

Общая тема:

МАГМАТИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ ОКЕАНИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ

Лекция № 16

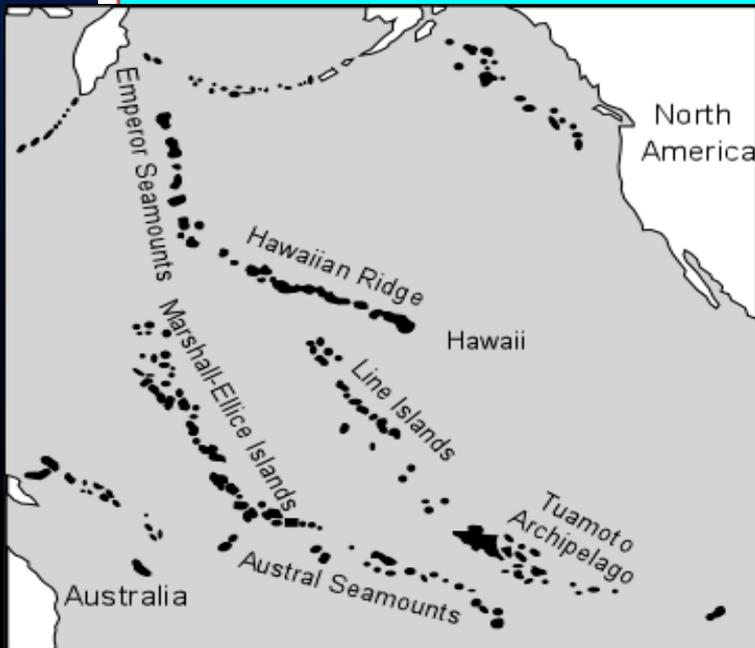
МАГМАТИЗМ ГАВАЙСКИХ ОСТРОВОВ:

***история развития, строение вулканов и
главные типы магматических серий***

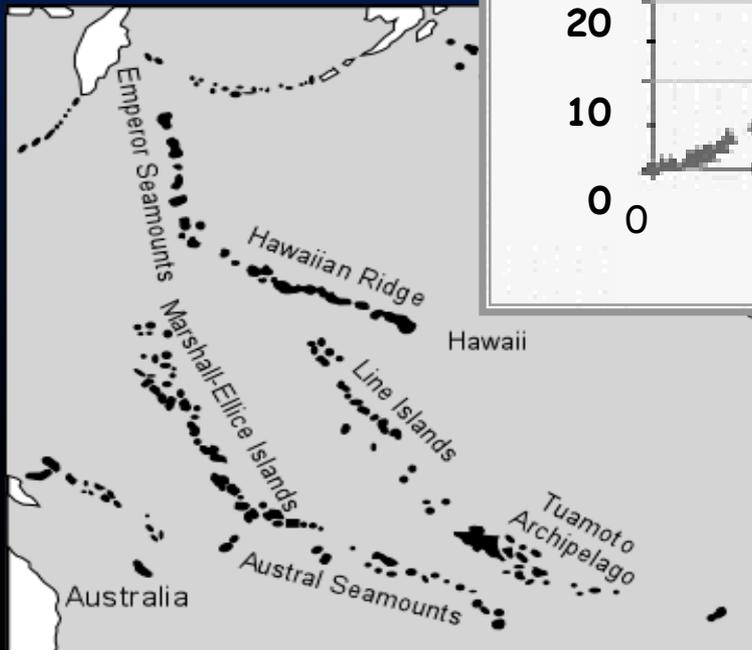
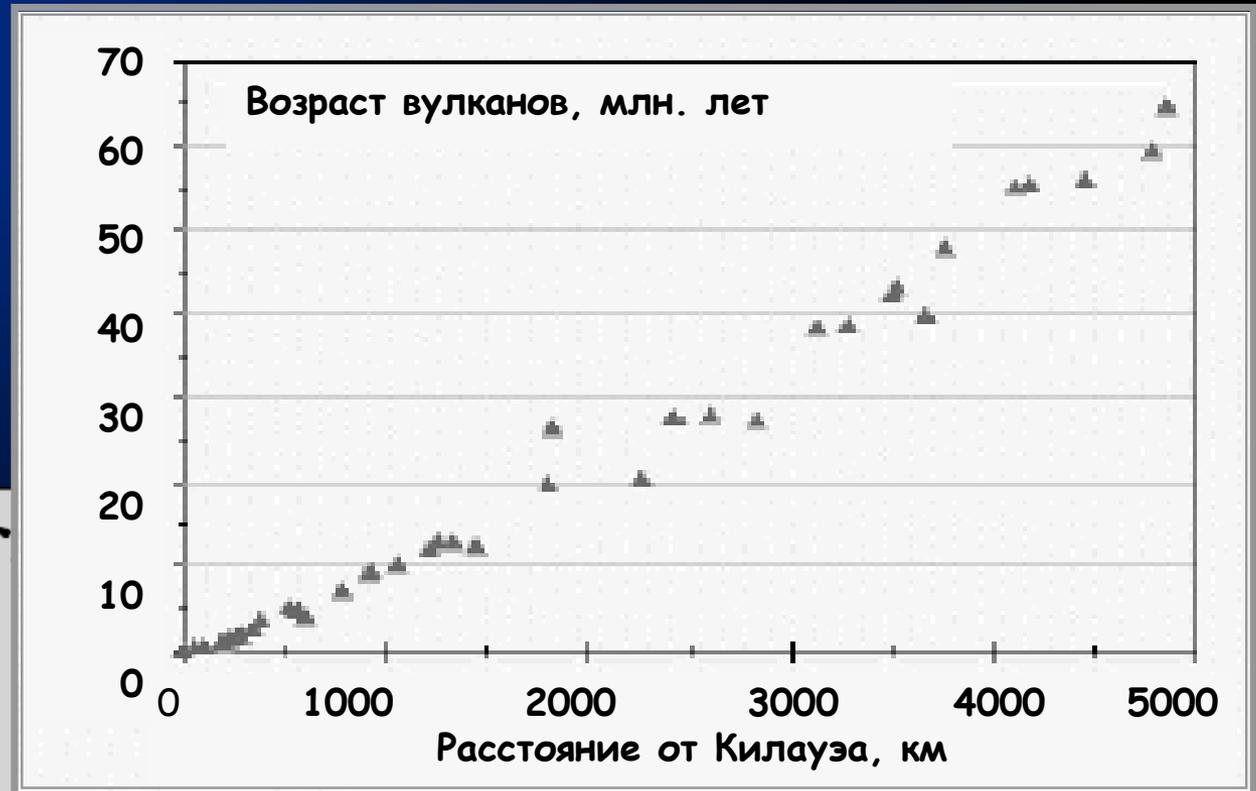


