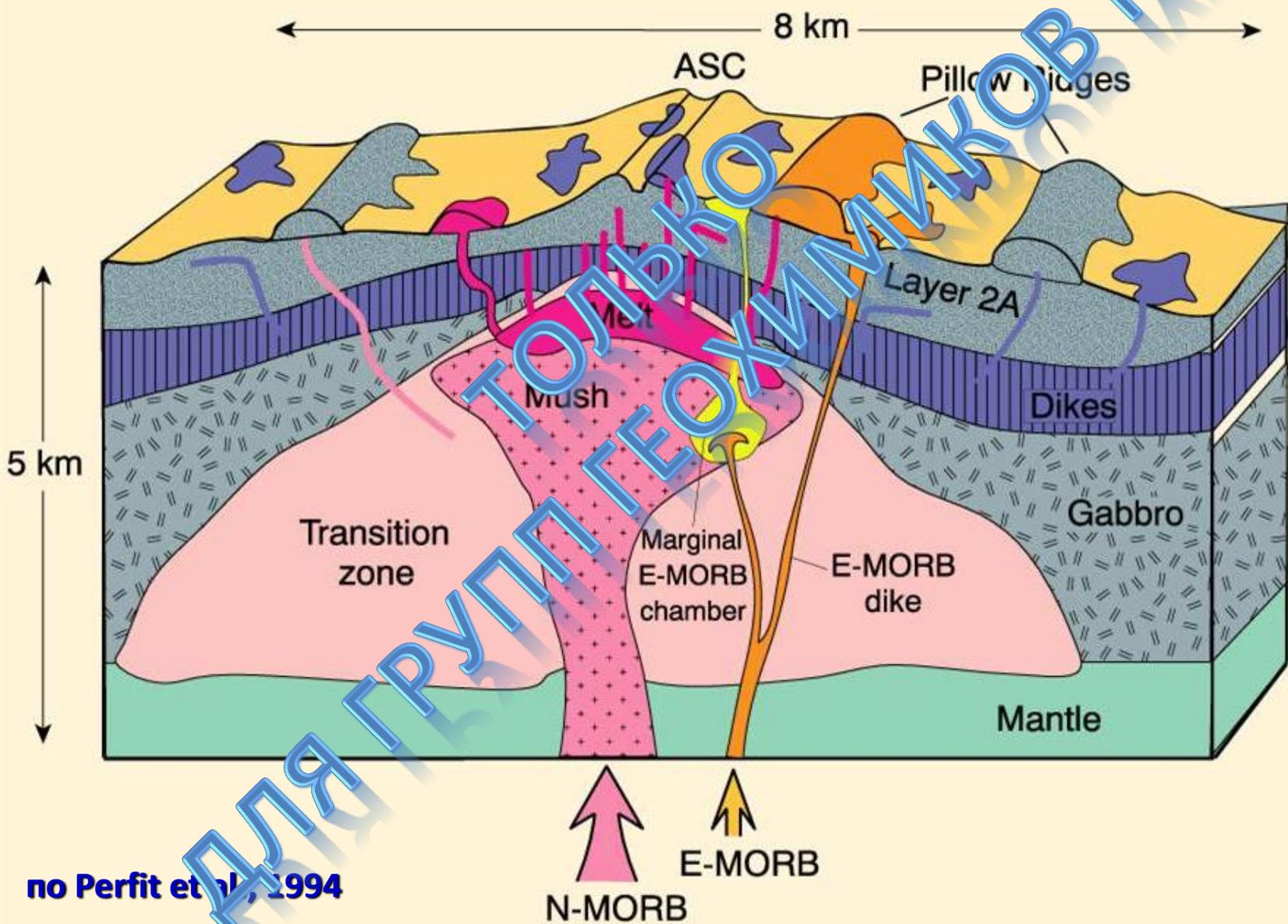
ТОЛЬКО  
 ДЛЯ ГРУППЫ ГЕОХИМИКОВ В МГУ



Общая схема мантийных источников генерирующих N-MORB и E-MORB

для группы геологов

# Схема магматического очага под быстрыми спрединговыми зонами



no Perfit et al., 1994

# Подводное выветривание

Na, Li, K, Rb, Cs, B, U  
↓  
Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, BO<sub>3</sub><sup>3-</sup>

↑  
Mg, Fe, Mn, Cs

Гальмиролиз (от греч. Halmyros — солёный и lysis — распад), подводное выветривание, химико-минералогическое преобразование вулканических пород или первичного осадка на дне моря под влиянием процессов растворения, окисления и др. Гальмиролизом объясняют происхождение некоторых минералов, возникающих только в морских осадках (глауконит, шамозит и др.), подводное изменение вулканических туфов, ведущее к образованию смектитов.

рис. Л.В.Дмитриева

# Вторичные минералы в БСОХ

## Палагонит (Большая советская энциклопедия)

Палагонит, стекловатое минеральное вещество жёлто-бурого, буровато-зелёного или темно-бурого цвета, богатое водой, иногда частично раскристаллизованное; встречается в базальтах, диабазах и их туфах.



