

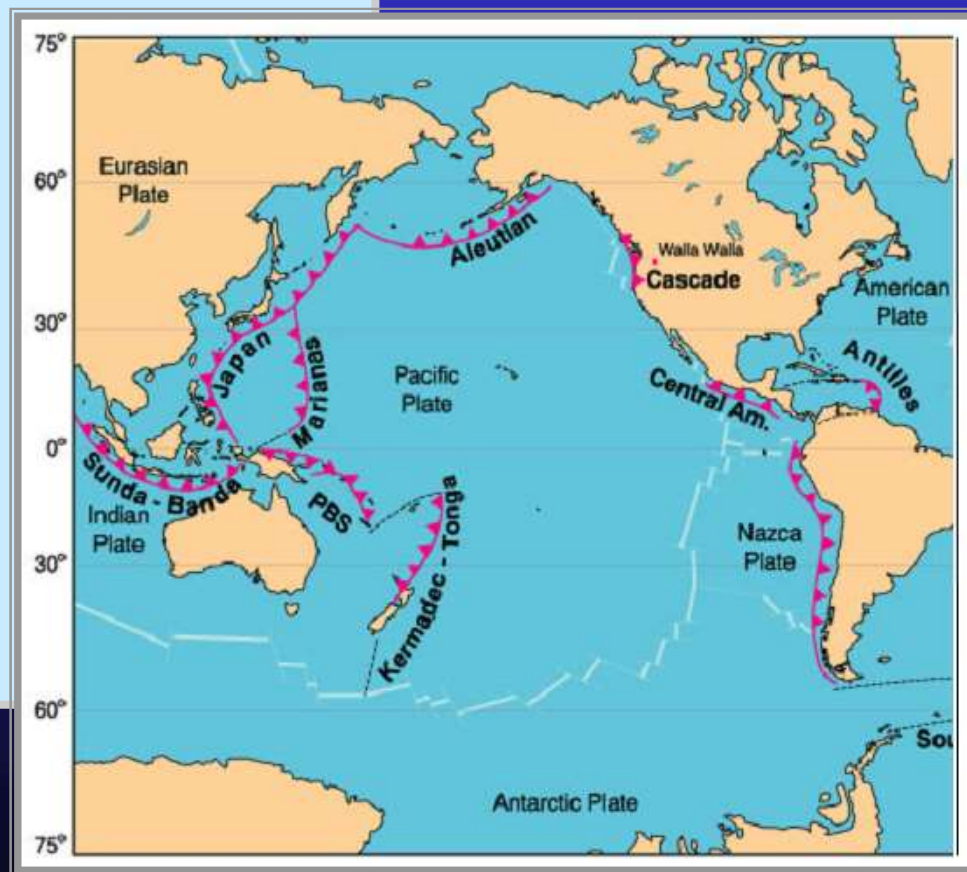
Общая тема:

АКТИВНЫЕ ОКРАИНЫ КОНТИНЕНТОВ

Лекция № 29

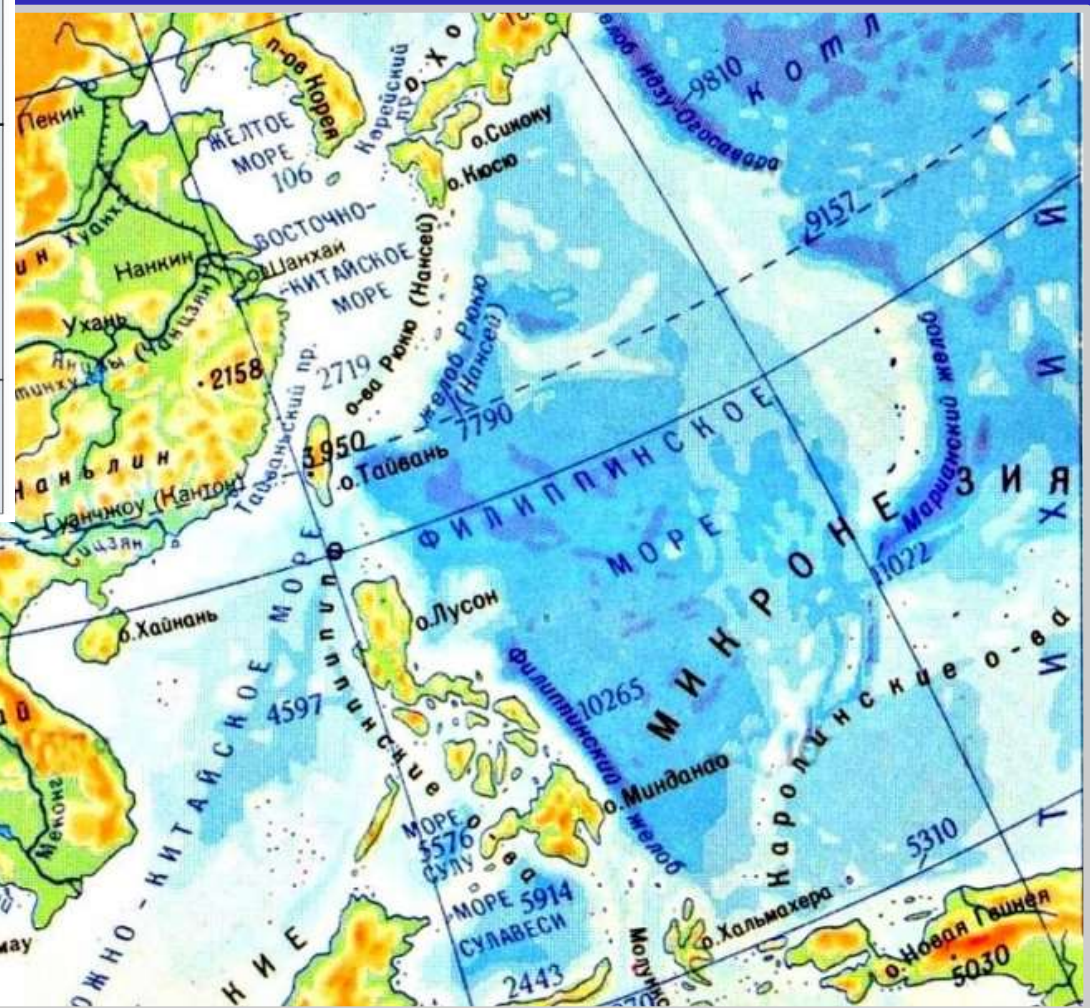
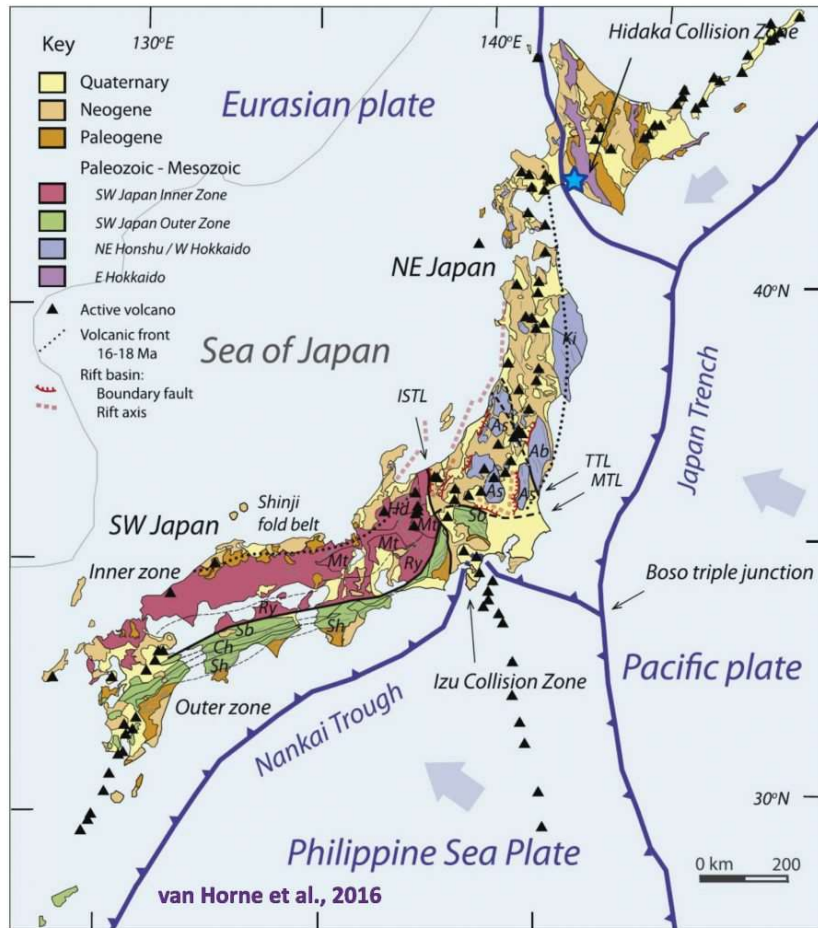
Формации глубоководных желобов и происхождение бонинитов

Островные дуги, континентальные окраины и глубоководные желоба Тихого океана



Желоба северо-запада
Тихоокеанского кольца

Вспомним географию и
обратим взор к океаническим
областям южнее Японских
островов



Филиппинское
море в ожерелье
глубоководных
желобов !

Восточное побережье Тайваня



Острова Рюкю



Остров Окинава



Остров Гуам (Марианские о-ва)



**Имеет статус
неинкорпорированной
организованной
территории США** (то есть
невходящий в состав США, но
являющийся их владением)

**Самый южный в
архипелаге
Марианских
островов**

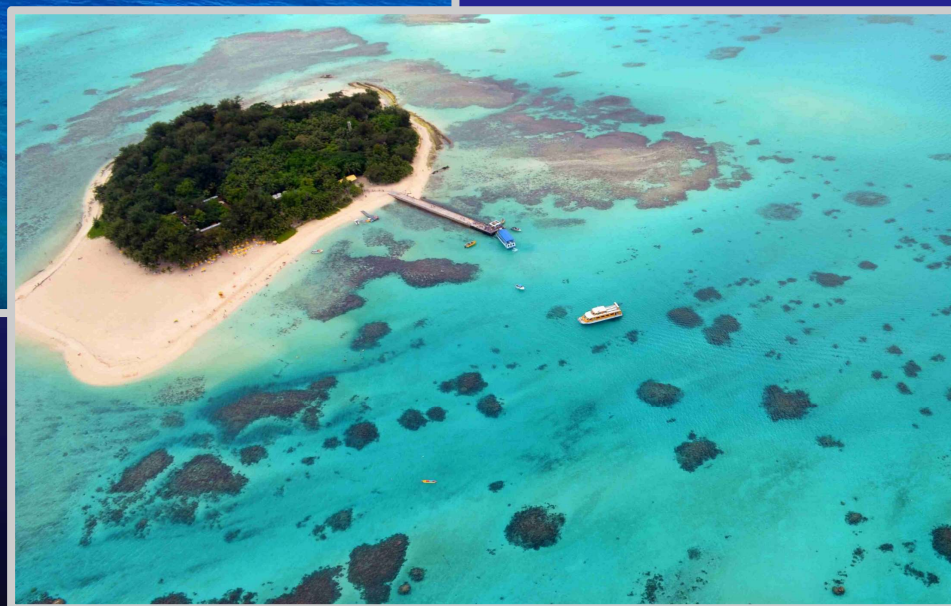


Северные Марианские о-ва (также владение США)

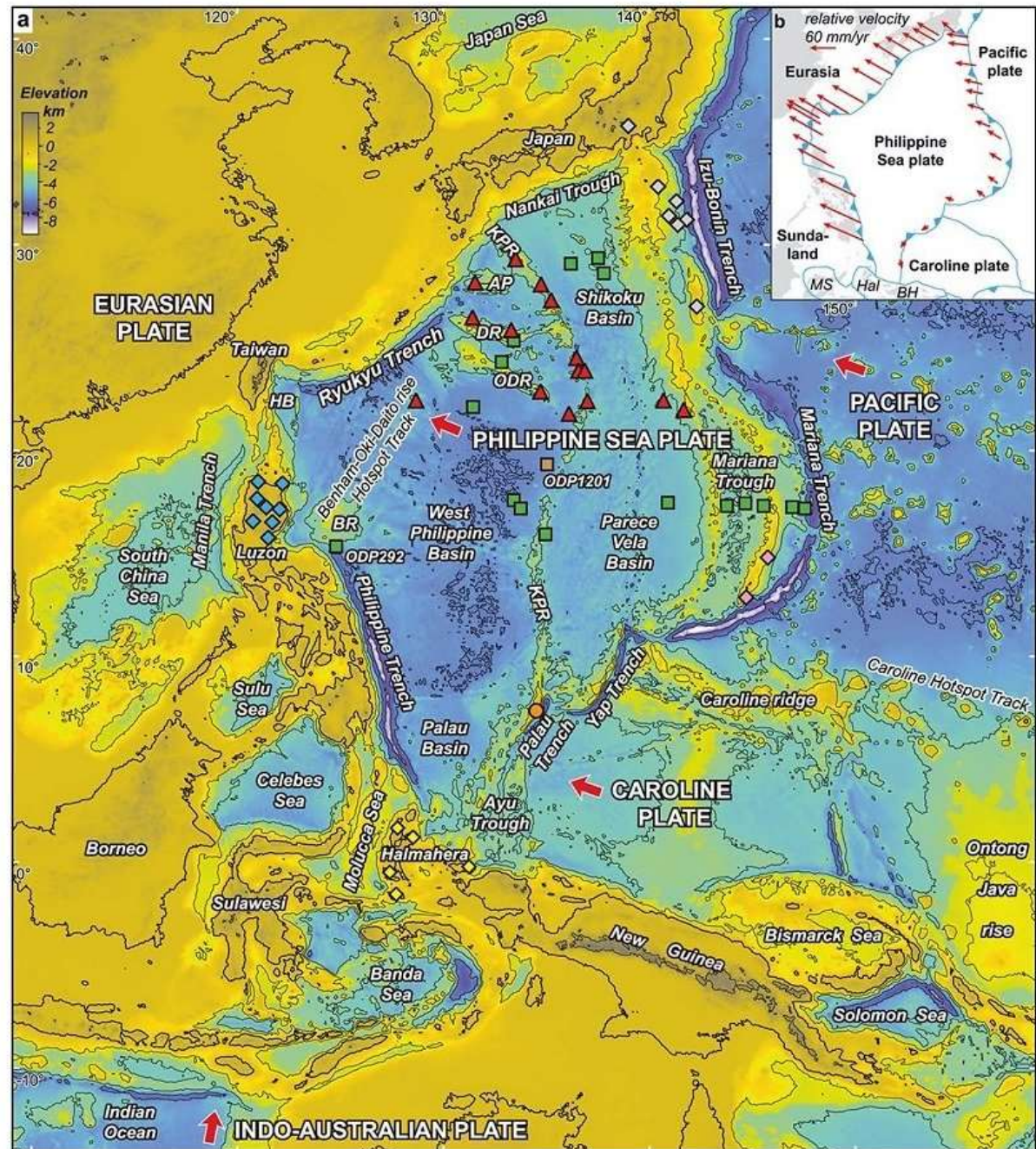


О. Сайпан

О. Паган

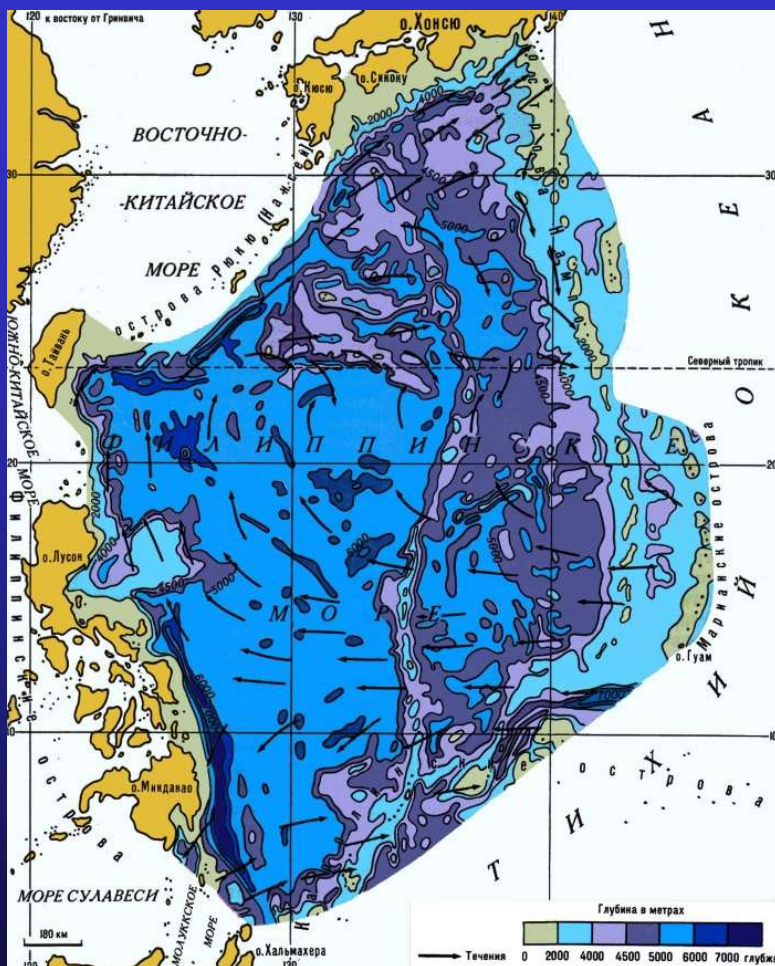


По-простому –
Филиппинская
плита, но как же
сложно устроена!