Положение Гавайских островов

ЦЕПЬ ГАВАЙСКИХ ОСТРОВОВ И ГЛАВНЫЕ ВУЛКАНЫ АРХИПЕЛАГА

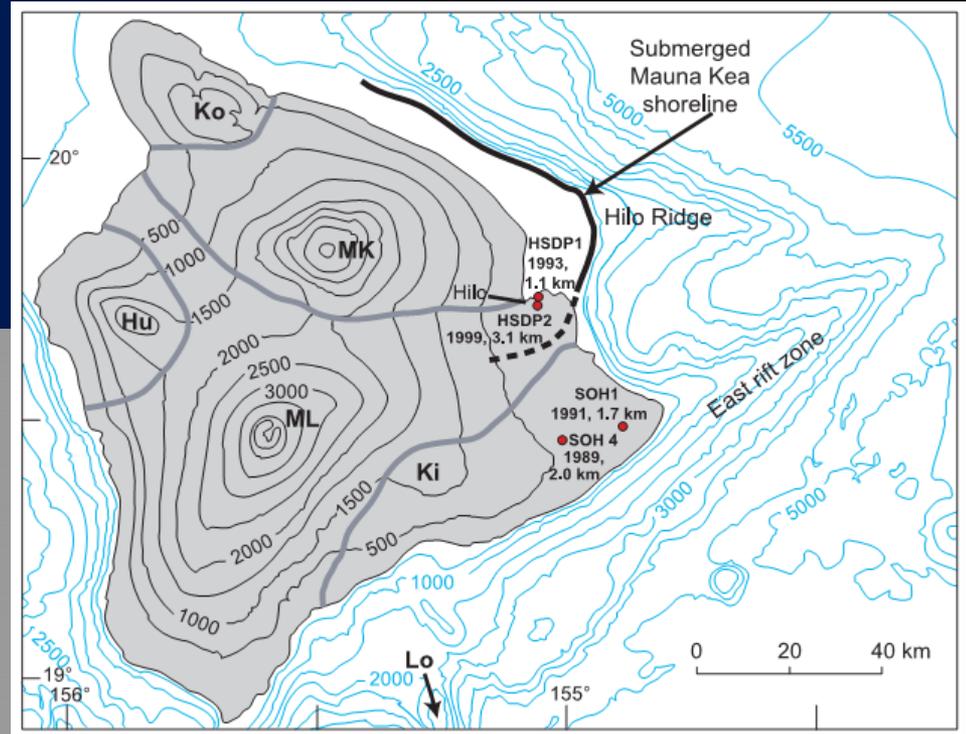
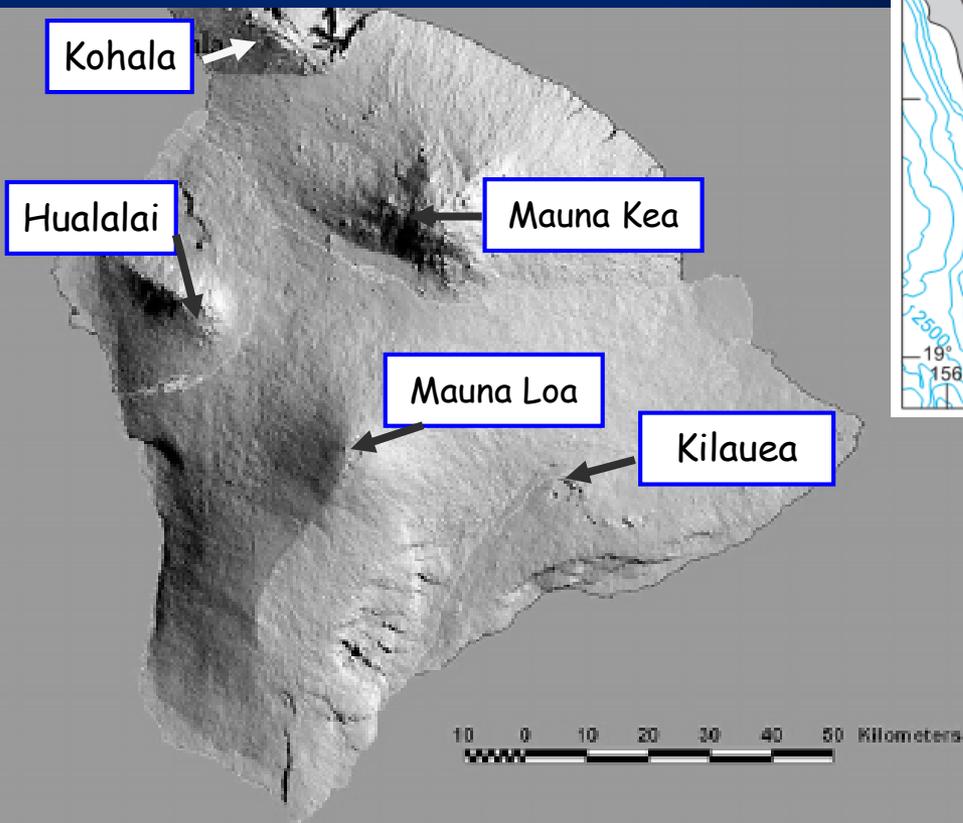