## Смектиты (группа монтмориллонита)

смектитсодержащие глины существенно изменяют объем при увлажнении и высыхании

Бентониты - глины, содержащие большое количество смектитов

Бейделит - глиноземистый минерал

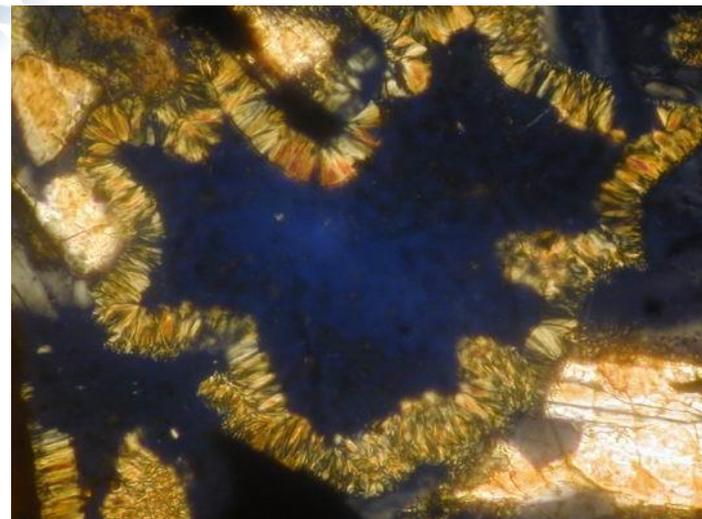
Нонтронит - минерал, обогащенный  $Fe^{3+}$

Сапонит - обогащен  $Mg^{2+}$  и часть Si замещается Al

Гекторит - литиевый смектит

**Хлориты**

**Цеолиты**



Палагонит в окружении селадонита

# Вторичные минералы в БСОХ

## • Гидрослюды

Гидромусковит,  $K_{<1}Al_2(Si,Al)_4O_{10} [OH]_2 \cdot nH_2O$

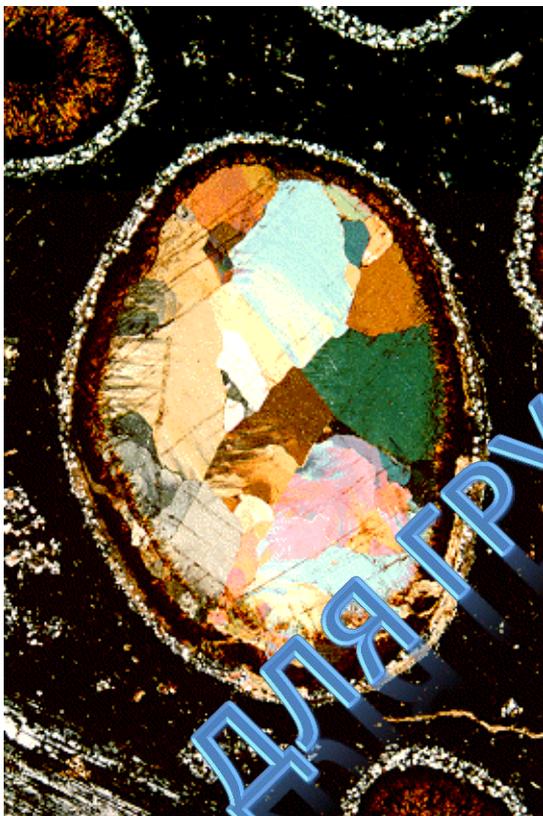
Вермикулит,  $(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+})[(Si, Al)_4O_{10}] [OH]_2 \cdot H_2O$

Глауконит,  $K_{<1}(Fe^{3+}, Fe^{2+}, Al, Mg)_{2-3}[Si_3(Si, Al)O_{10}] [OH]_2 \cdot nH_2O$

Селадонит,  $(K, Ca, Na)_{<1}(Al, Fe^{3+}, Fe^{2+}, Mg)_2 [(OH)_2 Al_{0.11} Si_{2.89} O_{10}]$

## • Гидроокислы

- Гетит –  $Fe(OH)_3$



## Карбонаты

Кальцит  $CaCO_3$

Доломит  $CaMg[CO_3]_2$

Сидерит  $FeCO_3$

Анкерит  $CaFe[CO_3]_2$

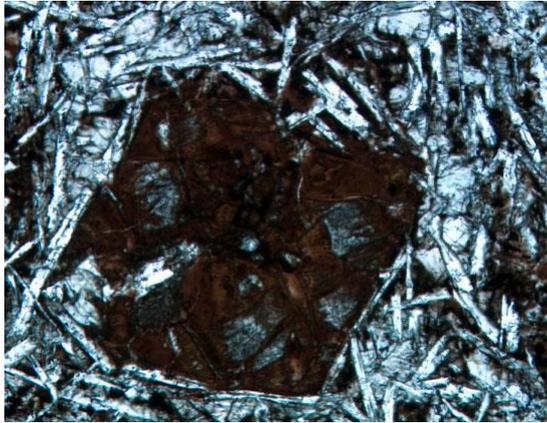
## Группа кремнезема

халцедон

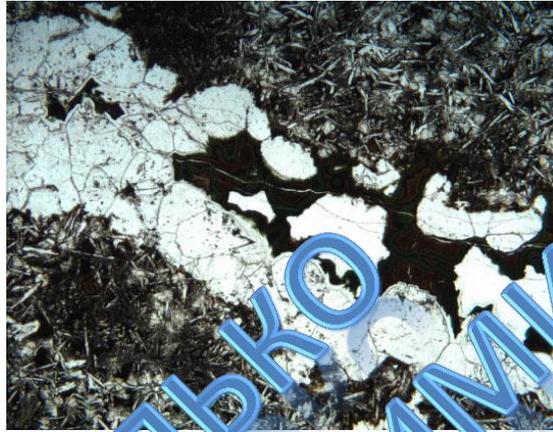
кварц

Заполнение вторичными минералами миндалины в базальтах. Концентрические круги халцедона, гетита, селадонита и карбонатных минералов.