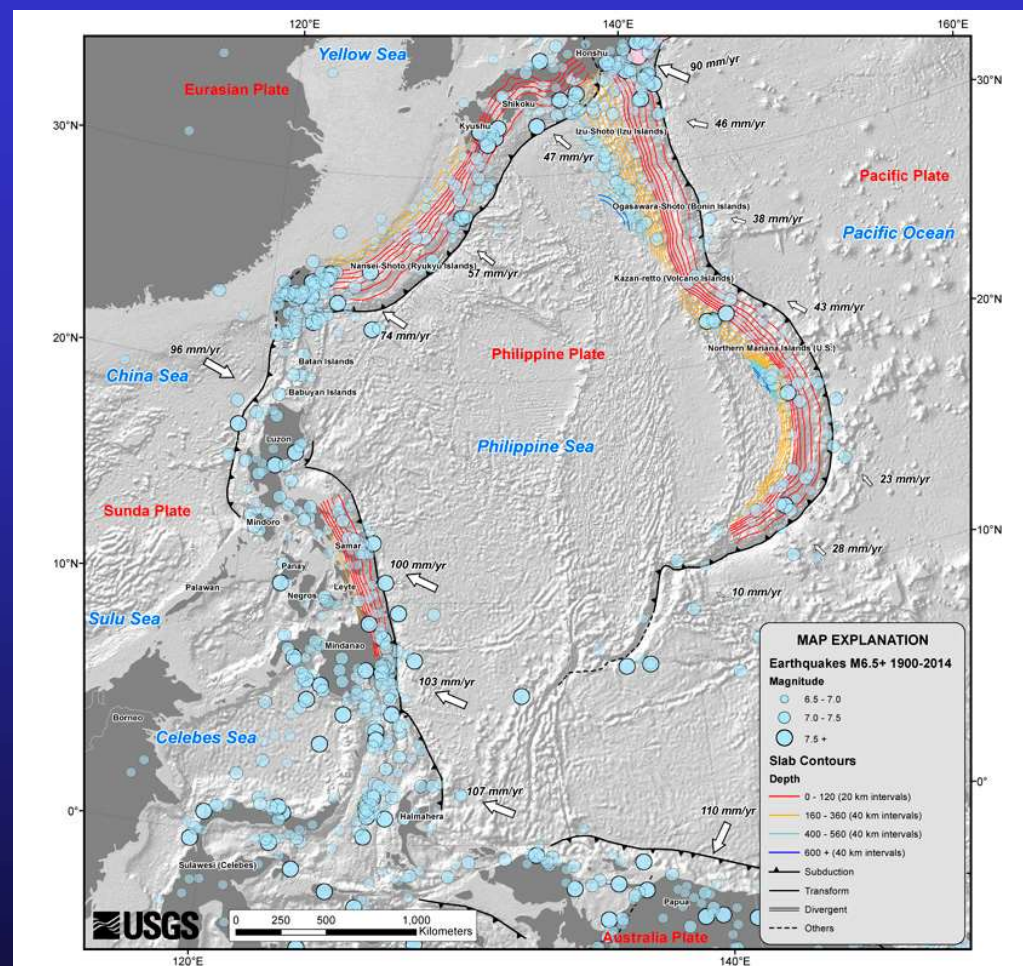


Note: KPR – Kyushu Palau Ridge

Филиппинское море – батиметрия и сейсмика

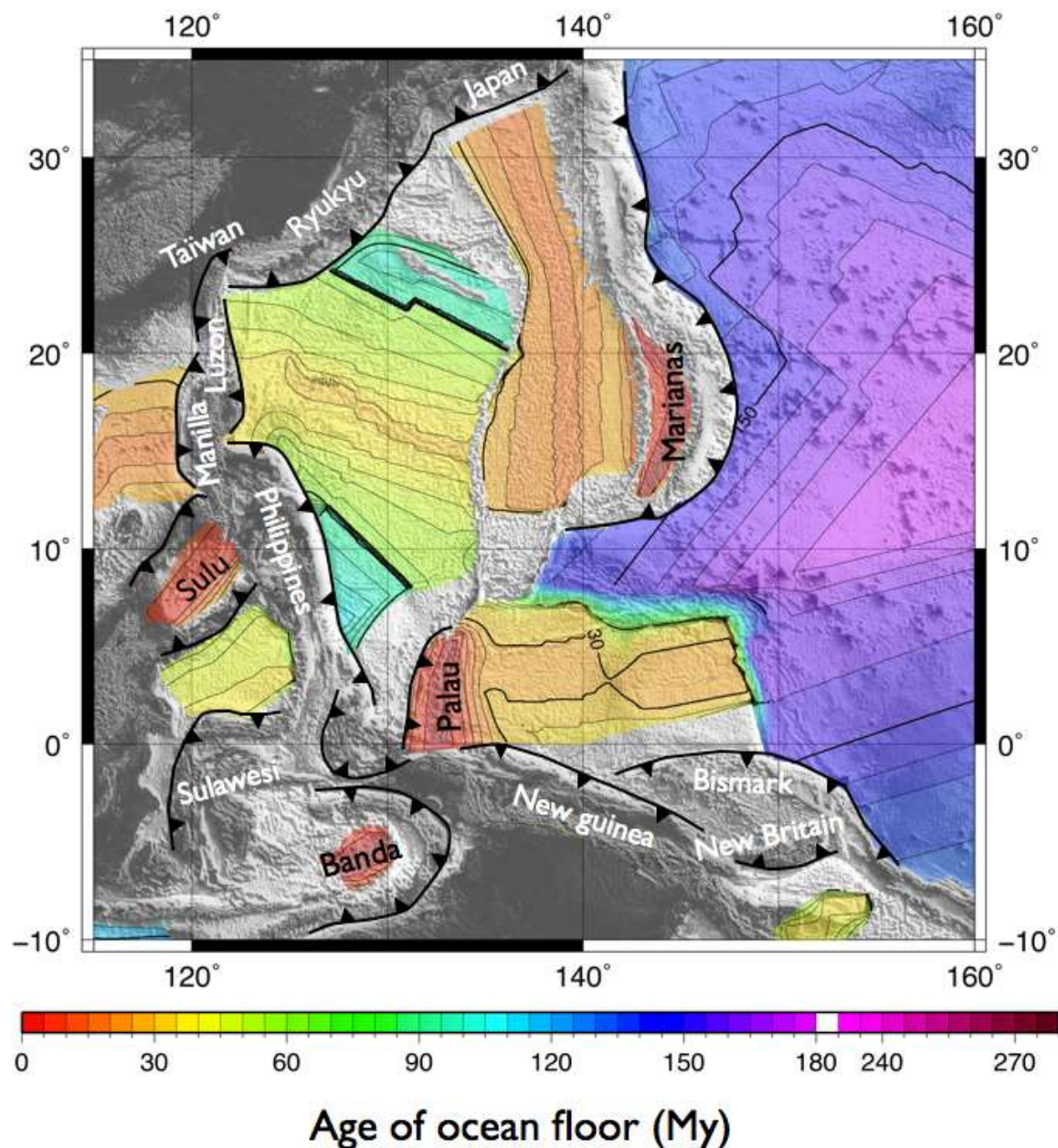


Распределение глубин:
самое глубокое в мире –
в среднем 4108 м, самый
глубокий желоб - 10994 ± 40 м



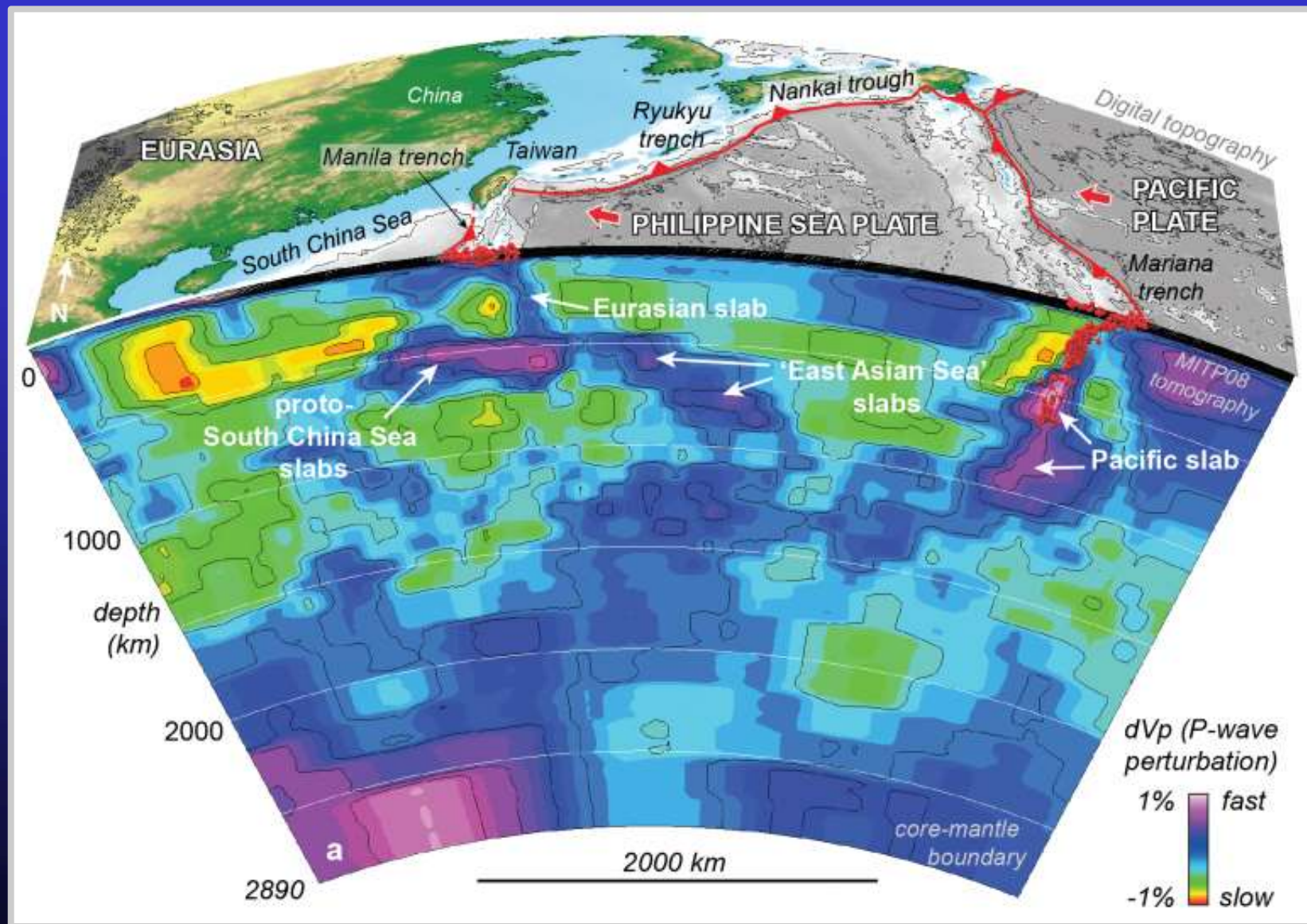
Мощность землетрясений

Multiple extrusions of mantle at the origin of the Philippine seafloor



Возраст пород
океанического дна

Схема строения мантии под Филиппинской плитой



Геологическое строение и особенности магматизма глубоководных желобов

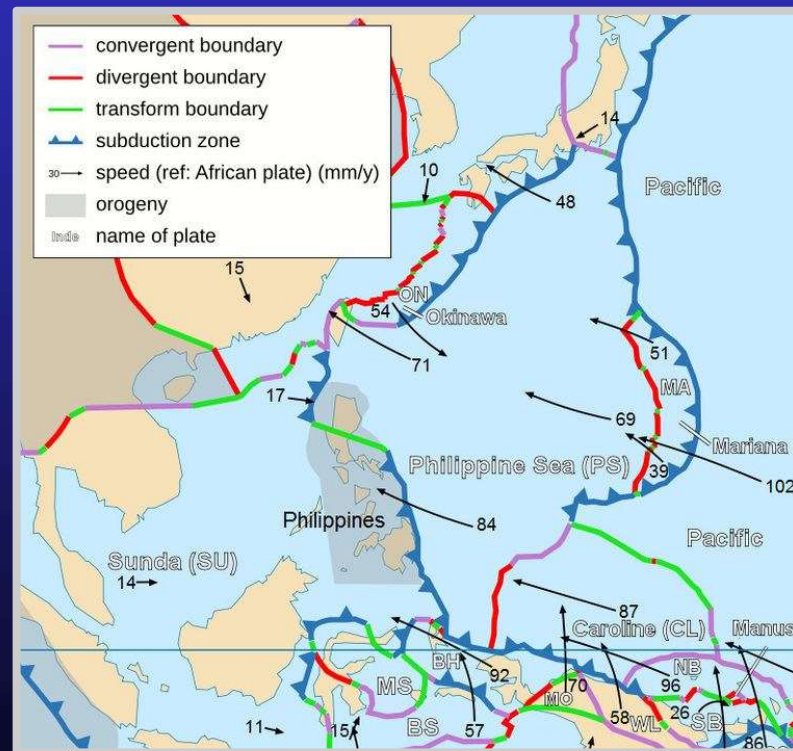


Схема строения глубоководных желобов



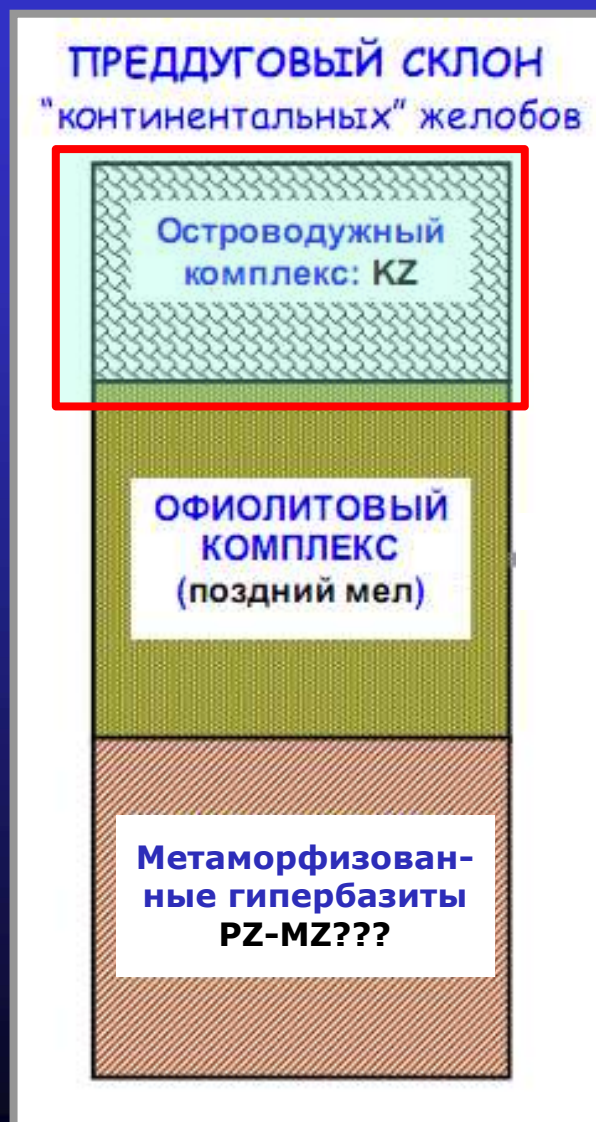
“Континентальные” желоба
(связаны с энсиалическими дугами)

*Японский, Курило-Камчатский,
Перуанско-Чилийский*

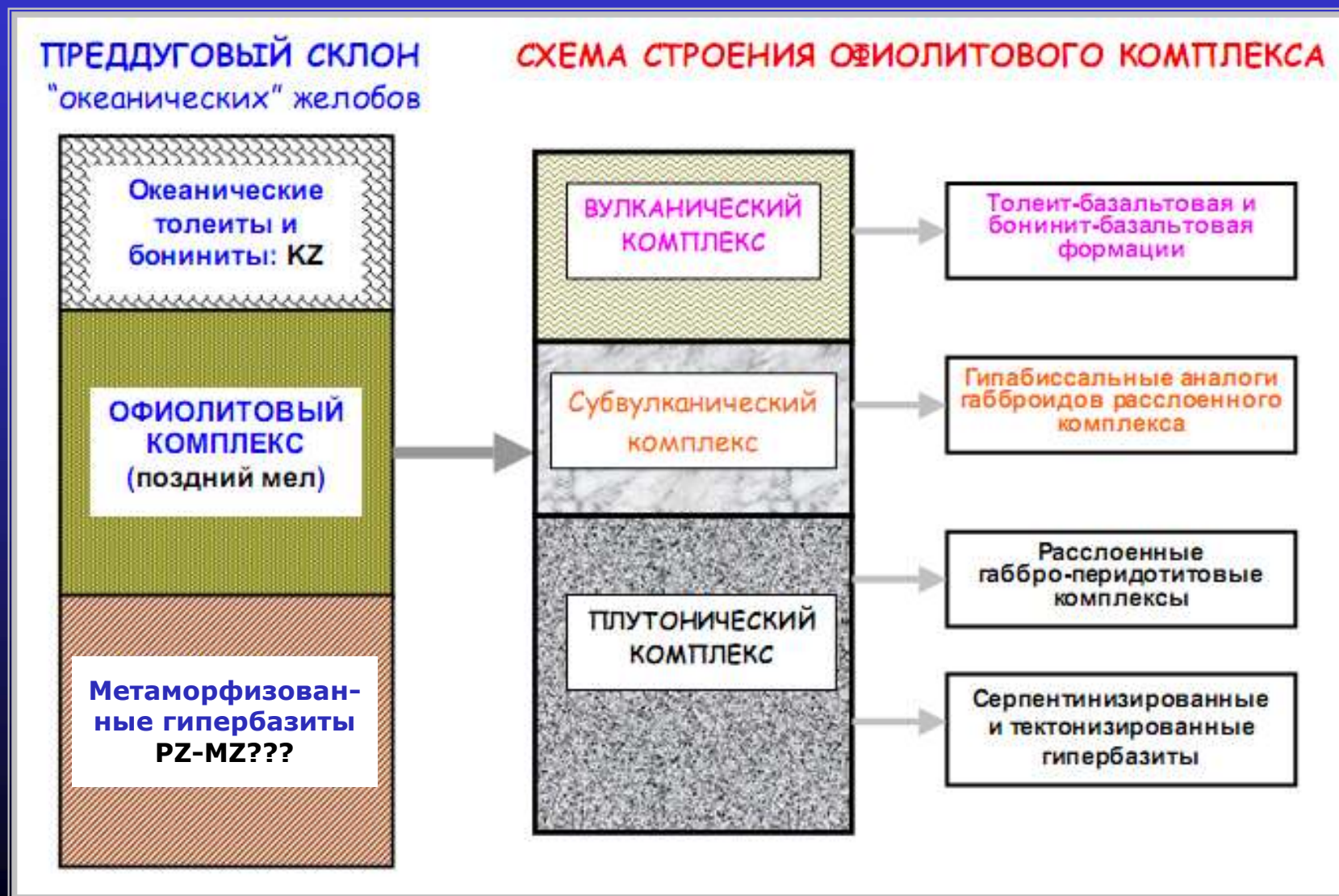
“Океанические” желоба
(энсиматическими дугами)