Возраст вулканов Гавайской гряды и Императорских гор



Возрастает с юго-востока на северо-запад

Пять главных вулканов острова Гавайи

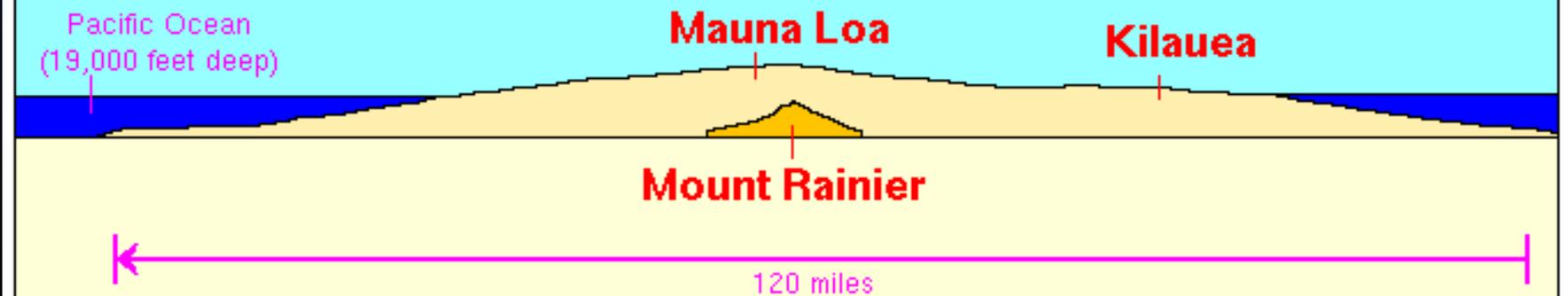


- *Килауэа*
- *Мауна-Лоа*
- *Мауна-Кеа*
- *Кохала*
- *Хуалалай*

Размеры гавайских вулканов

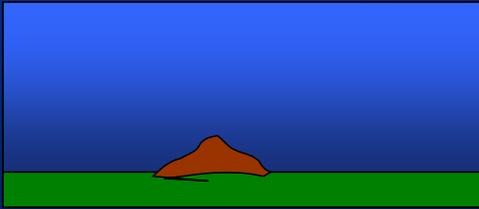


Shield Volcano vs. Composite Volcano



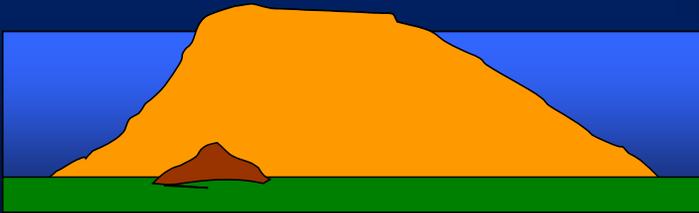
Главные стадии эволюции гавайских вулканов (I и II)