# Фотографии шлифов с вторичными минералами



Псевдоморфозы кальцита и сапонита по оливину



1-2 мм прожилок кальцита с постепенным заполнением гетитом и халцедоном



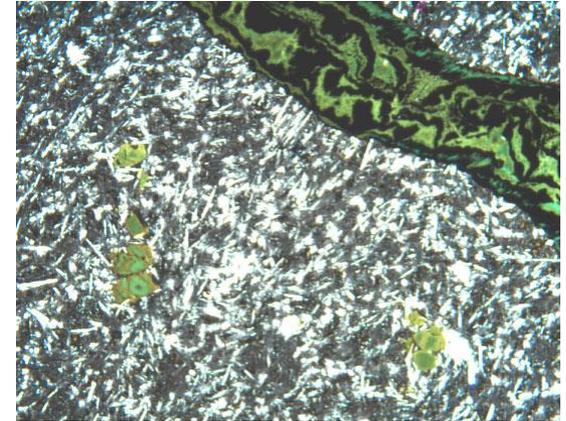
1 -2 мм прожилок кальцита с постепенным заполнением гетитом, селадонитом и халцедоном



Псевдоморфозы по оливину



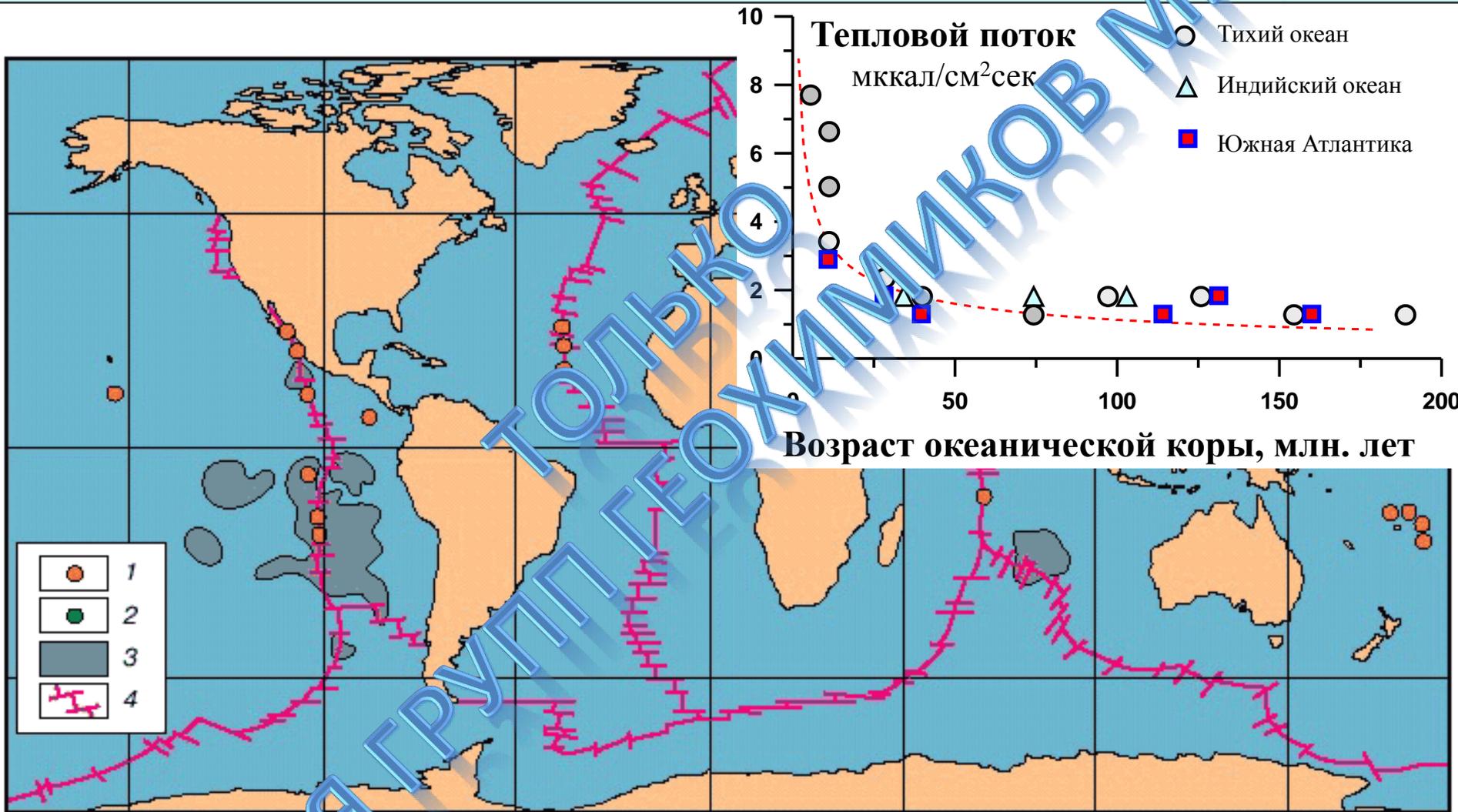
Селадонит-кальцитовый прожилок с коричневым обрамлением (сметкит и гидроокислы железа),



Хорошо оформленные псевдоморфозы нонтронита по оливину в серых пиллоу-базальтах. Размер поля зрения 5.5 мм.