*Идзу-Бонинский, Марианский,
Тонга-Кермадек*

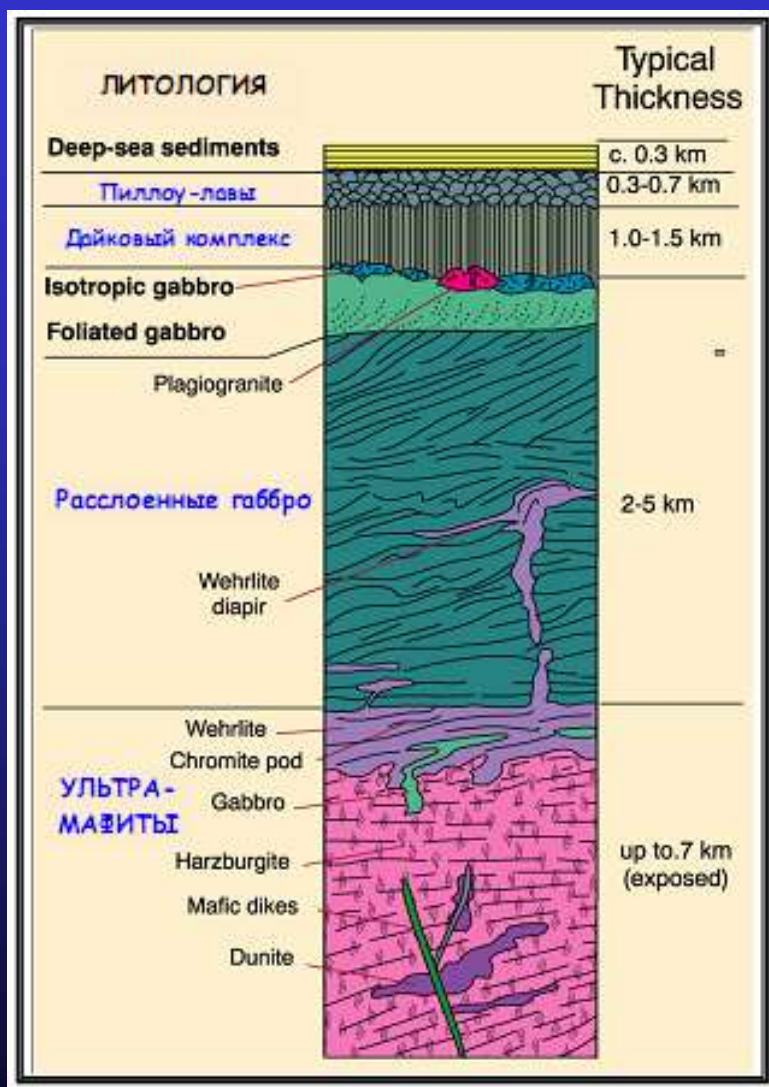
Два типа разрезов преддуговых склонов глубоководных желобов



Разрезы и формации преддуговых склонов океанических желобов



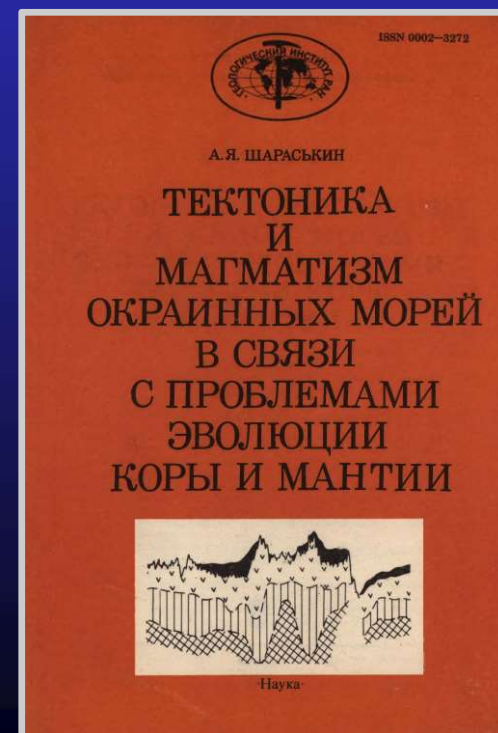
Магматические формации офиолитовых разрезов



Типичный разрез офиолитов Омана

Офиолиты глубоководных желобов - это древняя океаническая кора, которая вскрывается в зонах субдукции, что дает возможность для изучения ее строения и вещественного состава.

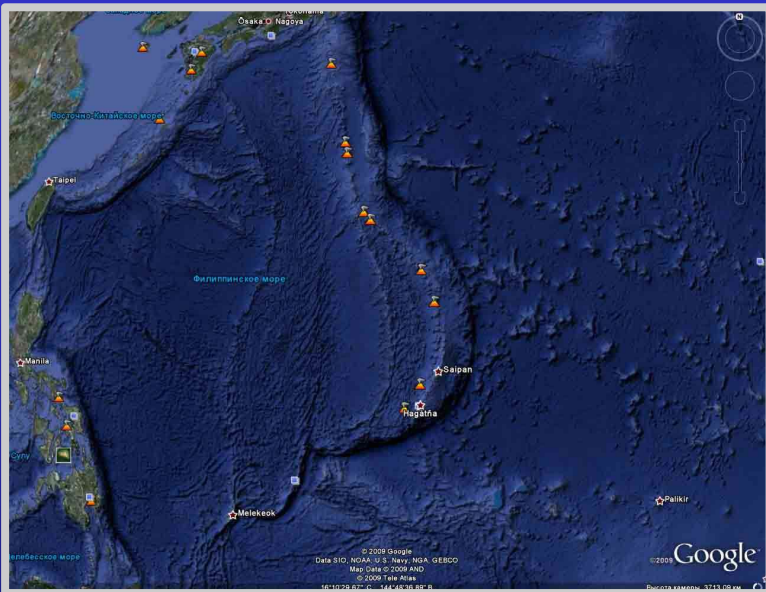
1992 г.



Вулканический комплекс офиолитов: формация толеитовых базальтов

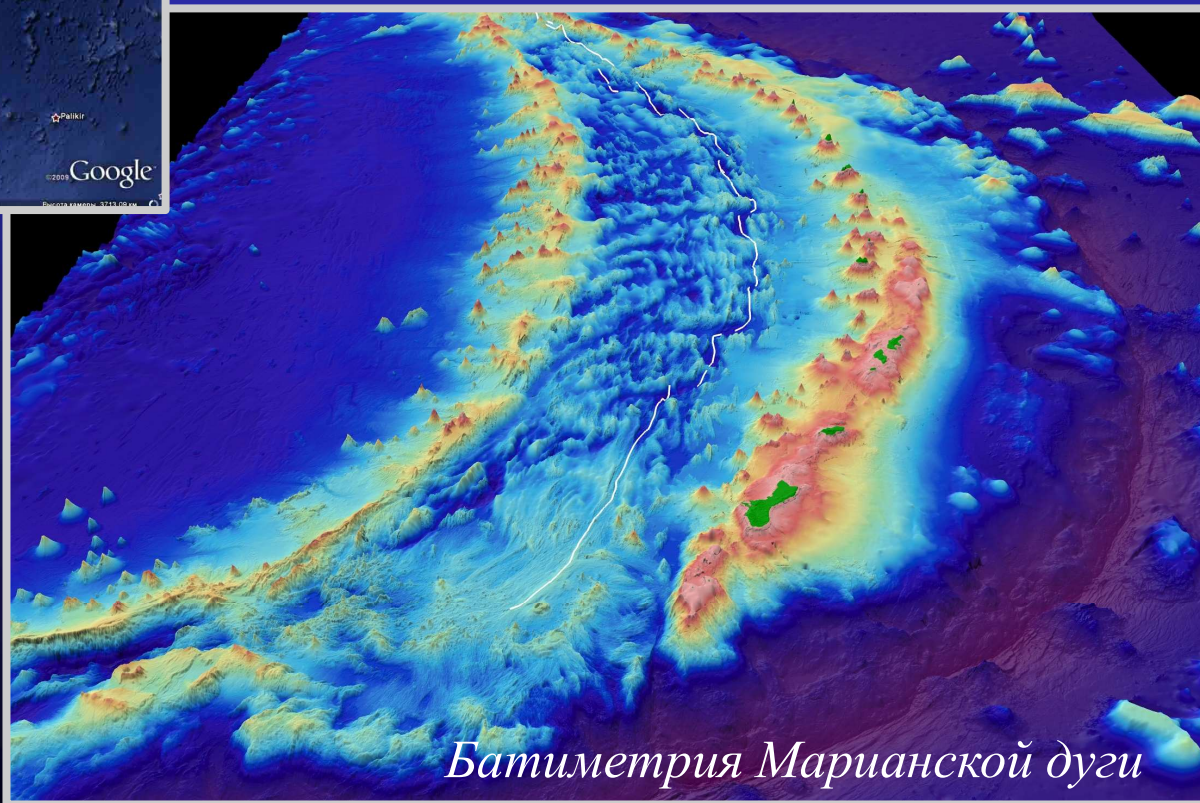
- Включает *подводные базальты и ферробазальты* в ассоциации с флишоидными и кремнистыми осадками. Обычно они залегают непосредственно на базит-гипербазитовых расслоенных комплексах (желоба Тонга-Идзу-Бонинский, Марианский).
- Это *порфировые, реже афировые породы, где в парагенезисе вкрапленников преобладают плагиоклаз (An_{70-80}) и авгит*. Часто встречаются *двупироксеновые разности*. Оливин имеет подчиненное распространение и всегда содержит высоко хромистую шпинель. В основной массе присутствует титаномагнетит.
- *По составу это гиперстен- и кварц-нормативные базальты, демонстрирующие тренды обогащения железом*. Однако средние и кислые дифференциаты редки. От океанических базальтов типа MORB они отличаются развитием порфировых структур, обилием пироксенов и более высокой насыщенностью кремнеземом.
- Здесь несколько *повышены содержания калия и литофильных элементов - Rb, Zr, Sr*. На спайдеграммах они демонстрируют четкий Nb-Ta минимум островодужного типа.

Вулканический комплекс офиолитов: бонинит-базальтовая формация



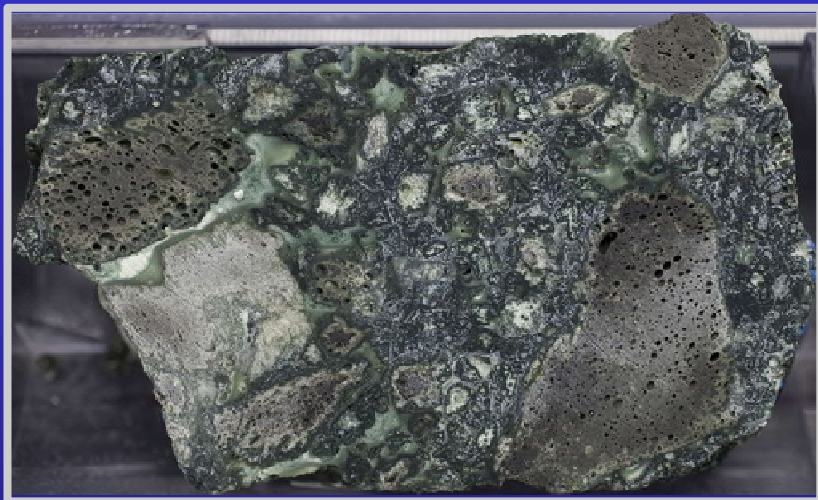
Бонинит-базальтовая формация распространена в Западно-Тихоокеанской окраине и обычно ассоциирует с plutonic complex офиолитов, вскрытых в основании преддуговых склонов.

Породы этой формации экспонированы также на поверхности некоторых островных дуг, например, на Бонинских островах и в Папуа-Новой Гвинее.



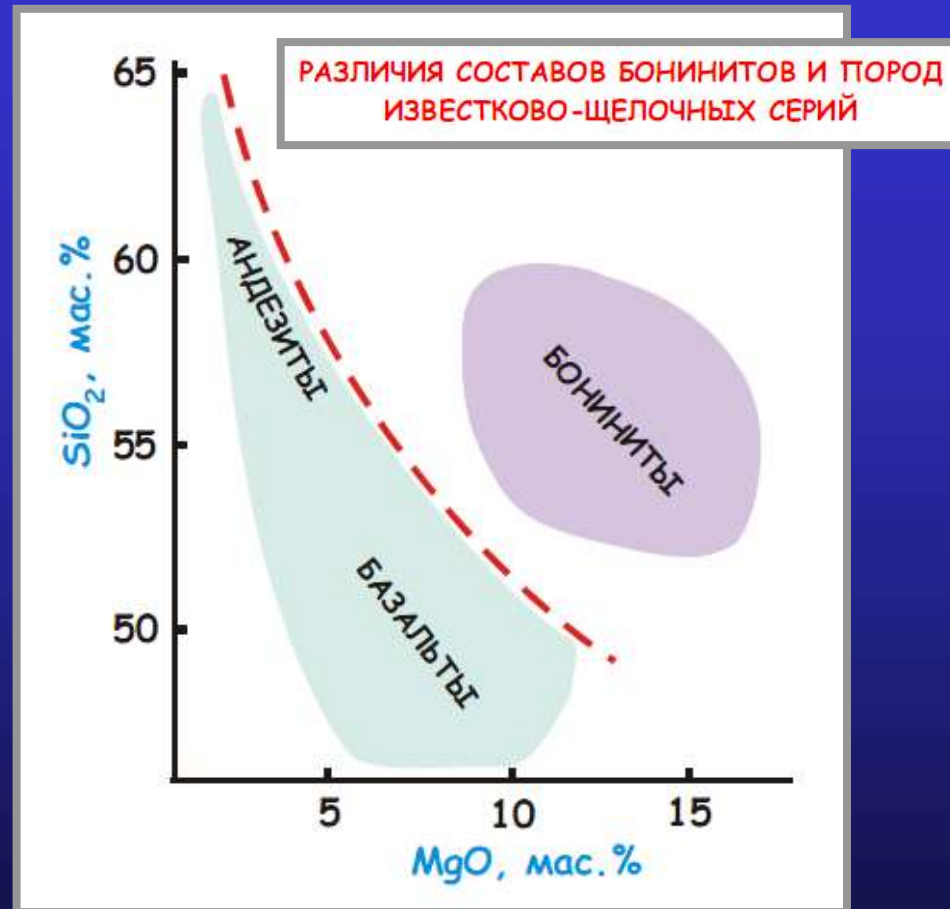
Батиметрия Марианской дуги

БОНИНИТЫ: Морфология и состав



Образец брекчированного бонинита

По сути – это разновидность высокомагнезиальных андезитов, обладающих признаками ультраосновных и одновременно средних пород.



Klingenberg & Kushiro (1996)

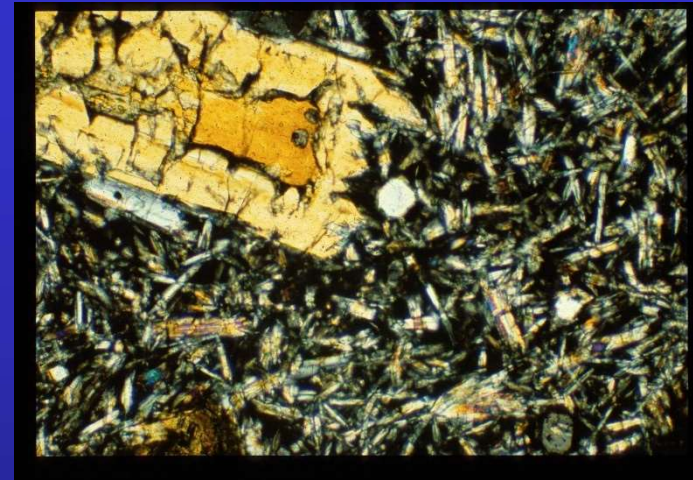
БОНИНИТЫ: Минералогия

Оливин (или без), хромит, клиноэнстатит, ортопироксен.