I



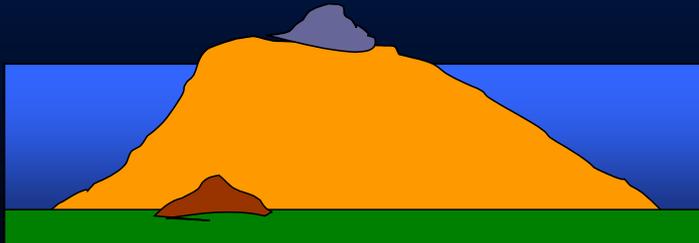
Дощитовая стадия подводных излияний небольших объемов лав щелочных базальтов

II



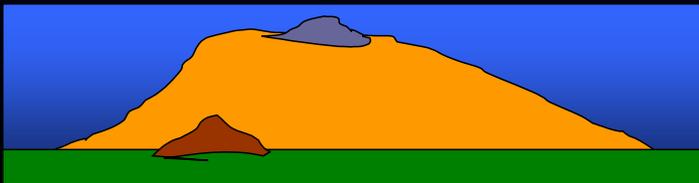
Главная щитовая стадия роста - извержения толеитовых лав

III



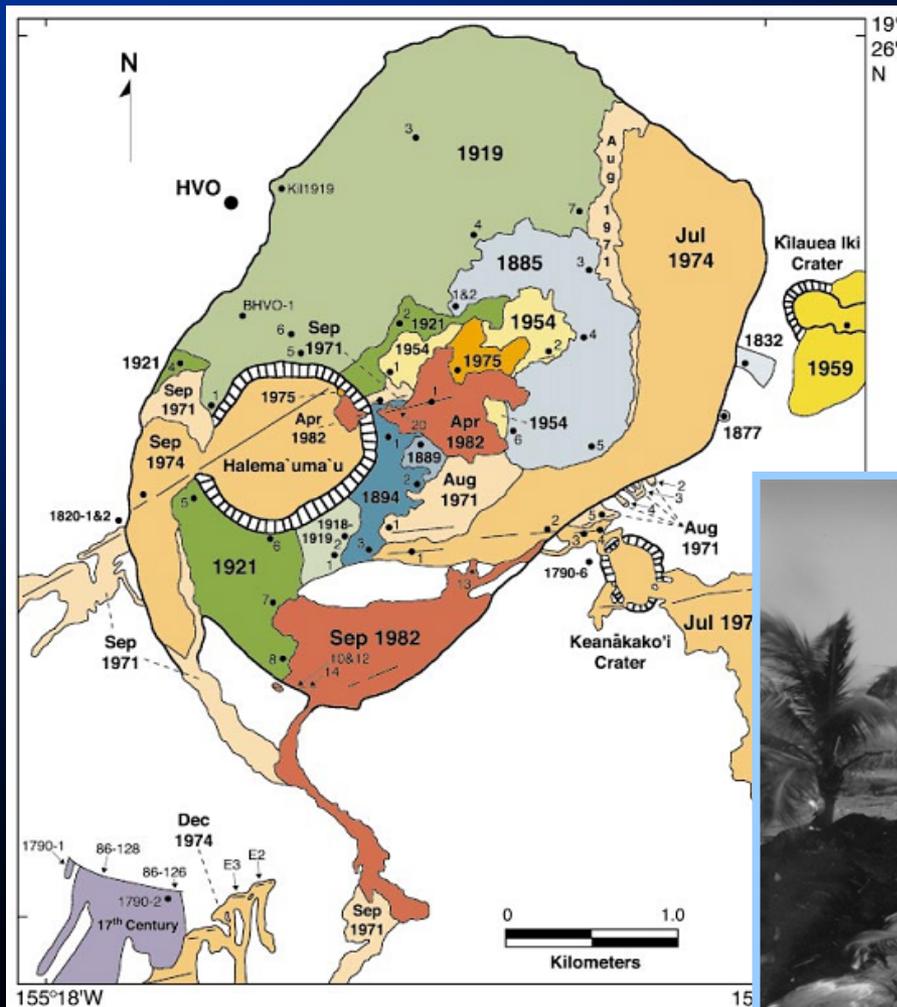
Постщитовая стадия формирования внутрикальдерных потоков и экструзий: Na-субщелочная серия

IV



Постэрозионная стадия: щелочные базальты, базаниты, нефелиниты и тефриты.