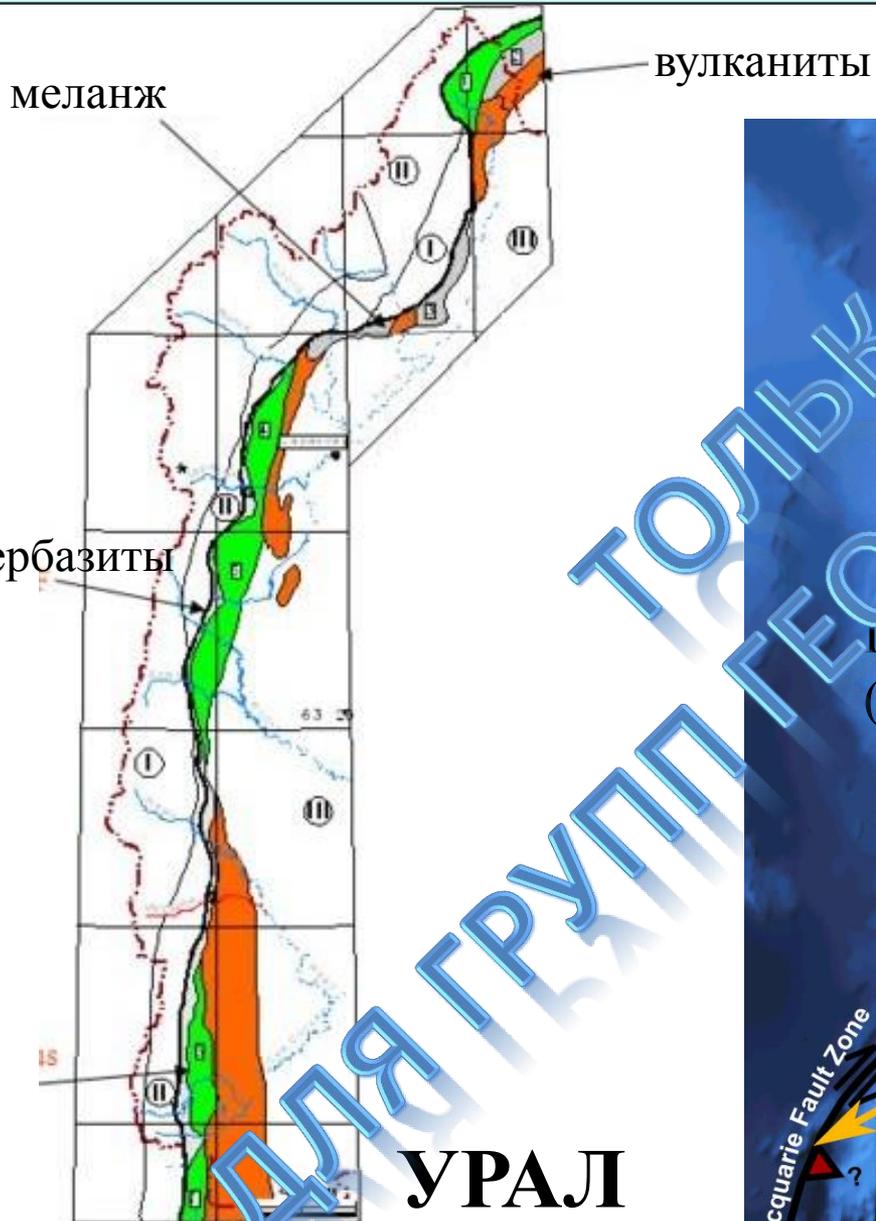
ДЛЯ ГРУППЫ ГЕОХИМИКОВ МГУ

# Гальмиролиз, гидротермы и остывание плиты

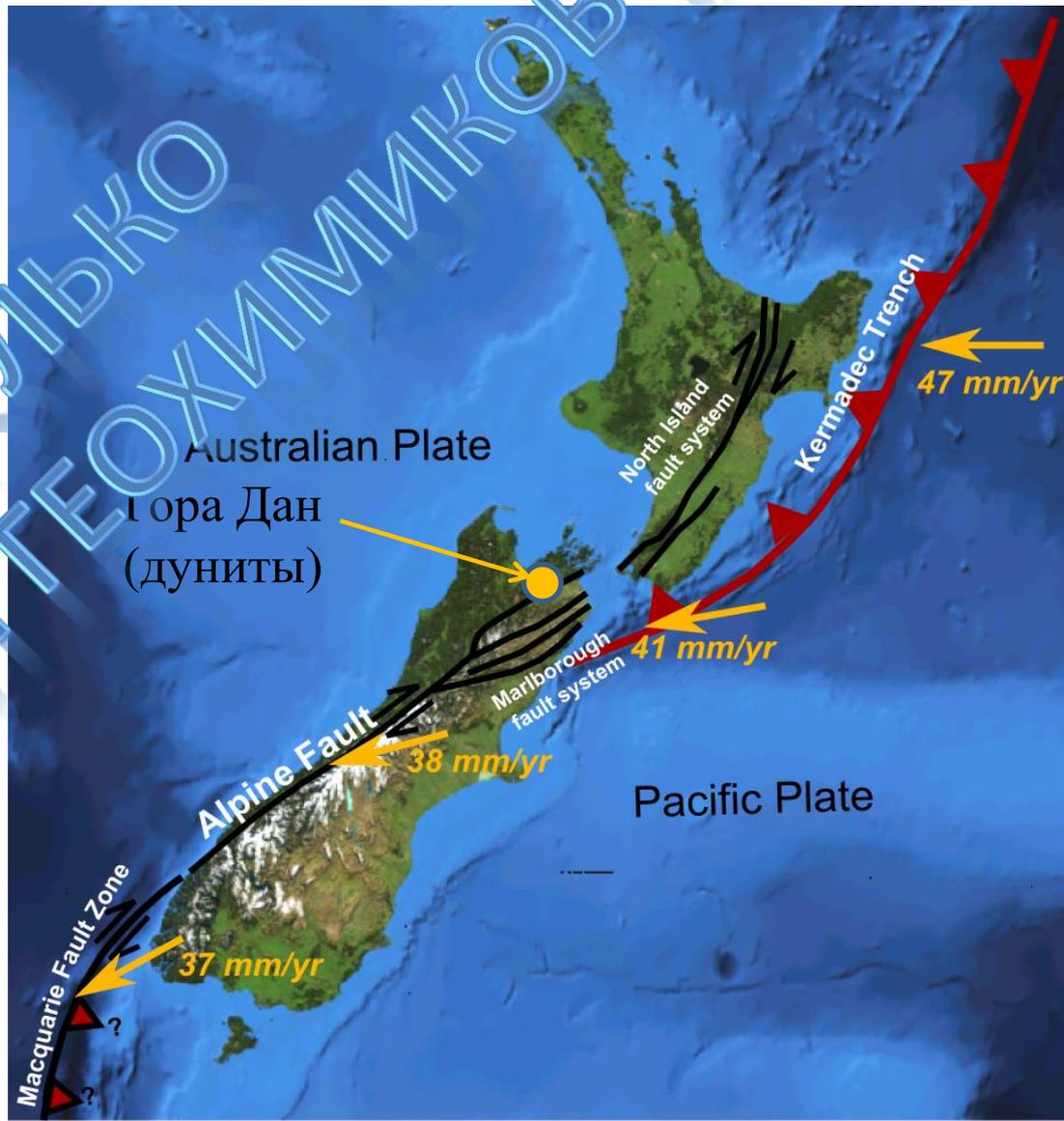


Распространение современных гидротермальных построек и металлоносных осадков в океанах: 1 - гидротермальные постройки и сульфидные руды; 2 - илы с сульфидами (страйформные залежи); 3 - металлоносные осадки; 4 - рифтовые зоны.