Типичный бонинит – это **вкрапленники оливина (~40%), порядка 10% ортопироксена и редкие зерна Crx** , погруженные в основную массу из мелких кристалликов зональных пироксенов, оливина и буроватого полупрозрачного стекла.

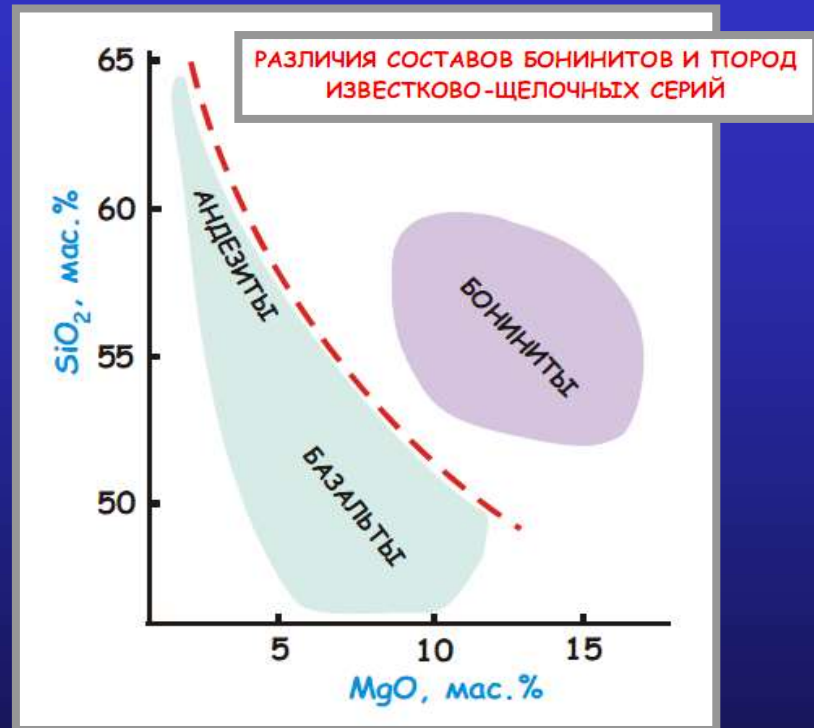
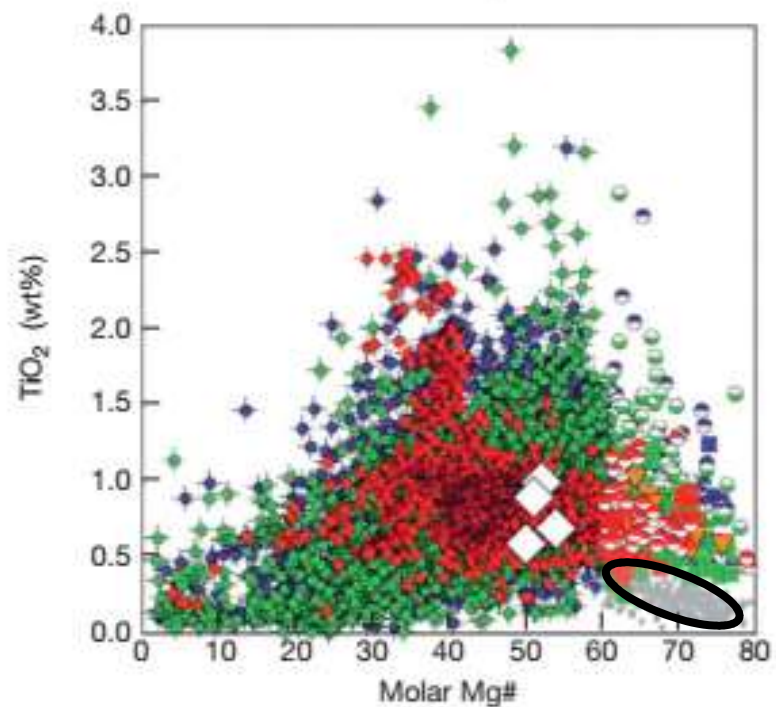
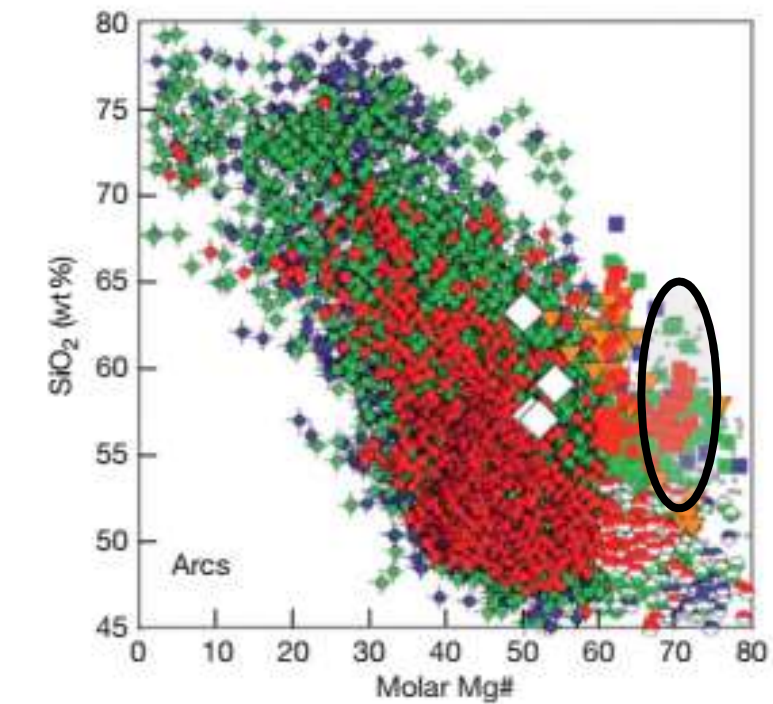
Клинопироксен во вкрапленниках близок диопсиду – высокой магнетиальности и богат хромом. Crx второй генерации – авгит.

Стекло обычно имеет дацитовый состав (60-65% SiO_2) при содержании Al_2O_3 до 16-17%.



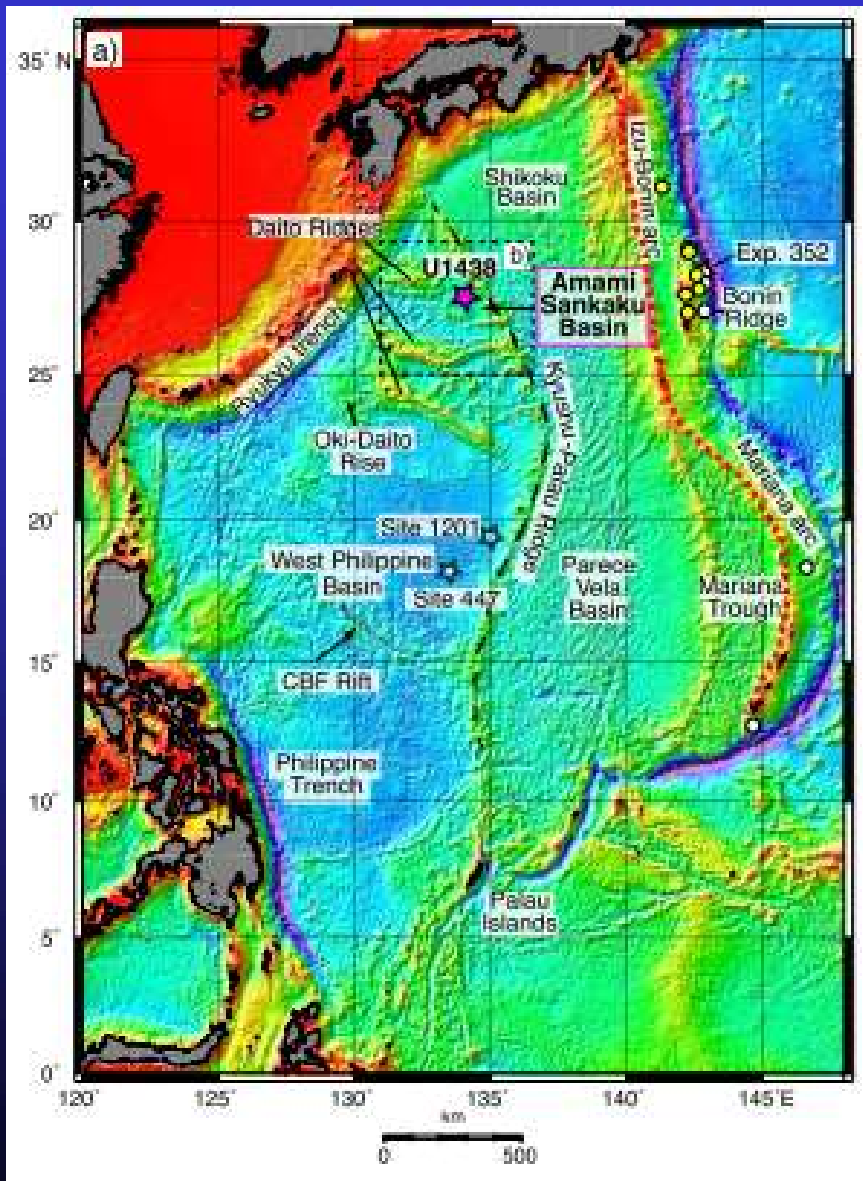
Зональный вкрапленник Orx с реликтовым ядром в тонко раскристаллизованной основной массе

БОНИНИТЫ: Химический состав



After Kelemen et al. (Treatise of Geochemistry, 2014)

IBM arc: Идзу – Бонин – Марианская дуга



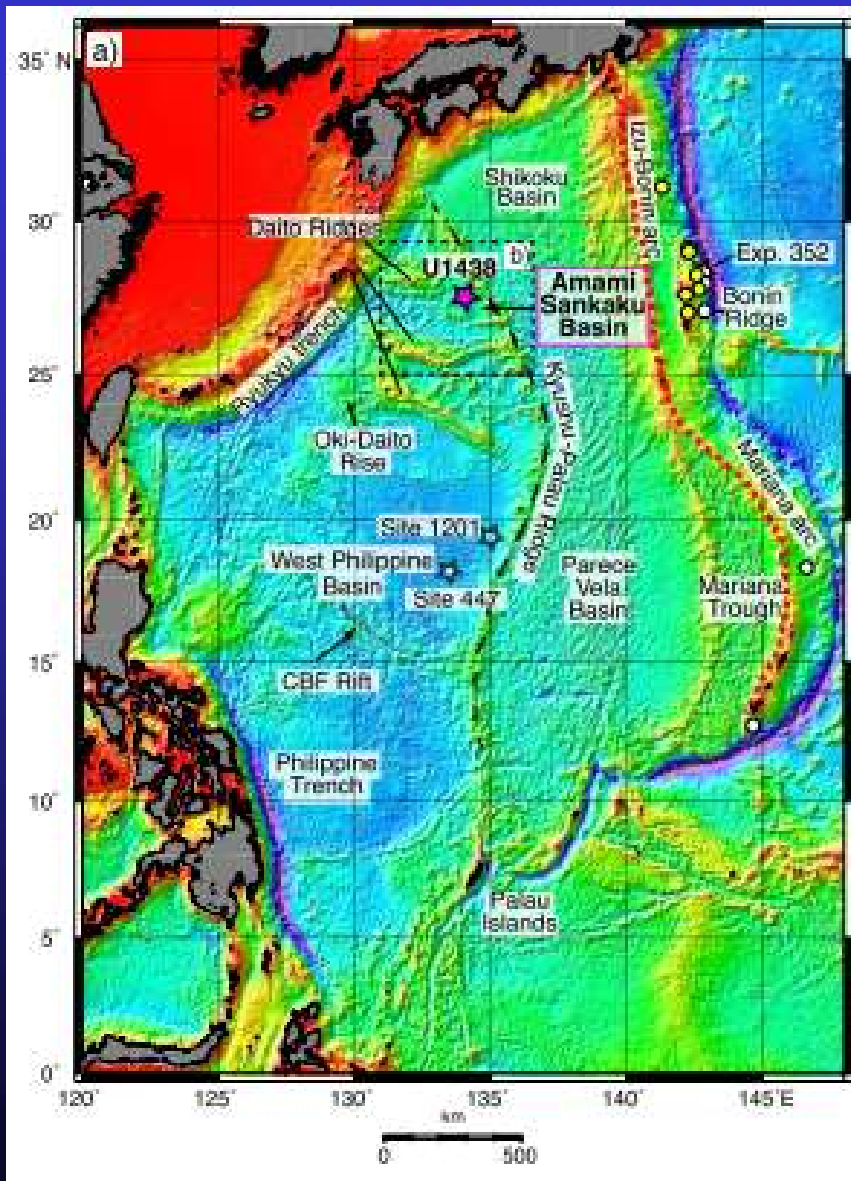
After Ishizuka et al. (2018)

Острова Идзу



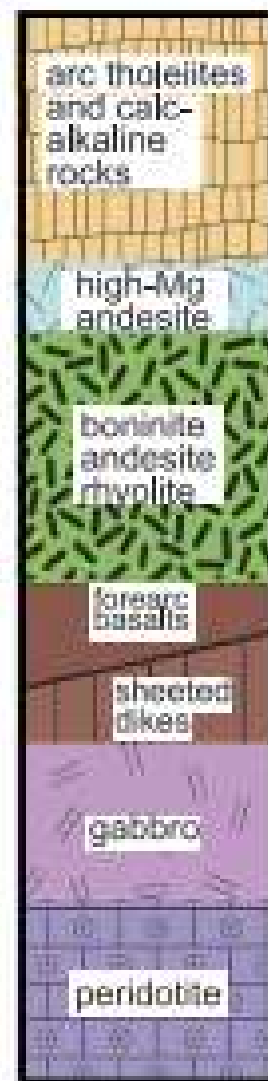
Аогашима – самый южный остров архипелага Идзу

IBM arc: Идзу – Бонин – Марианская дуга



After Ishizuka et al. (2018)

IBM fore-arc



Островодужные
толеиты и ИЦ-серии

Высоко-Mg андезиты

Бонинит-андезит-
риолит

Преддуговые
базальты / дайки

Габбро

Перидотиты

After Woelki et al. (2018)

Разрезы приокеанических склонов глубоководных желобов



Обычно в их основании залегают *пиллоу-лавы* *субщелочных* (реже *толеитовых*) *базальтов мелового возраста*, которые часто сопровождаются *долеритами* и *габбро*.

Местами они подвергнуты *зеленокаменному изменению*.

В отдельных желобах (в частности, Курильском) здесь установлены породы известково-щелочной серии. Завершают эти разрезы также осадочные породы неогенового и четвертичного возраста.

Формации приокеанических склонов глубоководных желобов



Формации **приокеанических склонов** могут быть представлены **однородными толеитовыми и субщелочными базальтами**, контрастными (напр. базальт-трахидацит-трахириолитовыми) или непрерывными субщелочными сериями типа базальт – гавайит – муджиерит – бенморейт – трахидацит – трахириолит.

Вещественный состав этих ассоциаций разнообразен, но в целом, преобладают субщелочные и высокотитанистые серии, близкие продуктам внутриплитного магматизма..... ???

В ассоциации с этими эффузивами встречаются полнокристаллические долериты и диабазы, а также вулканогенно-осадочные породы.

Проявления молодого вулканизма внутри глубоководных желобов

- Возраст 5-8 млн. лет.
- Представлен базальтами из осевой зоны или приокеанического склона желобов (*Перуанско-Чилийский, Центрально-Американский, Марианский и др. желоба*).
- От типичных MORB отличаются **преобладанием Cr_x над OI** во включениях и пониженным содержанием Ti, Zr, Nb, Ta, Hf.
- Толеитовая тенденция обогащения железом.
- Факт наличия молодого вулканизма в желобах указывает на **отсутствие погружения коры - по крайней мере, с неогена**. Иначе “даже при минимальных скоростях субдукции базальты желобов неминуемо погрузились бы на глубину” (Дмитриев, 1987).

Выводы о тектоно-магматической эволюции глубоководных желобов

Кайнозойский разрез, экспонированный на склонах со стороны вулканических фронтов, сложен *формациями, характерными для островных дуг и орогенных континентальных поясов.*

Наличие несогласий, чередование вулканических и осадочных формаций свидетельствуют о *цикличности магматических процессов при эволюции активных окраин.* **СТАДИЙНОСТЬ!**

Наиболее крупное поднятие и перерыв пришлось на границу мела и палеогена, когда часть офиолитов в поднимающихся блоках оказалась выведена на земную поверхность.

После этого погружения стали преобладать над поднятиями и началось формирование отрицательной структуры - желоба.