Исторические извержения вулкана Килауэа



Garcia et al. (2003)

Толеитовые лавы вулкана Килауэа

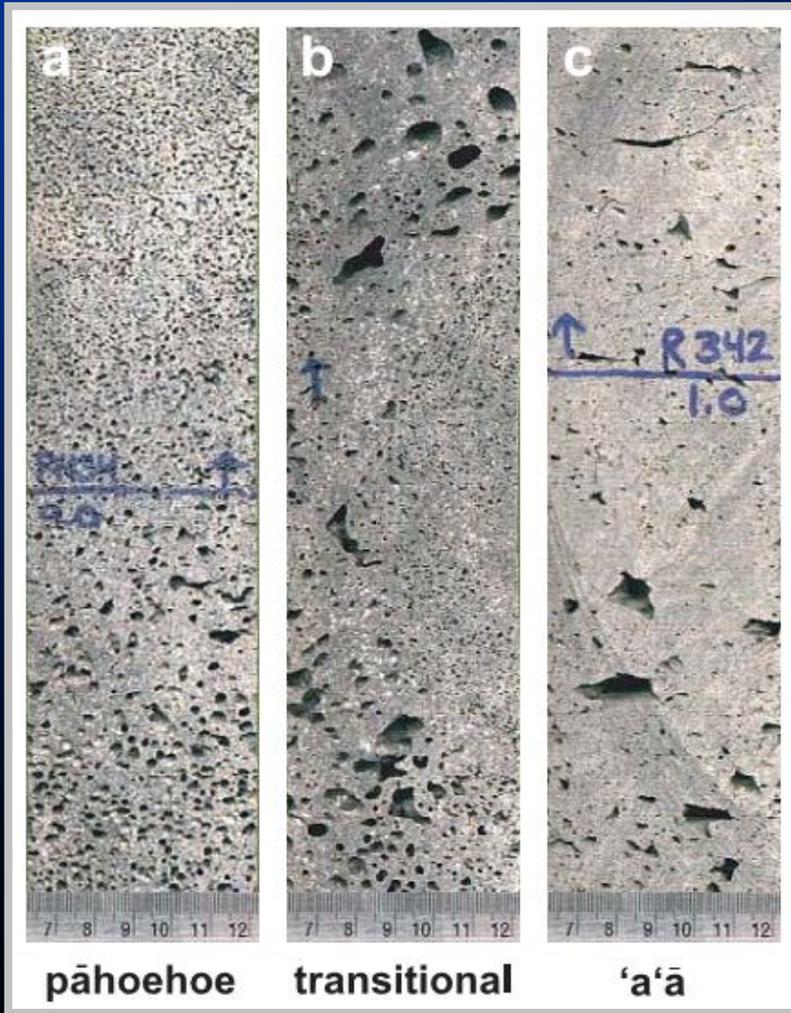


Потоки лав "Раһоеһое" в основании влк. Килауэа



Лавопады на
побережье океана
(30 сентября 2001 года)

Тектурные отличия лав "Pāhoehoe" и "a'a"



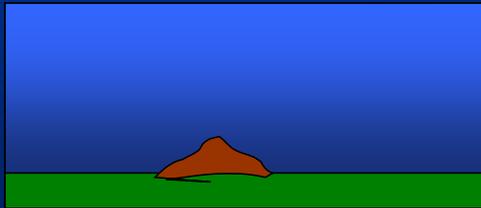
Эти лавы представляют широкое разнообразие форм и распространенности (газовых) пор:

Pāhoehoe – сферические и обильные,
a'a – менее обильные и неправильные по форме



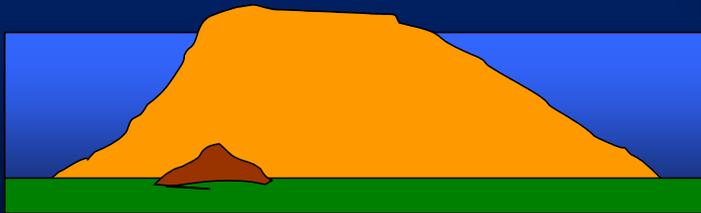
Главные стадии эволюции гавайских вулканов (III и IV)

I



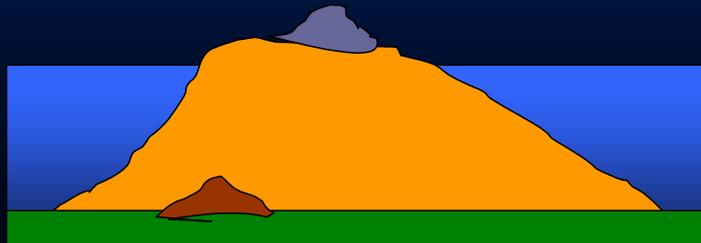
Дощитовая стадия подводных излияний небольших объемов лав щелочных базальтов

II



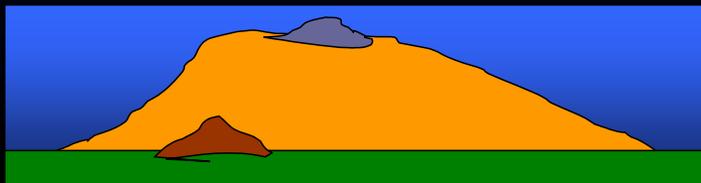
Главная стадия роста - извержения толеитовых лав