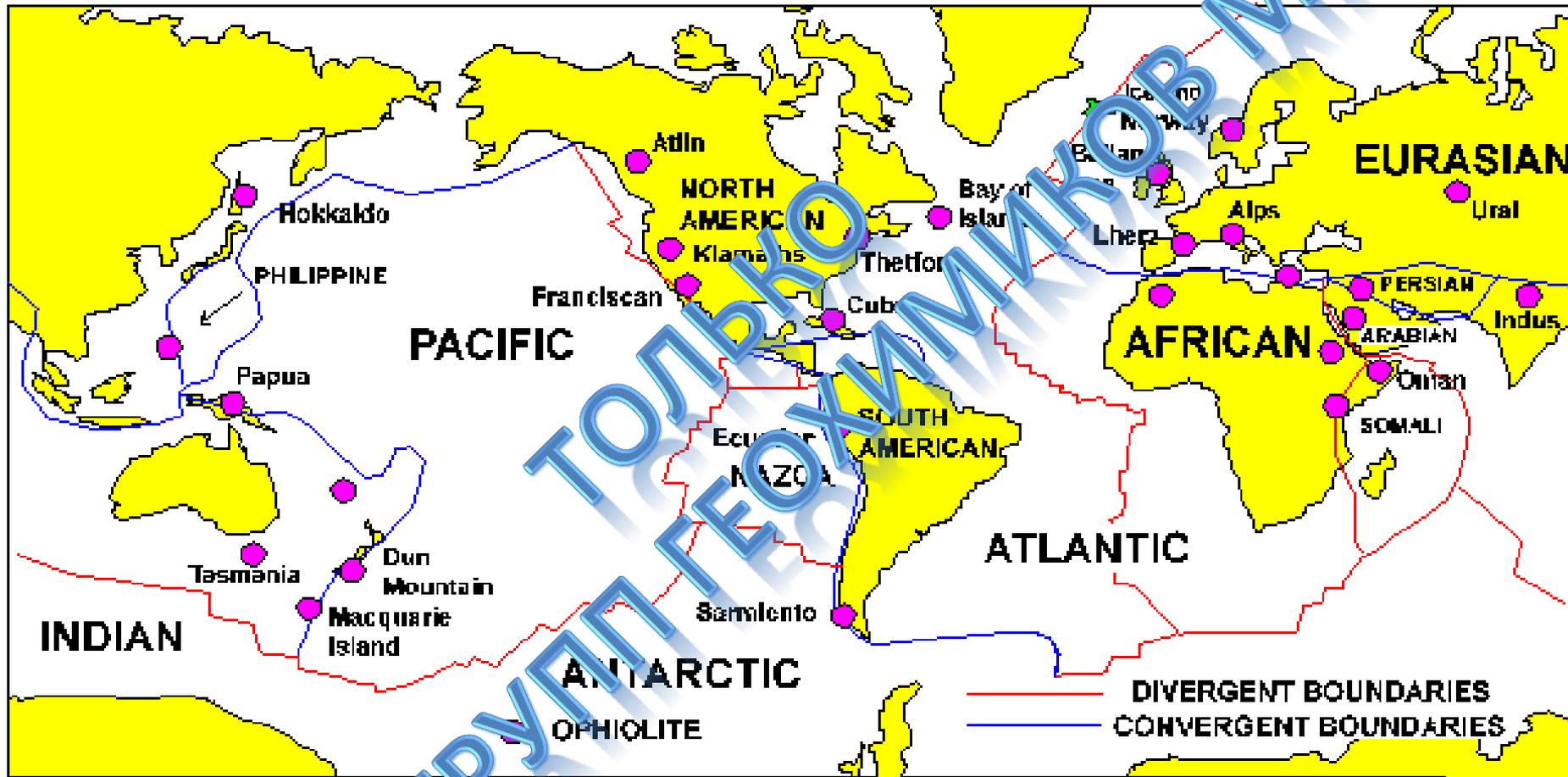
# Фрагменты океанической коры на суше



## Новая Зеландия

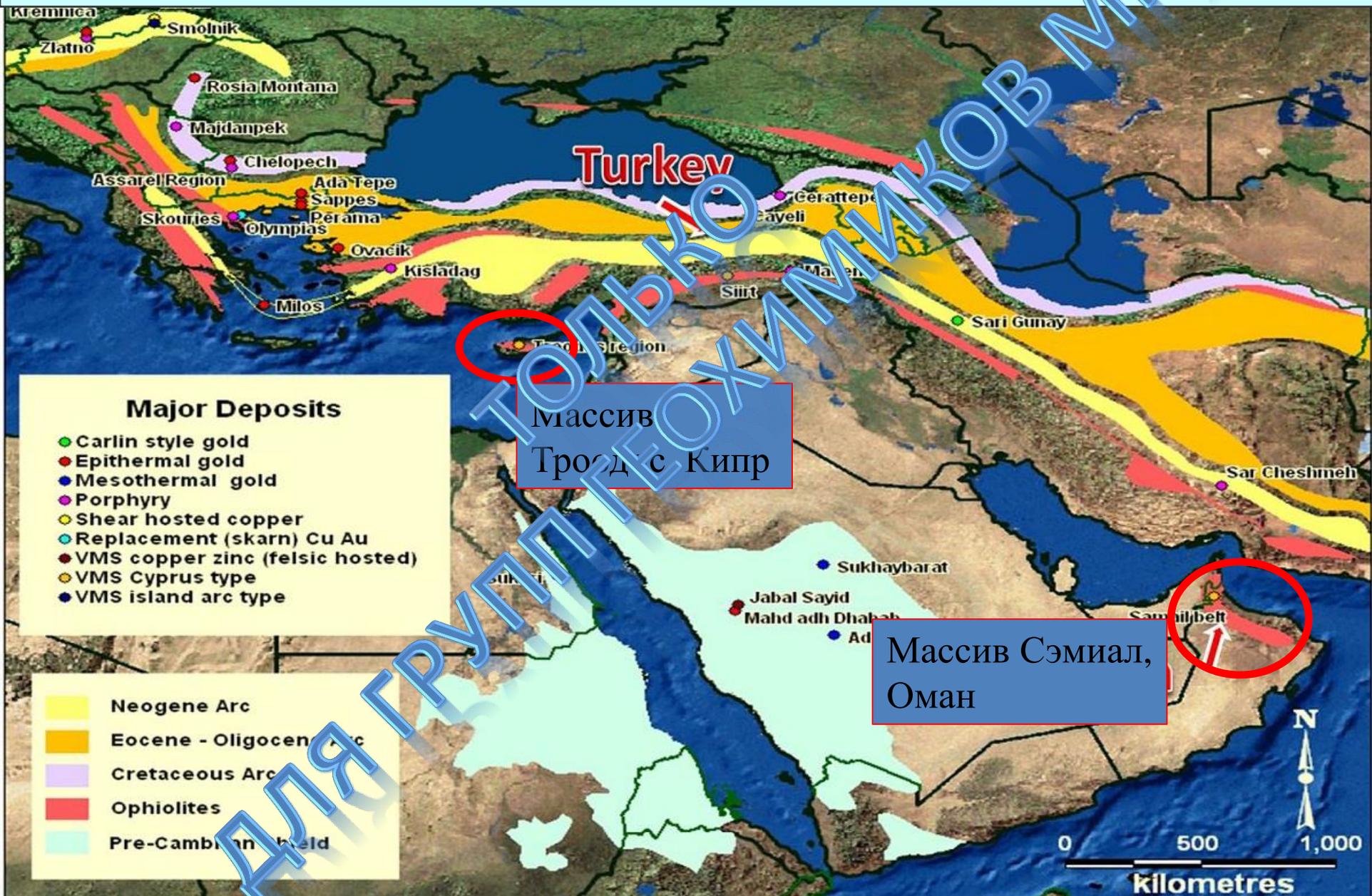


# Главные офиолитовые пояса



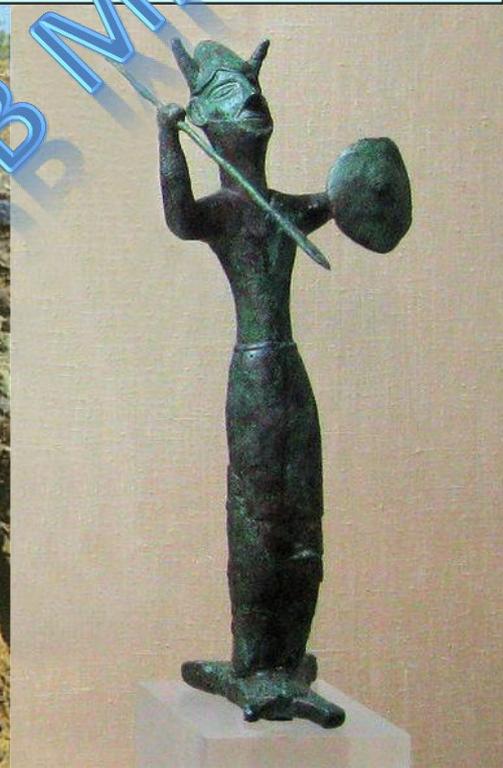
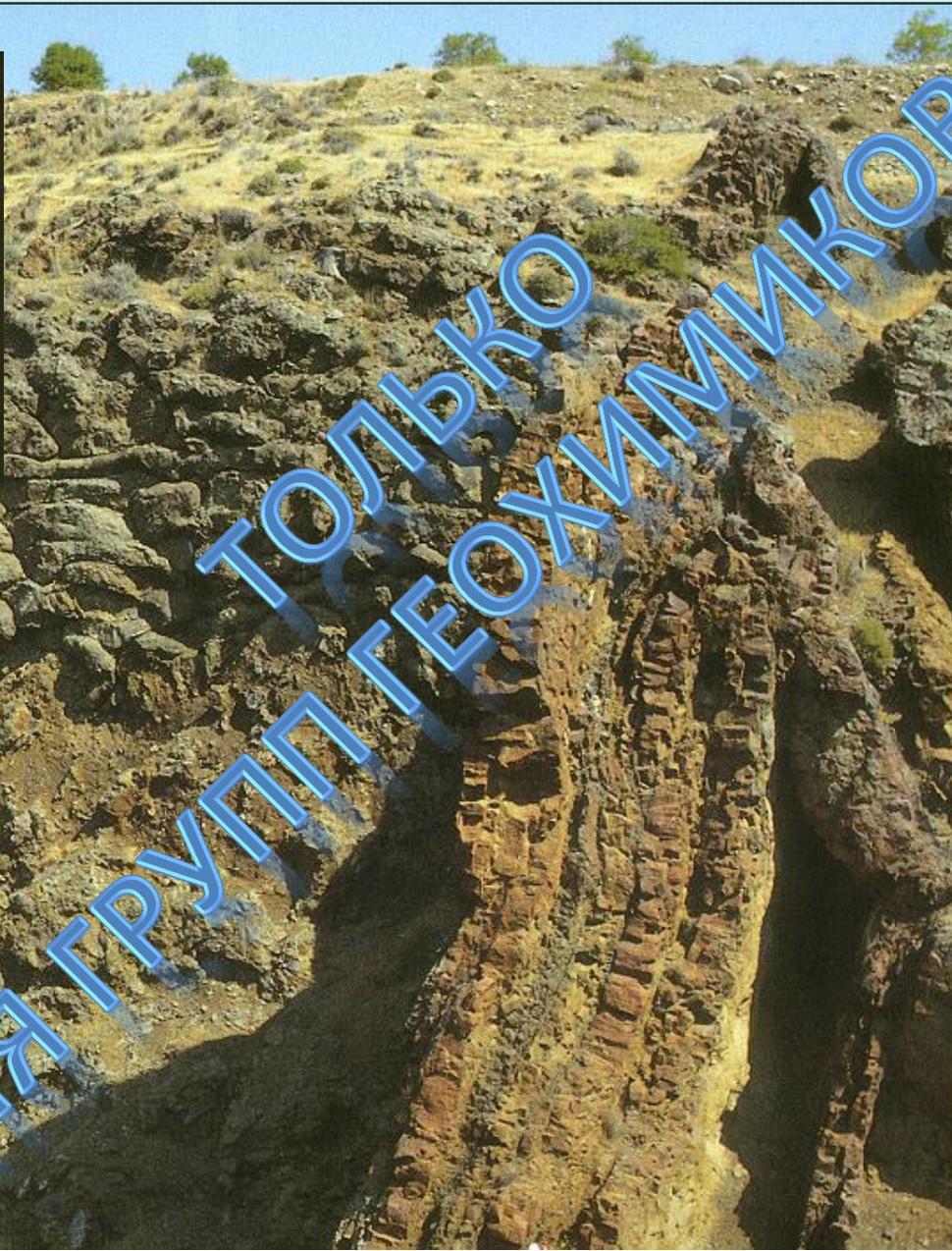
Подавляющее количество океанической коры остается в океанах или уходит в мантию в зонах субдукции. Ее фрагменты могут оказываться в складчатых поясах континентов в коллизионных швах (сутурах) или при тектоническом взбросе на континент (обдукции)