Наиболее интенсивное погружение желобов произошло в конце плиоцена - начале плейстоцена. Оно продолжается и поныне.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ БОНИНИТОВ

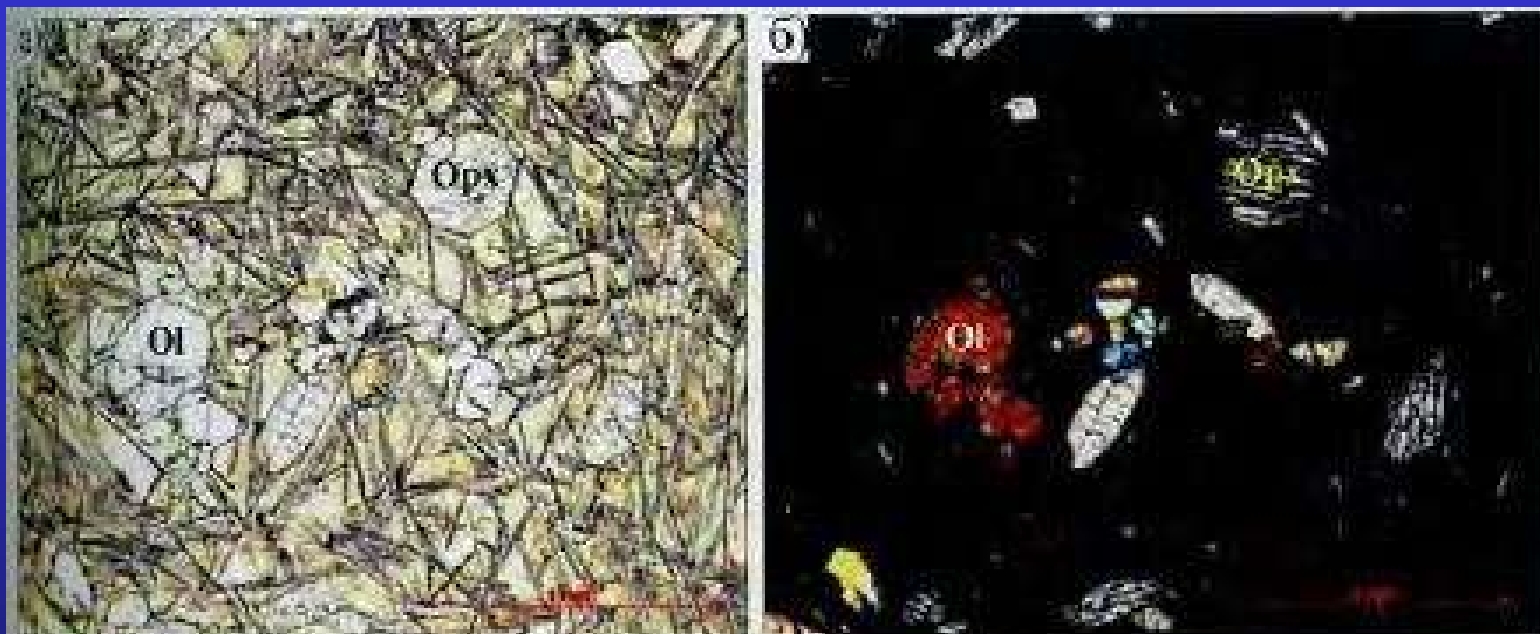
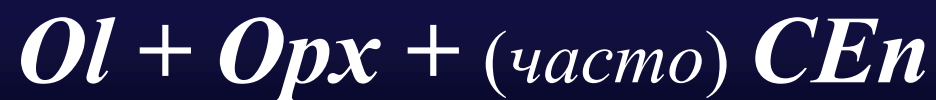


Рис. 6.11. Бонинит, о. Новая Каледония: а – при одном николе; б – николи скрещены. Вкрапленники представлены оливином и ортопироксеном. Основная масса сложена скелетными кристаллами орто- и клинопироксена, погруженными в стекловатый матрикс.



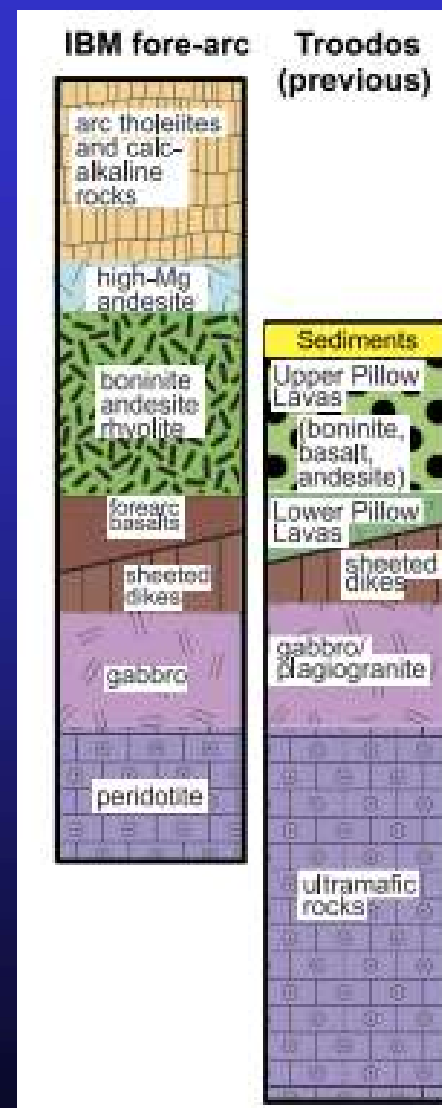
Составы пород бонинит- марианитовых серий

Оксиды	Марианский желоб	О-ва Бонин		Япония (SW)	Средний бонинит (n=134)
	<i>Геология и петрология..., 1991</i>	<i>Takami, Eggink, 1995</i>			<i>Drummond et al., 1996</i>
SiO ₂	54.91	55.49	57.60	59.59	58.74
TiO ₂	0.12	0.18	0.26	0.44	0.23
Al ₂ O ₃	6.58	10.37	11.06	13.55	11.22
FeO	10.26	8.65	8.78	6.32	8.53
MnO	0.16	0.17	0.17	0.12	0.17
MgO	22.16	16.50	12.31	9.65	12.09
CaO	3.38	5.60	7.74	6.24	6.77
Na ₂ O	1.48	1.64	1.64	2.66	1.69
K ₂ O	0.91	0.80	0.42	1.30	0.47
P ₂ O ₅	0.03	0.14	0.02	0.13	0.09
mg#	0.79	0.77	0.72	0.74	0.72
Cr					969
Ni					223

СОСТАВЫ ВЫСОКО-Са И НИЗКО-Са БОНИНИТОВ

(Van Der Laan et al., 1989)

Оксиды	Высоко-Са	Низко-Са	
	Троодос (Кипр)	О-ва Бонин (Япония)	Мыс Фогеля (Папуа Новая Гвинея)
SiO ₂	54.93	58.82	59.34
TiO ₂	0.51	0.14	0.51
Al ₂ O ₃	13.15	11.06	10.62
FeO	8.20	8.43	9.27
MnO	-	-	-
MgO	11.52	11.71	12.57
CaO	10.21	7.79	5.74
Na ₂ O	1.17	1.61	1.37
K ₂ O	0.26	0.42	0.49
P ₂ O ₅	0.04	0.02	0.10
mg#	0.715	0.712	0.707
CaO/Al ₂ O ₃	0.77	0.70	0.54
Cr	807	695	910
Ni	202	194	227



After Woelki et al. (2018)

Тони Кроуфорд (Tony Crawford) и Росс Ладж (Ross Large)

Тасмания-2006

1 Classification, petrogenesis and tectonic setting of boninites

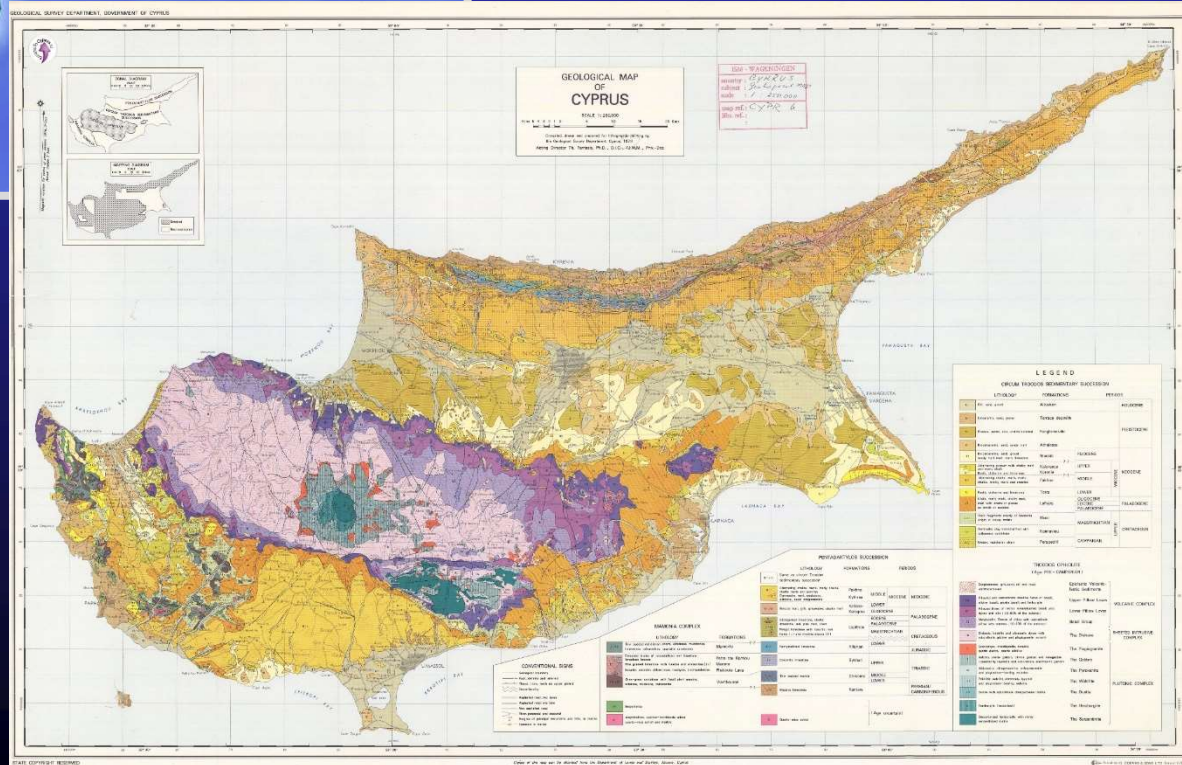
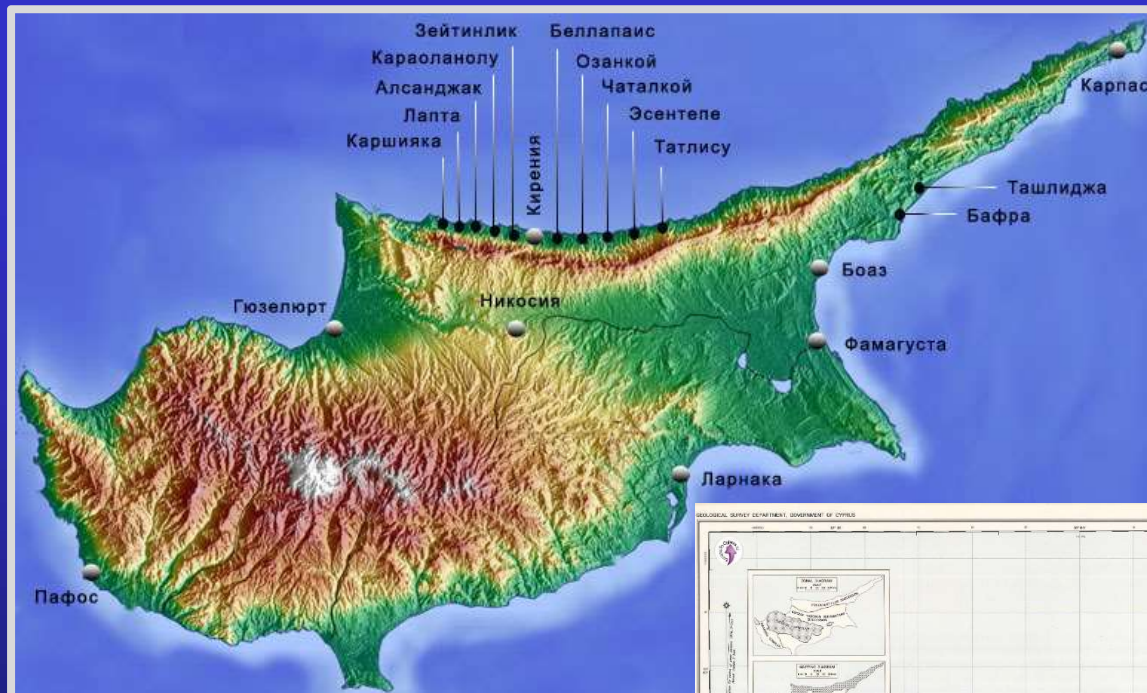
ANTHONY J. CRAWFORD,
TREVOR J. FALLOON & DAVID

Abstract

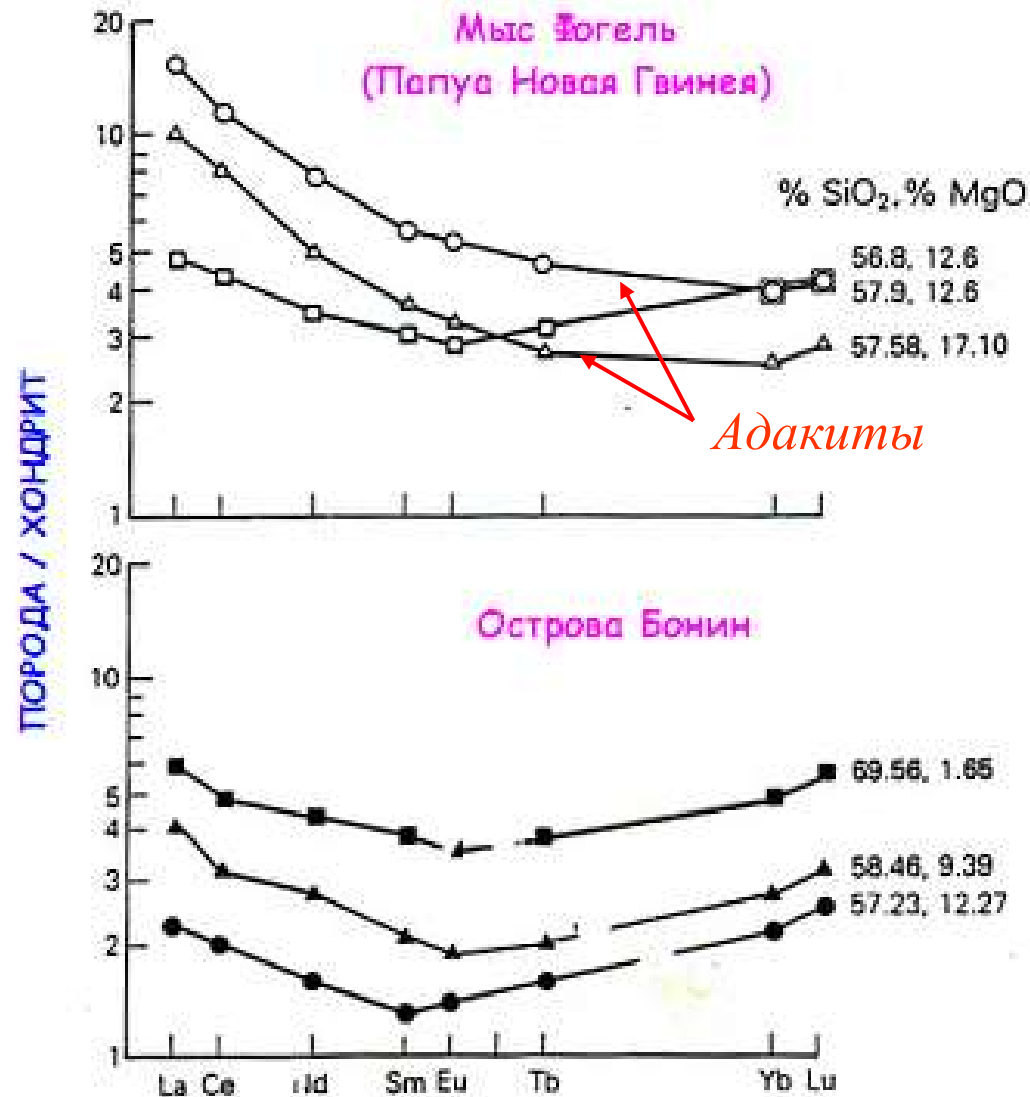
Based on major-element compositions, boninites are divided into low-Ca and high-Ca suites. High-Ca boninites, including the Troodos Ophiolite in Cyprus, have $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 0.75$. They generally contain orthopyroxene and may crystallize both high-Ca and low-Ca plagioclase microphenocrysts; their high-CaO nature inhibits clinopyroxene crystallization.