III



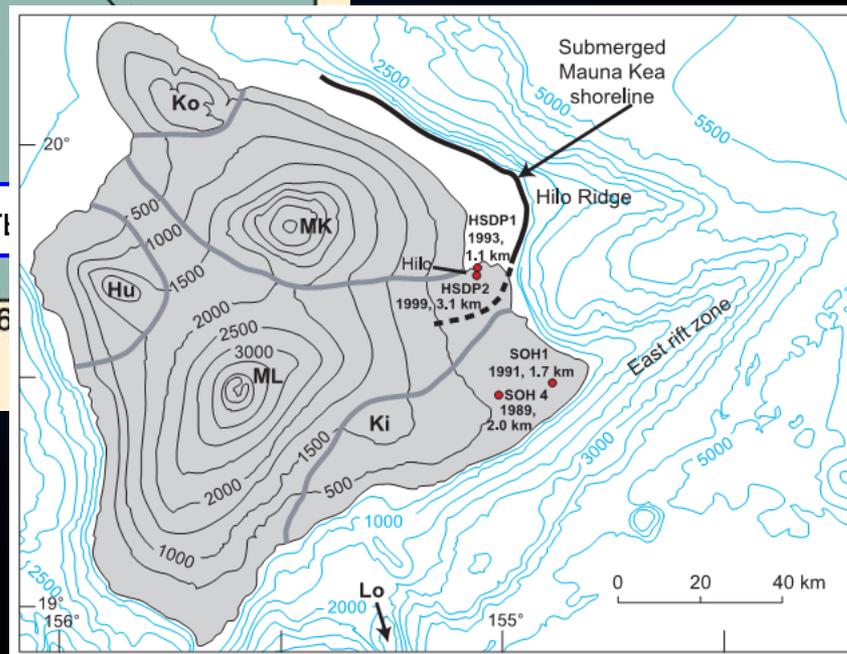
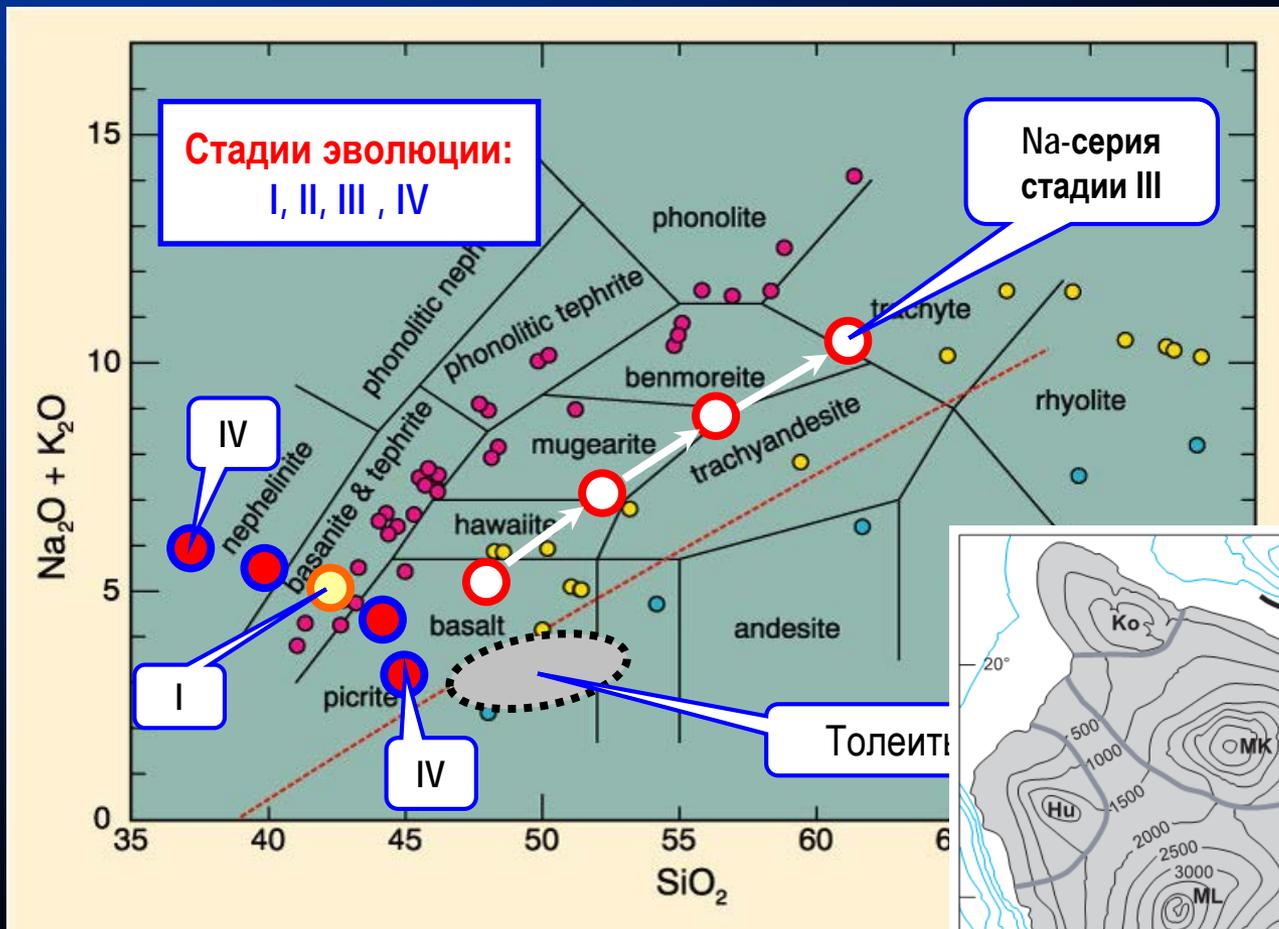
Постщитовая стадия формирования внутрикальдерных потоков и экструзий: Na-субщелочная серия