# Альпийские офиолитовые пояса



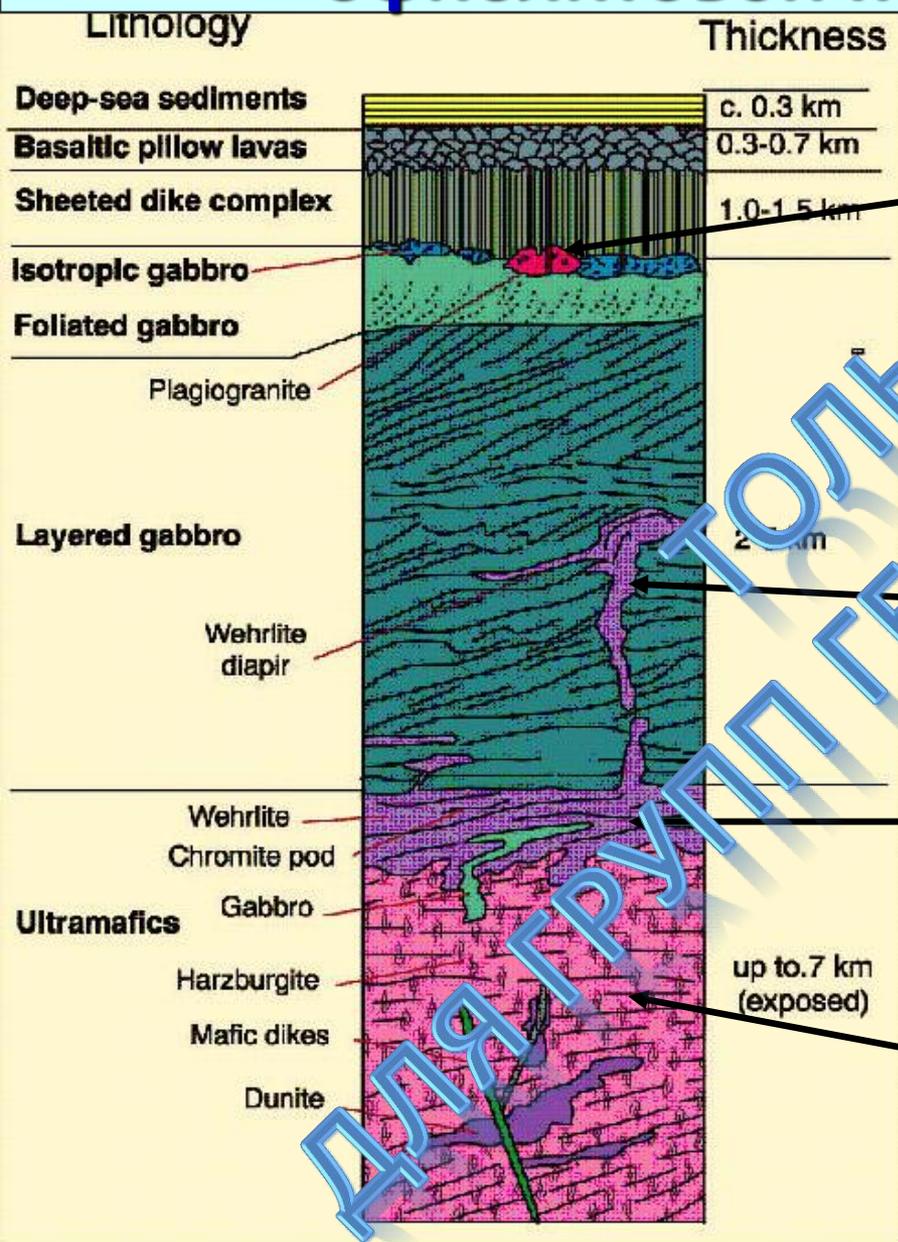
# Офиолитовые комплексы Кипра

Aus Schmincke (1986), Vulkanismus



Начало бронзового века  
4400 л.н. может быть  
связано с  
месторождениями  
меди в офиолитовых  
комплексах Кипра  
Кипр (Cyprus) =>  
соррег (медь)

# Строение слоев и мощности классической офиолитовой последовательности



Характерные «осложняющие элементы»:

Бескорневые диориты и тоналиты (на рисунке plagiogranite)

массовые слоистые кумулятивные верлиты и габбро. Верлиты часто проникают в слоистые габбро.

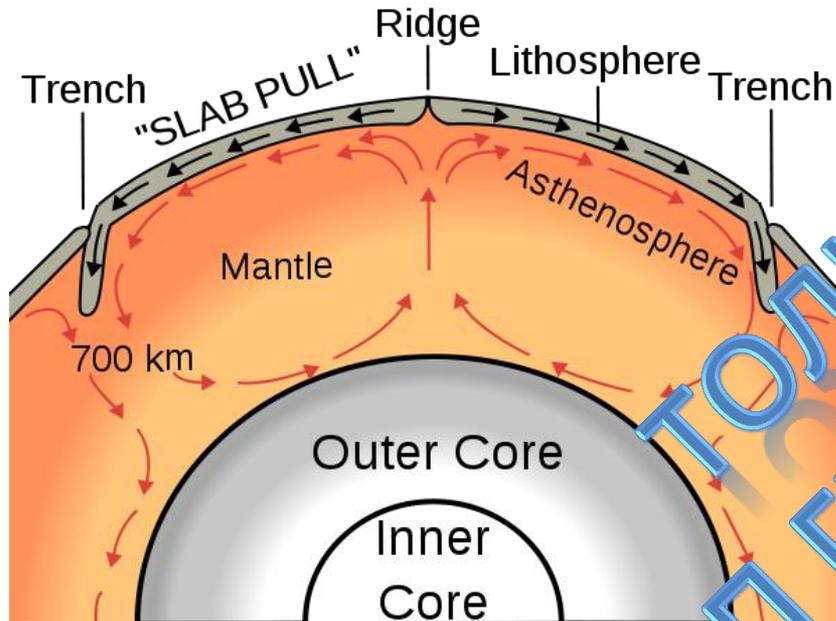