Высоко-Са бониниты массива Троодос



Распределение РЗЭ в низко-Са бонинитах островов Бонин и Папуа Новая Гвинея



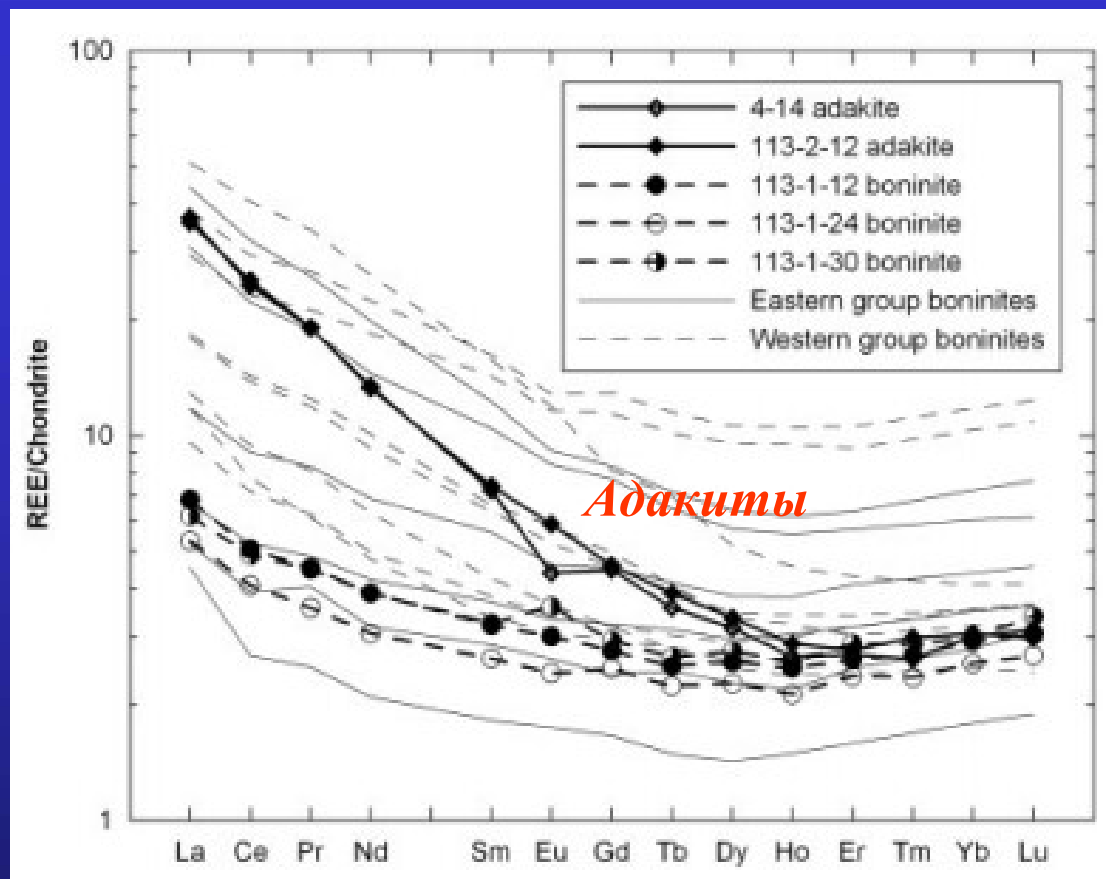
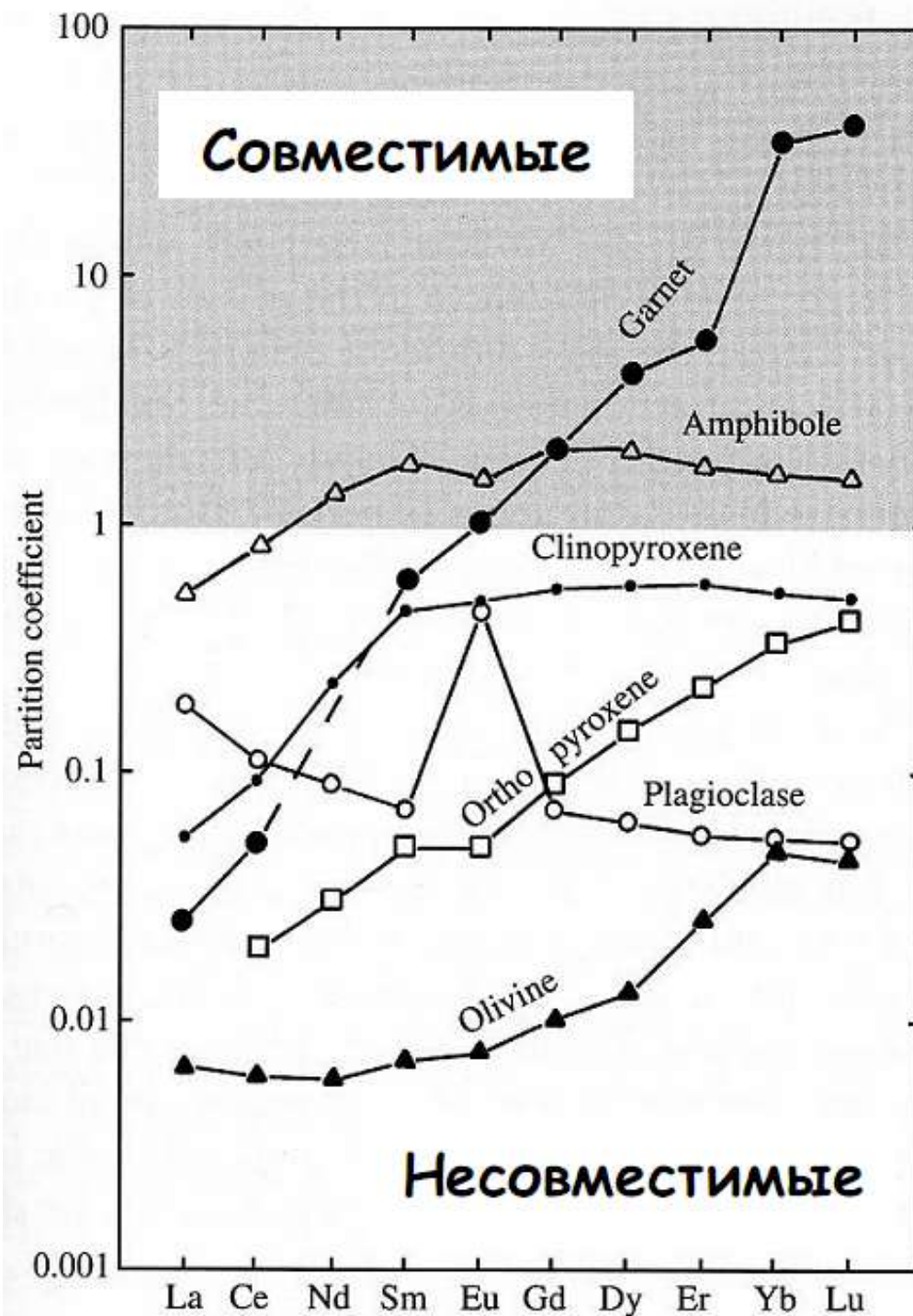


Fig. 5. Chondrite-normalized REE patterns for coexisting boninites and adakites from the northern termination of the Tonga Trench. Data

Распределение
РЗЭ в низко-Са
бонинитах сев.
окончания дуги
Тонга (Falloon et al.,
2008)

U-образная форма распределения спектров может указывать на тугоплавкий (гироксенитовый) мантийный источник.



**Коэффициенты
распределения РЗЭ в
базальтовой системе**

Срх или амфибол?

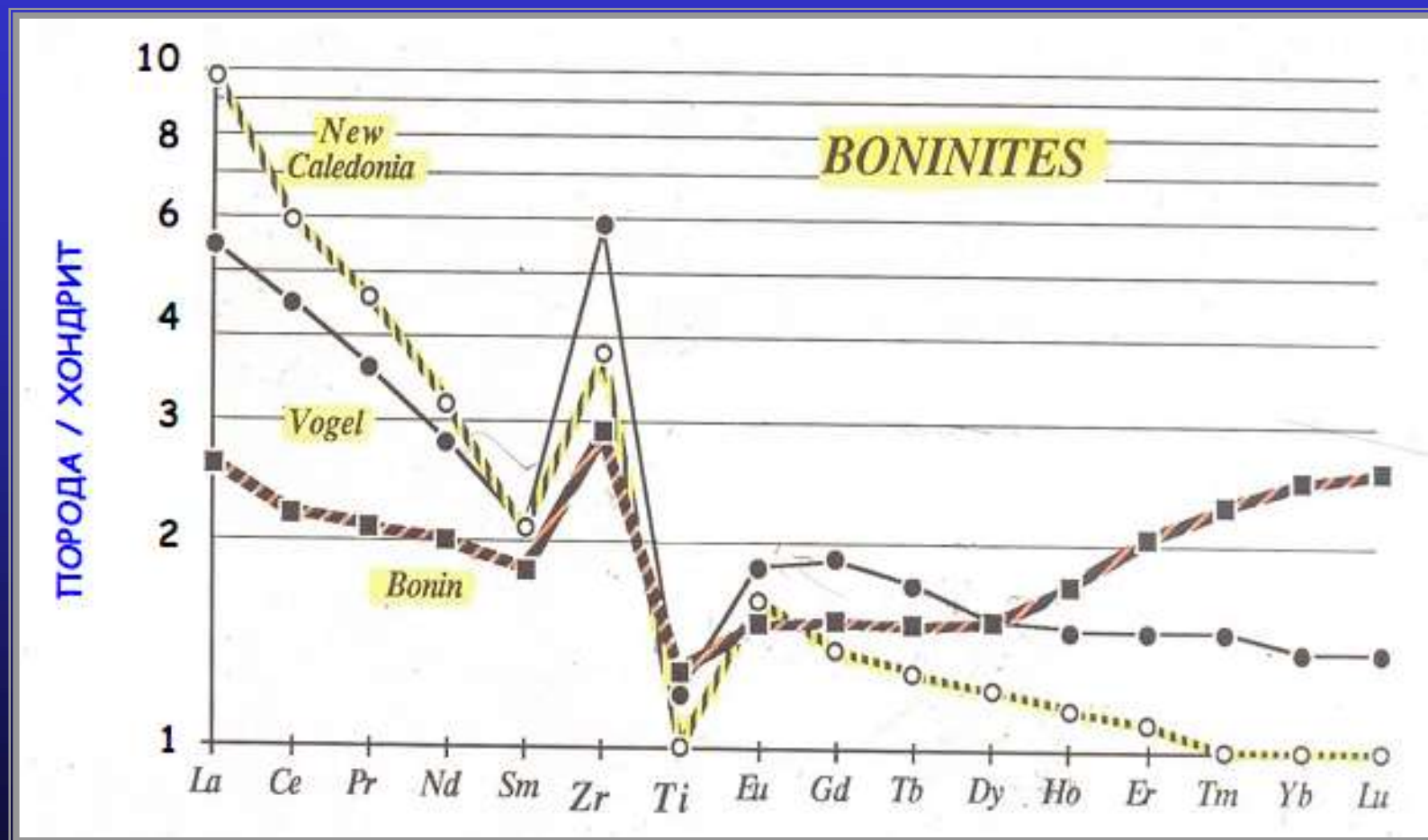
**Пироксениты
(верлиты!)**

или амфиболиты?

Аргументы за верлитовый источник бонинитов кумулусной природы

- Высокие значения $mg\#$ - 90-91 и выше
- Высокие содержания SiO_2 в выплавках
- Низкие содержания TiO_2
- Переменность Ca/Al отношения из-за разной степени плавления Sr_x в источнике
- U-образная форма РЗЭ-спектров
- Неизбежность существования верлитовых резервуаров как продуктов кристаллизации анкарамитовых и примитивных известково-щелочных магм! – *как полагает ААА...*

Zr-максимум и Ti-минимум как типоморфные сигналы бонинитовых магм



Спайдердиаграммы для других бонинитов

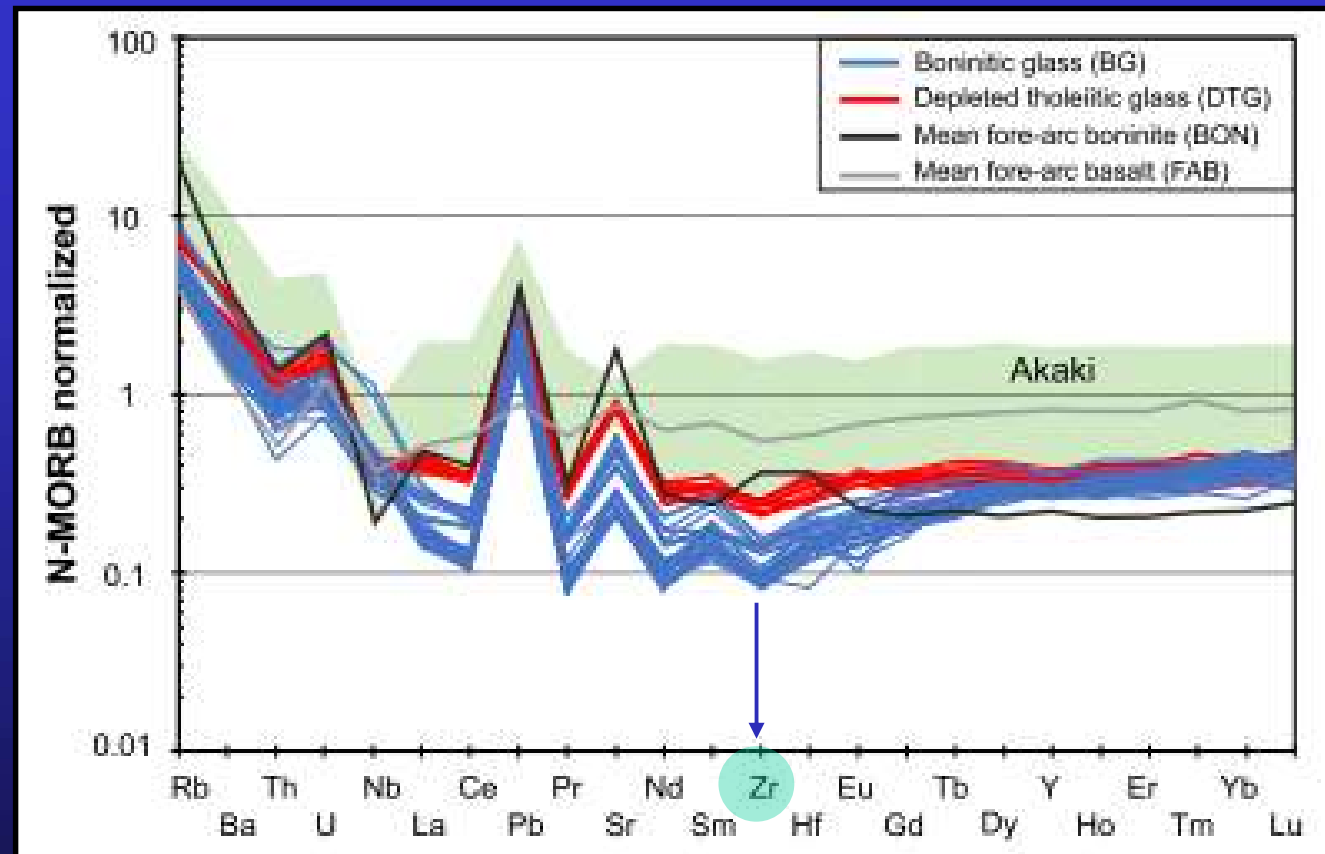


Fig. 3. Trace element composition of the Parekkklisia glasses normalised to N-MORB (Sun and McDonough, 1989). Green field shows composition of glasses from Akaki Canyon (Rautenschlein et al., 1985; Regelous et al., 2014). Mean fore-arc basalt (FAB) and boninite (BON) for comparison (data sources as in Fig. 2). Note enrichment in fluid soluble elements in all Troodos lavas compared to MORB, the relative Nb and LREE enrichment in the most depleted Troodos lavas, and lack of Zr enrichment relative to Sm. (For interpretation of the colours in the figure(s), the reader is referred to the web version of this article.)

After Woelki et al. (2018)

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ БОНИНИТОВ:

Протопироксен

как типоморфная фаза

Составы пород бонинит- марианитовых серий

Оксиды	Марианский желоб	О-ва Бонин		Япония (SW)	Средний бонинит (n=134)
	<i>Геология и петрология..., 1991</i>	<i>Takami, Eggink, 1995</i>			<i>Drummond et al., 1996</i>
SiO ₂	54.91	55.49	57.60	59.59	58.74
TiO ₂	0.12	0.18	0.26	0.44	0.23
Al ₂ O ₃	6.58	10.37	11.06	13.55	11.22
FeO	10.26	8.65	8.78	6.32	8.53
MnO	0.16	0.17	0.17	0.12	0.17
MgO	22.16	16.50	12.31	9.65	12.09
CaO	3.38	5.60	7.74	6.24	6.77
Na ₂ O	1.48	1.64	1.64	2.66	1.69
K ₂ O	0.91	0.80	0.42	1.30	0.47
P ₂ O ₅	0.03	0.14	0.02	0.13	0.09
mg#	0.79	0.77	0.72	0.74	0.72
Opx	55.7	53.7	40.1	31.6	41.2
Qtz	0	1.3	7.9	8.7	10.2

$Ol + Opx + (\text{часто}) CEn$

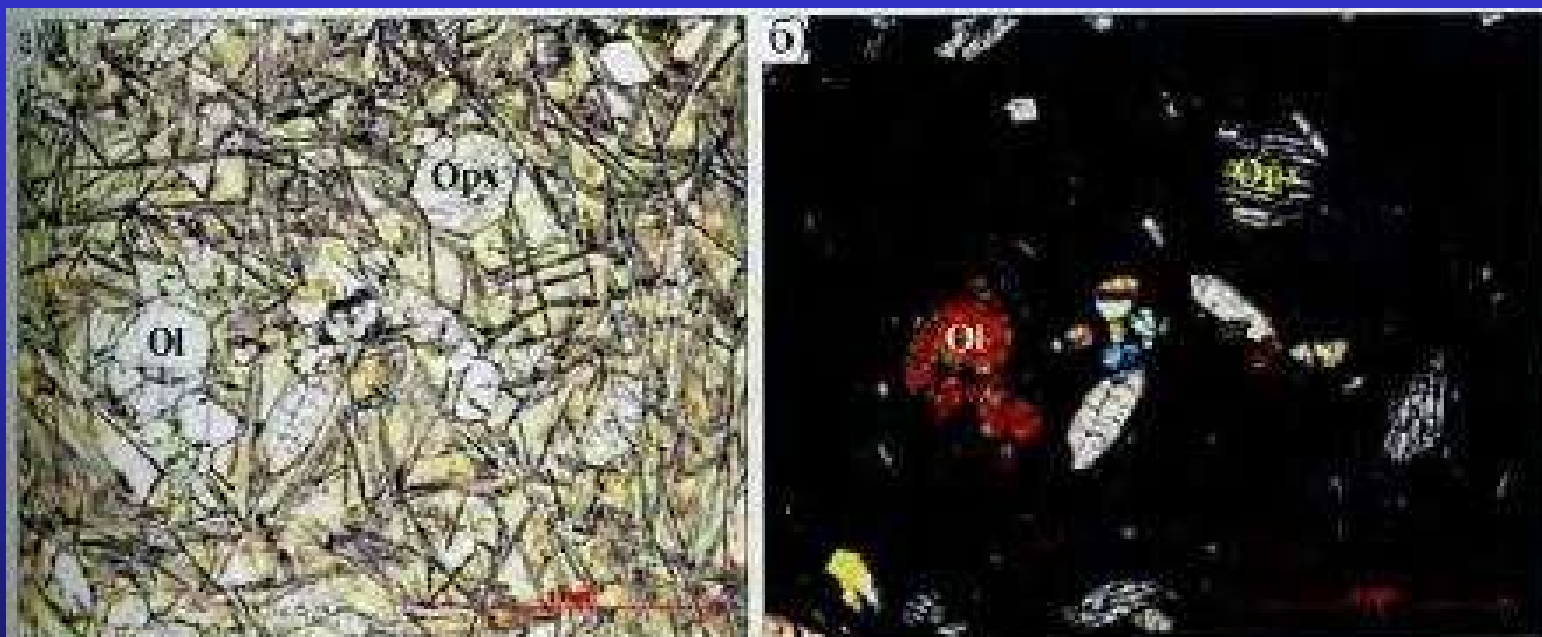


Рис. 6.11. Бонинит, о. Новая Каледония: а – при одном николе; б – николи скрещены. Вкрапленники представлены оливином и ортопироксеном. Основная масса сложена скелетными кристаллами орто- и клинопироксена, погруженными в стекловатый матрикс.