IV



Постэрозионная стадия: щелочные базальты, базаниты, нефелиниты и тефриты.

Главные типы гавайских магматических серий



*Генетическое значение
подводного вулкана Лоухи*

Стратиграфия гавайских вулканов

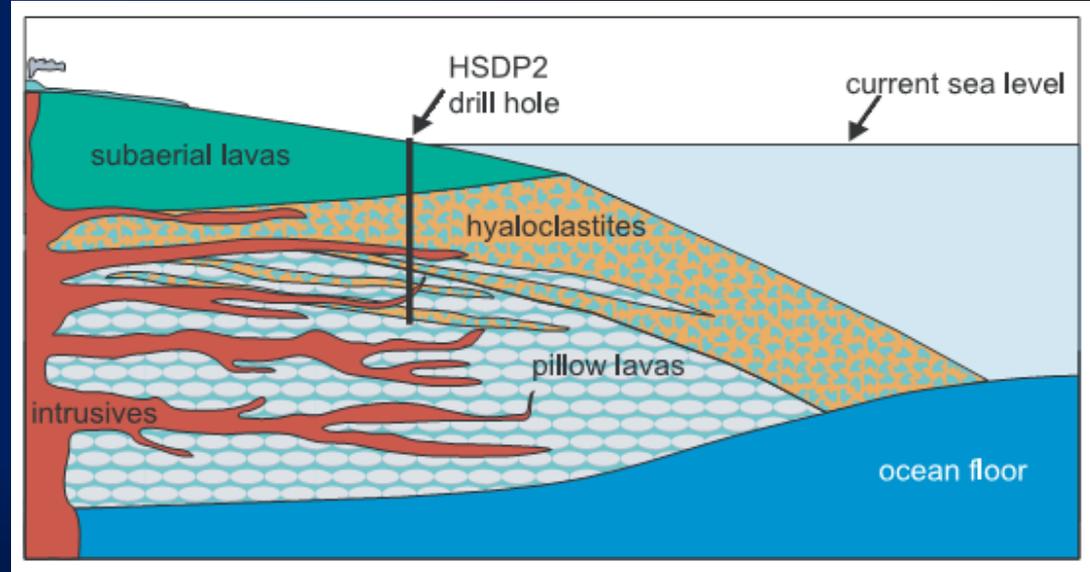
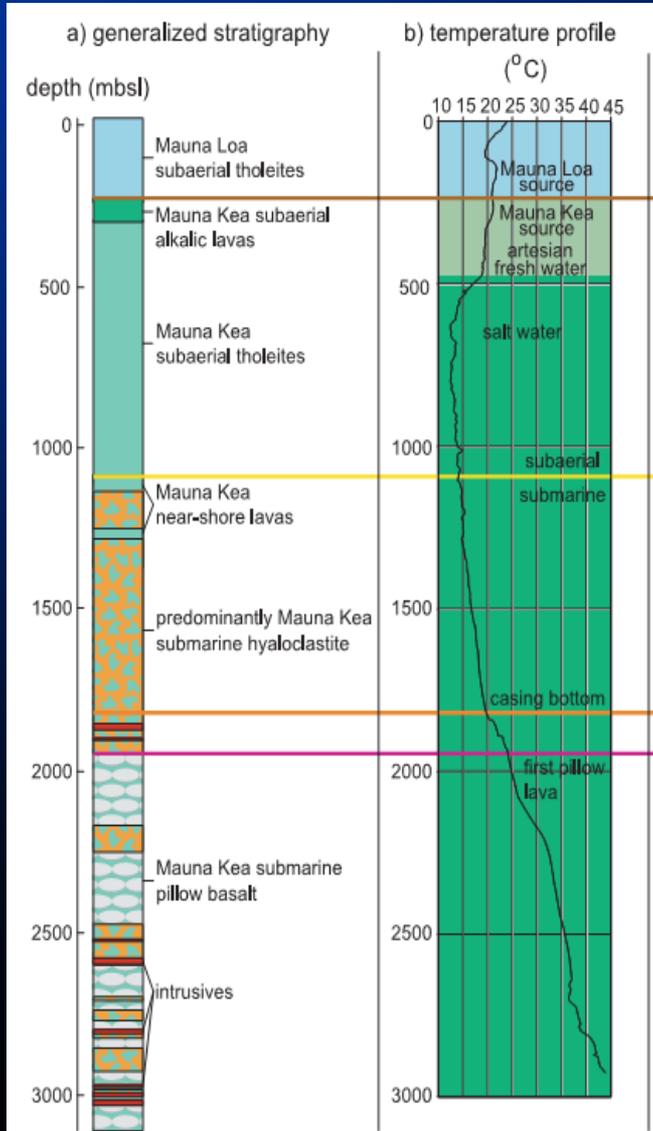
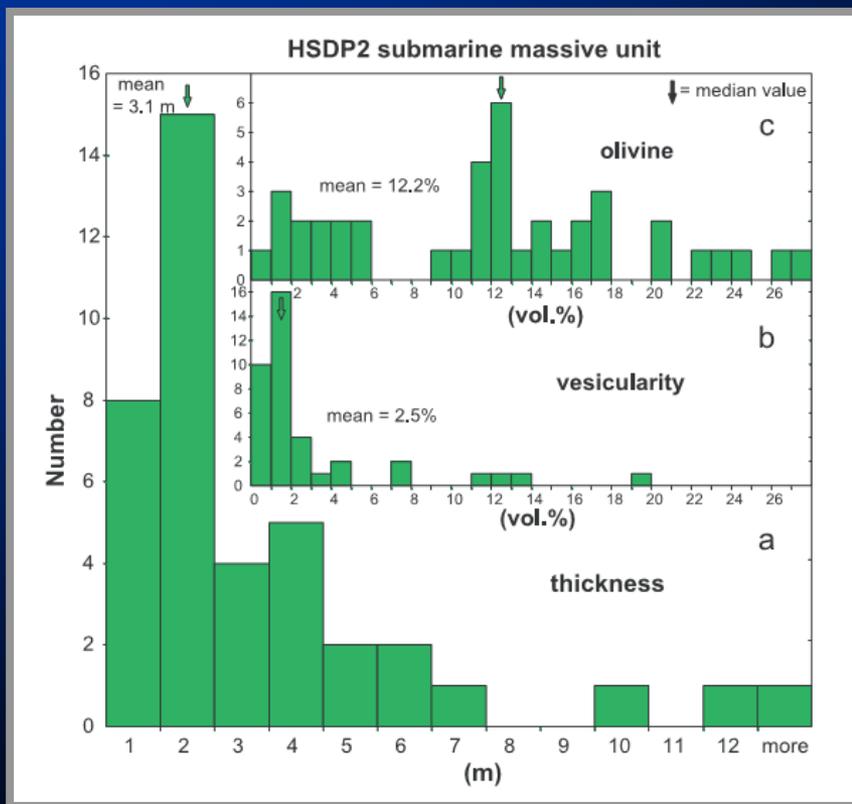