слоистые перидотиты с кумулятивными структурами

тектонизированные дуниты и гарцбургиты (нерасплавленный остаток исходной магмы)

ДЛЯ ГРУППЫ ГЕОХИМИКОВ ВМГУ ТОЛЬКО

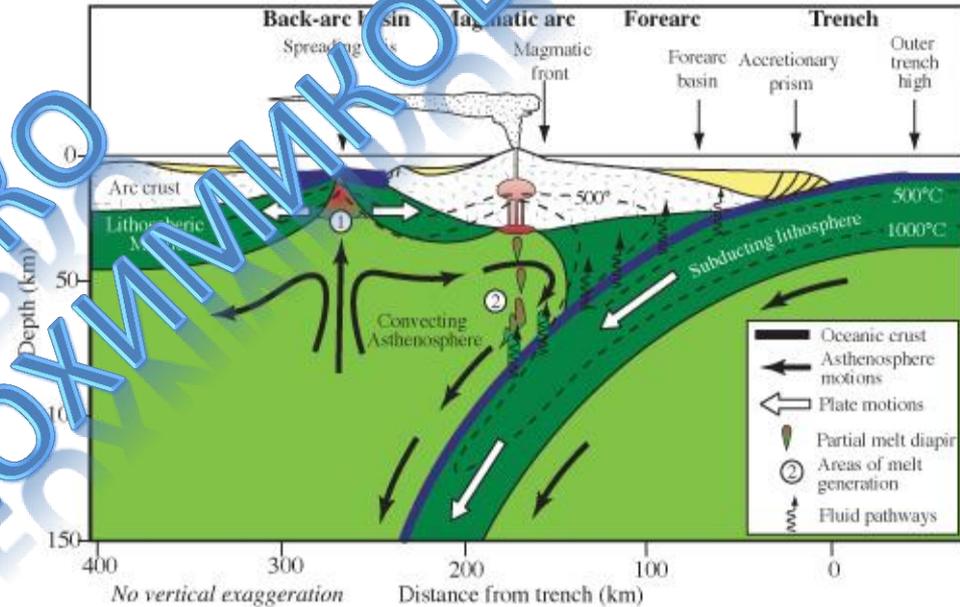
# Офиолиты СОХ и офиолиты задуговых бассейнов

## Срединно-океанические хребты



Под срединно-океаническими и хребтами «сухая» мантия. Степень окисления на уровне кислородного буфера QFM

## Задуговые бассейны



Под задуговыми бассейнами мантия надсубдукционная, испытавшая пропитку субдукционным флюидом. Степень окисления на уровне кислородного буфера NNO (QFM+1)

ТОЛЬКО ДЛЯ ГРУППЫ ГЕОХИМИКОВ ВМГУ