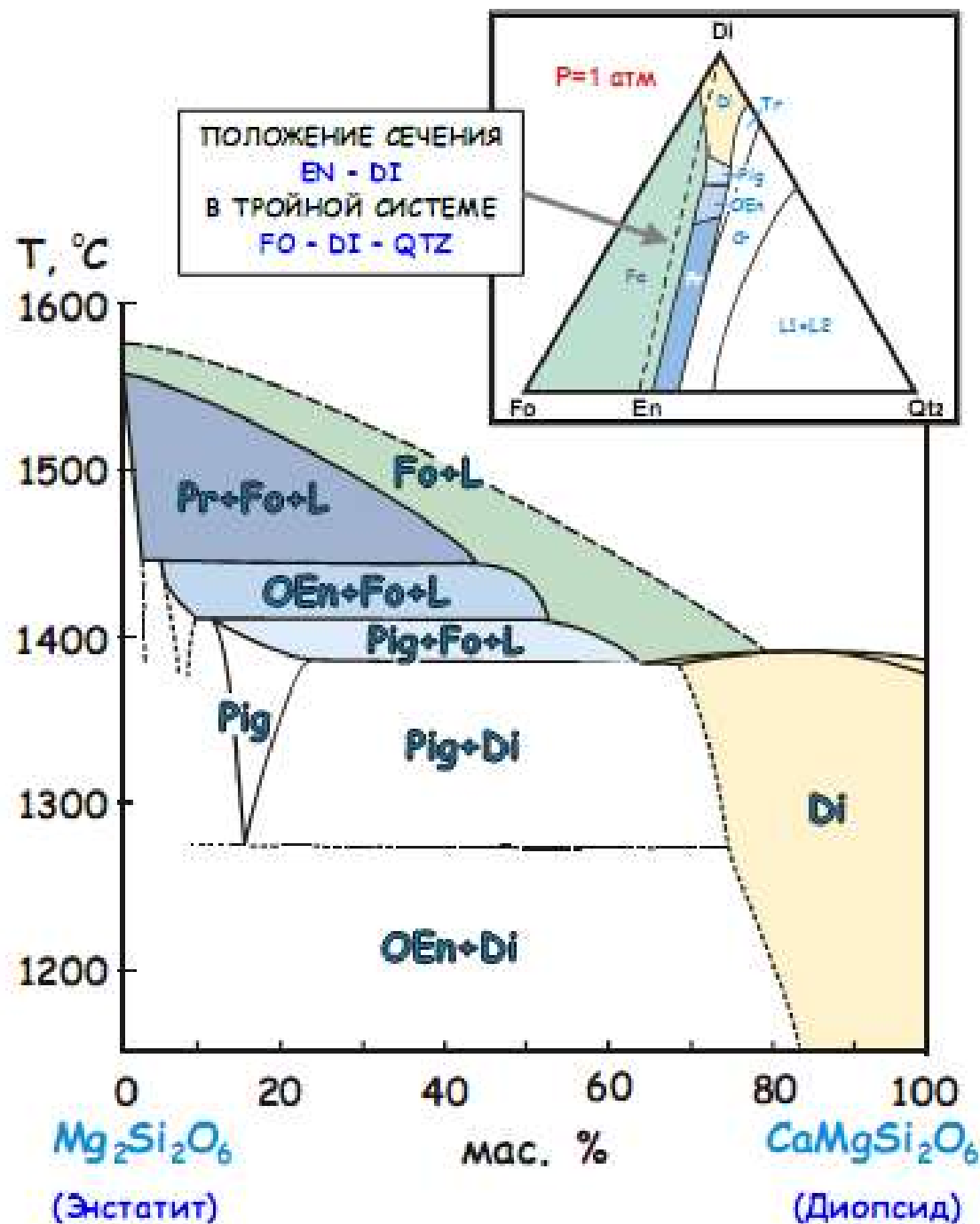
Clinoenstatite in boninites from the Bonin Islands, Japan

Keiichi Shiraki, Naoshi Kuroda, Hayaomi Urano & Shigenori Manuyama
Nature volume 285, pages 31–32 (1980)

Abstract

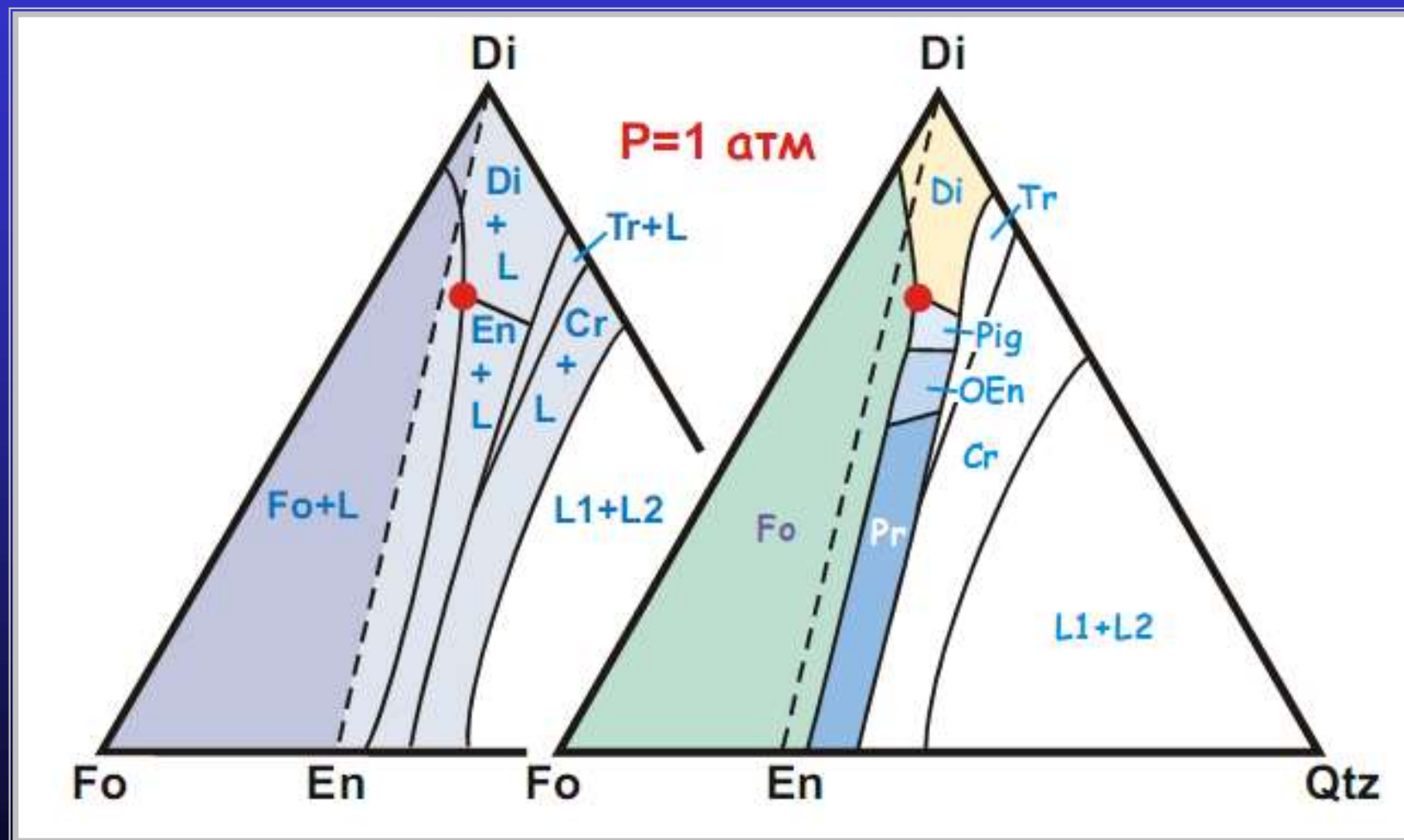
Protoenstatite is also a rare mineral and its terrestrial occurrence has been confined to the high-Mg andesites from Cape Vogel, eastern Papua⁸, and the Mariana Trench³. Some boninites from the Bonin Islands were found to contain abundant multiply-twinned clinoenstatite (inverted protoenstatite) with or without olivine. **The clinoenstatite, coexisting with olivine with a similar forsterite content to that in the mantle,** shows that protoenstatite crystallized later than the olivine, whereas in the olivine-free, clinoenstatite-bearing rock (which has more SiO₂ than the clinoenstatite-bearing or -free boninites with olivine), the protoenstatite may have been the liquidus mineral.

We show here that the presence of inverted protoenstatite in the Bonin Islands confirms our earlier suggestion^{1,9,10} that boninites may have been formed by extensive partial melting of hydrous peridotite at relatively low pressures and rapid quenching from high temperatures at shallow depths.

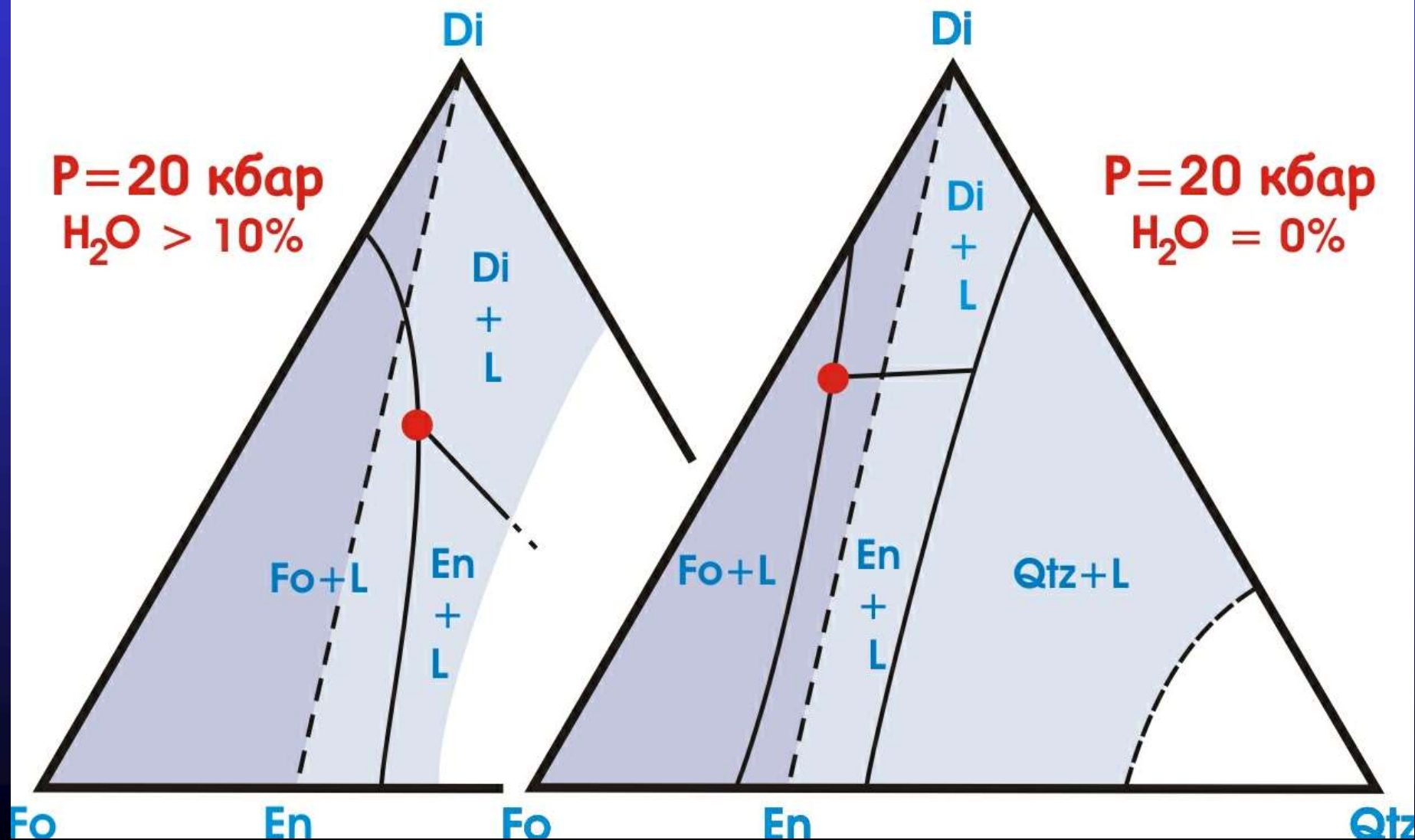


Соотношения низко-
Са пироксенов в
системах Fo-Di-Qtz
и En-Di

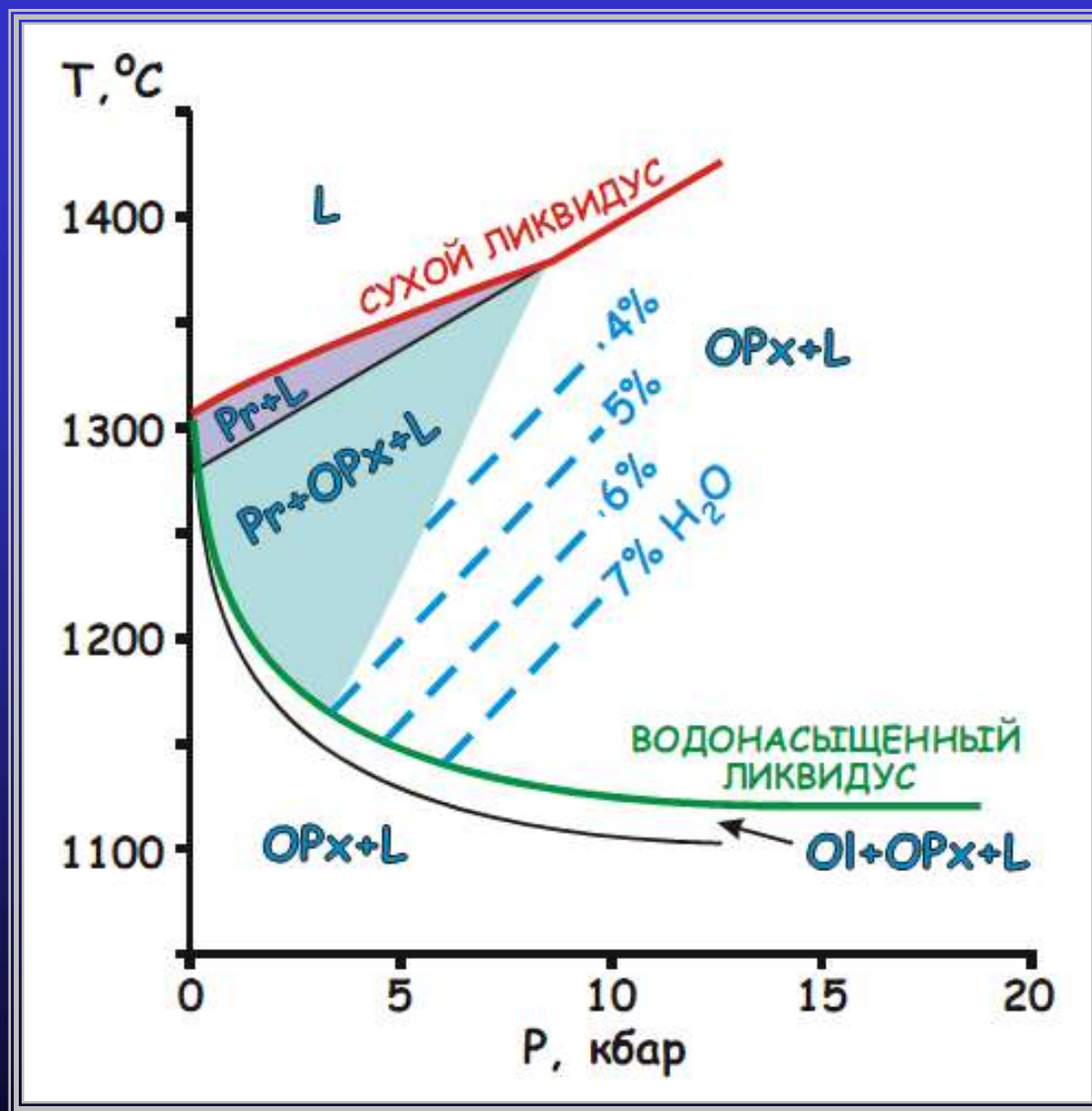
Упрощенная (слева) и детализированная (справа) система Fo-Di-Qtz



ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА ПОЛОЖЕНИЕ ТОЧКИ РАВНОВЕСИЯ OL+CPX+OPX В СИСТЕМЕ Fo-Di-SiO₂



Результаты экспериментов по плавлению “Сеп-бонинитов” в сухой и водной системах



Umino & Kushiro (1983)

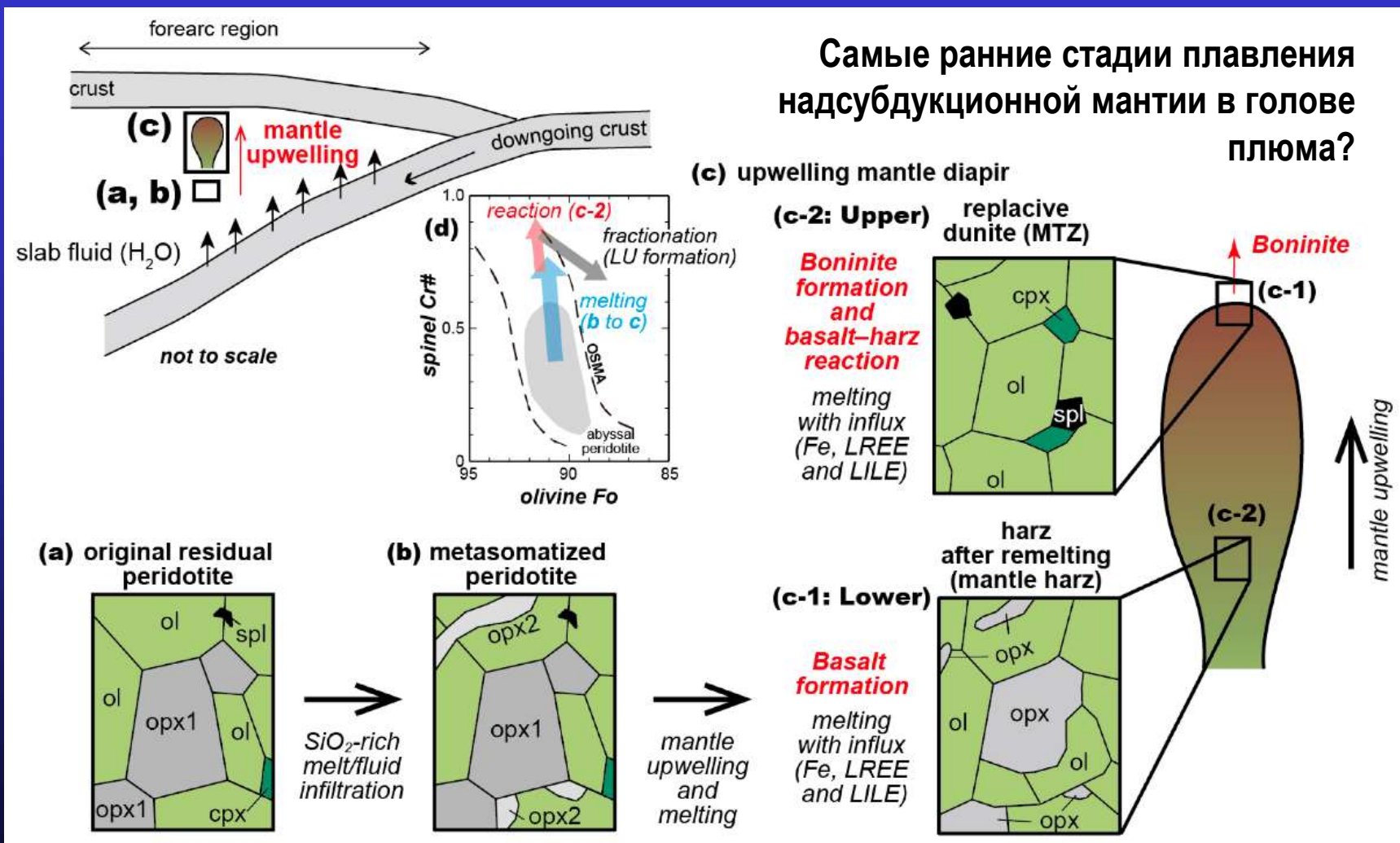
Ассоциации $Ol+Orx \pm Pr$
стабильны при **4-8 кбар**

Котектика $Ol+Orx$
предполагает **не менее
4 мас.% H_2O** , если
меньше – стабилен Pr !

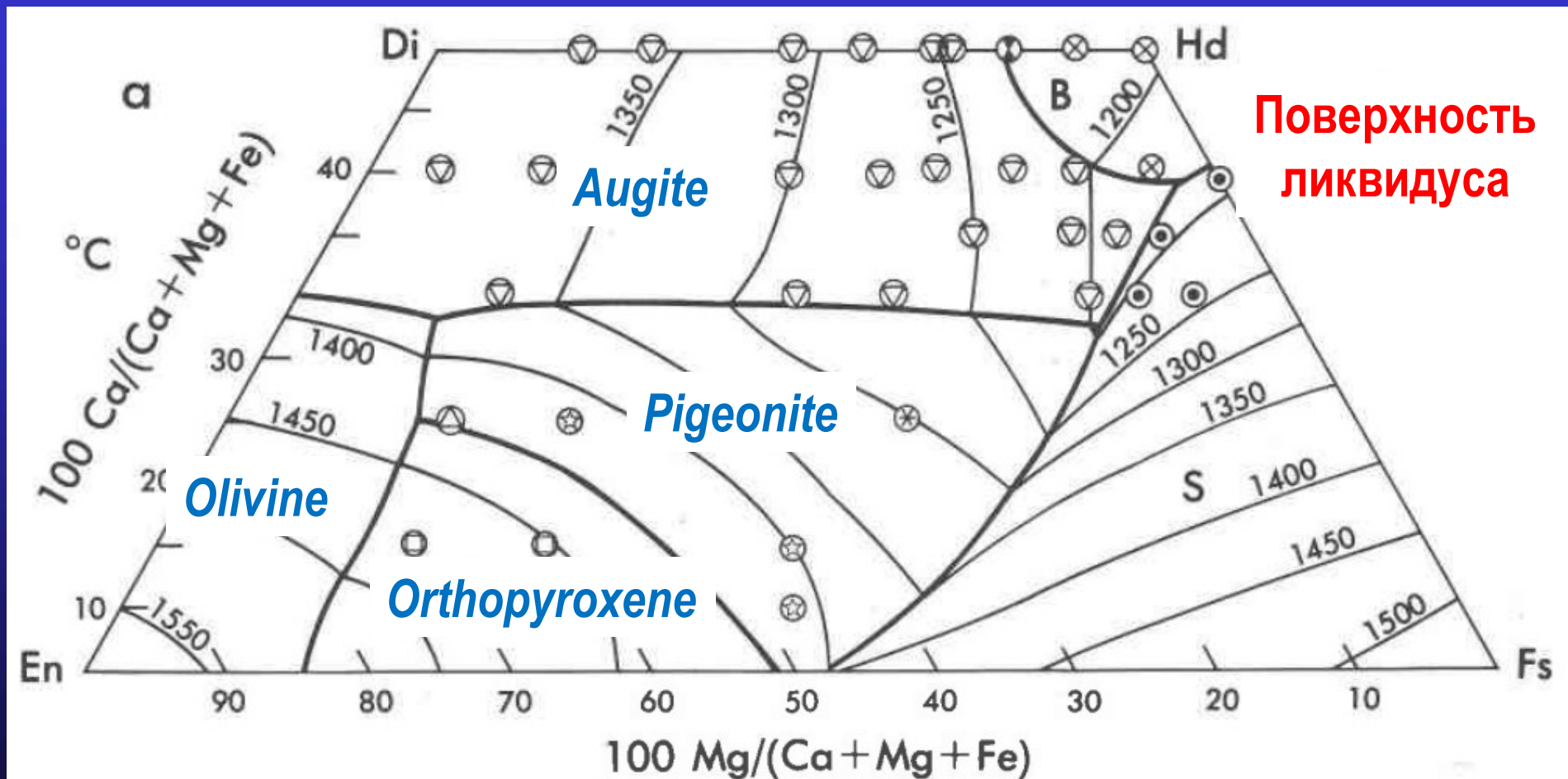
Значит образование
бонинитовых магм
отвечает плавлению
мантии **на глубинах 12-
25 км**, не более...

Это соответствует
тонкой океанической
коре **IBM-дуги**
(приподнятой мантии)

Гипотетические сценарии образования бонинитов

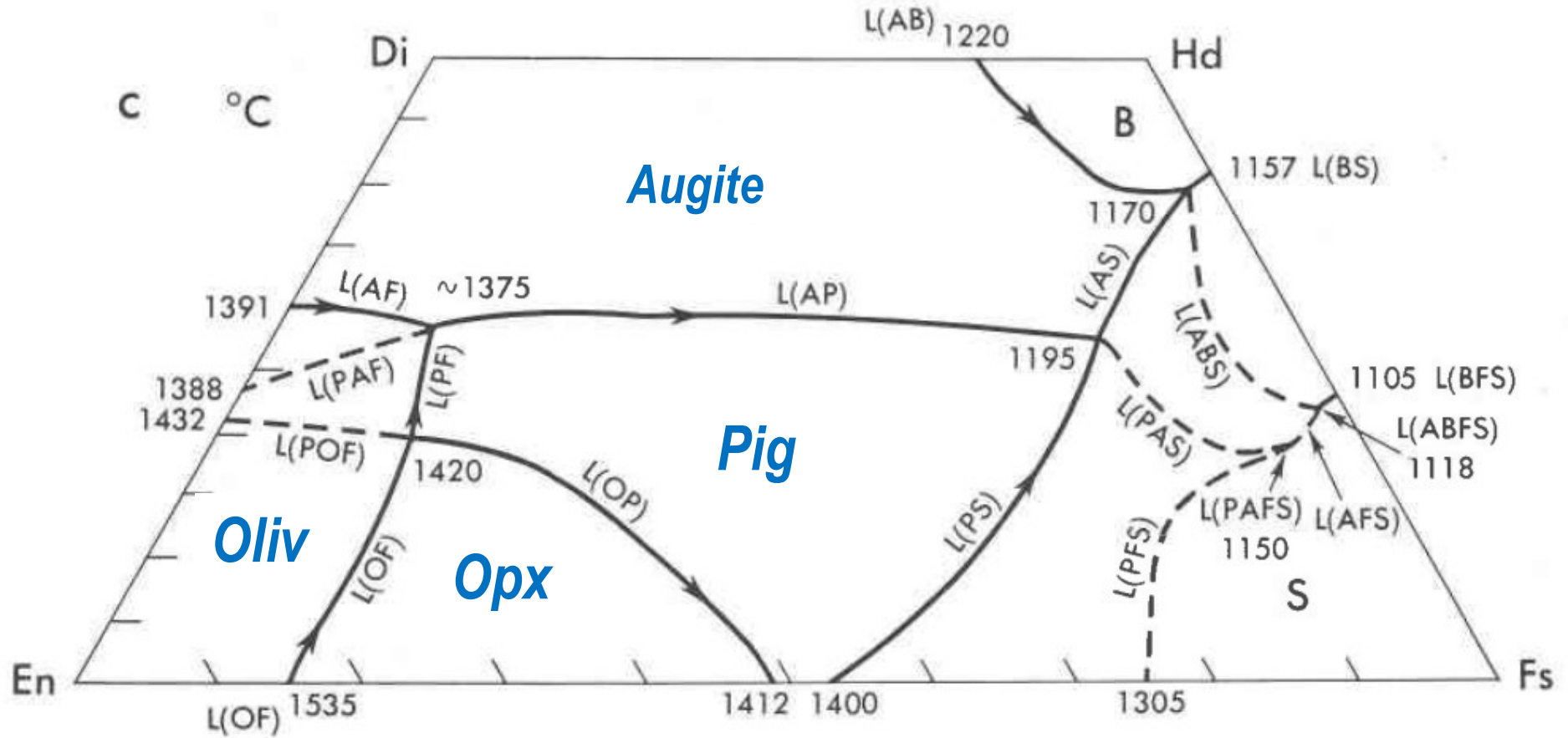


Фазовые соотношения при плавлении пироксенов (Huebner and Turnock, 1980)



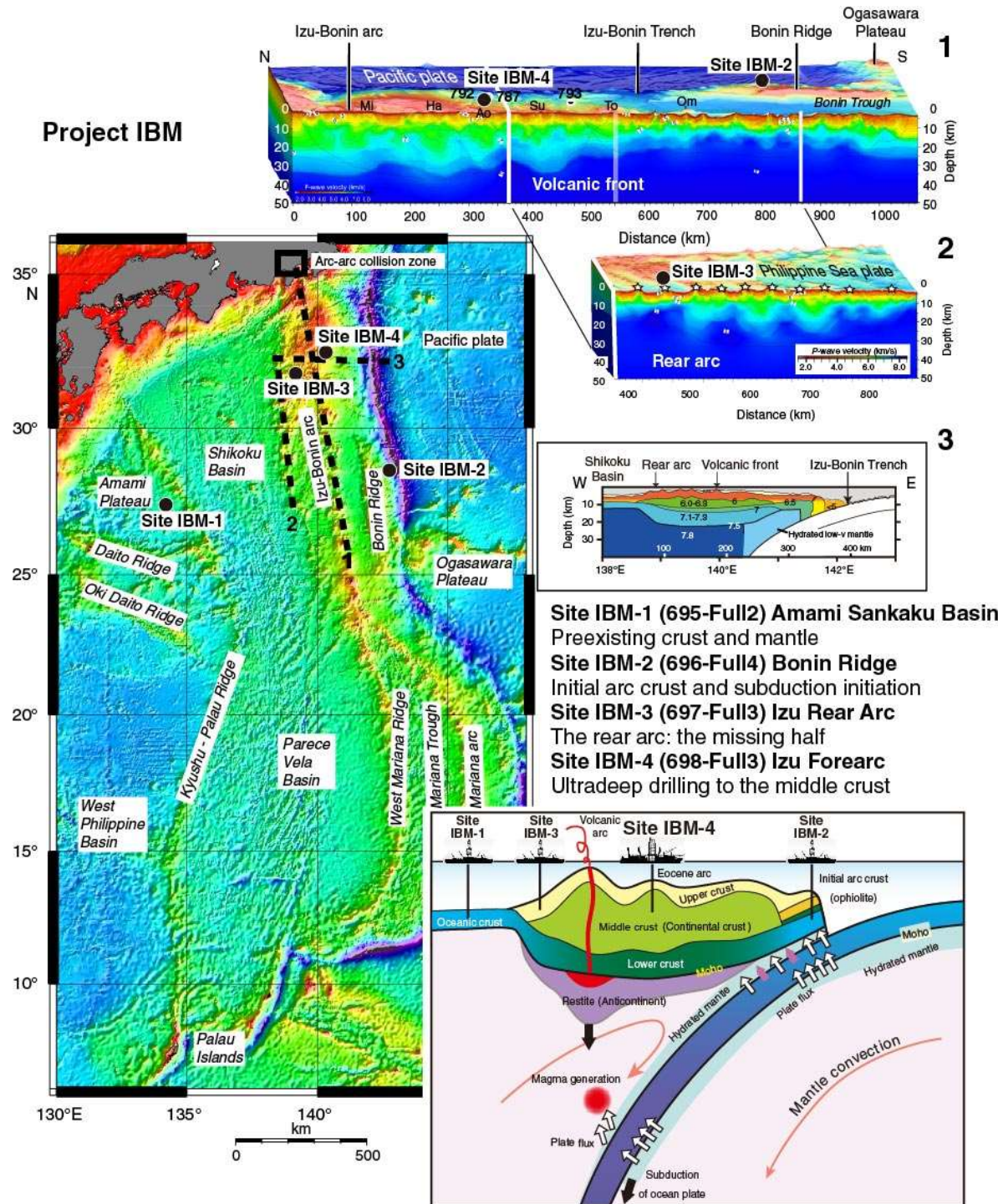
P = 1 atm

Фазовые соотношения при плавлении пироксенов (кривые плавления для 2-х и 3-х фазовых ассоциаций)



P = 1 atm

Project IBM



Site IBM-1 (695-Full2) Amami Sankaku Basin
Preexisting crust and mantle
Site IBM-2 (696-Full4) Bonin Ridge
Initial arc crust and subduction initiation
Site IBM-3 (697-Full3) Izu Rear Arc
The rear arc: the missing half
Site IBM-4 (698-Full3) Izu Forearc
Ultradeep drilling to the middle crust

Базовая модель
эволюции
магматизма
островных дуг
Тихого океана:

от
менее глубинного
бонинитового к
известково-
щелочному!