Схема внутреннего строения влк. Мауна Кеа к моменту окончания субаэральной щитовой стадии
(Garcia et al., 2007)

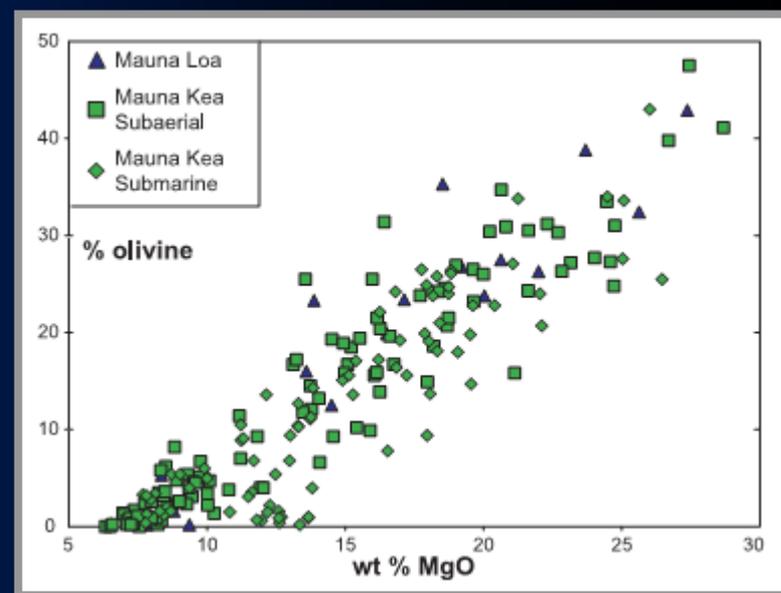
Сводный разрез по результатам бурения



Высокие содержания кристаллов ОI и MgO в базальтах



Гистограммы параметров подводных лав, включая количество вкрапленников оливина



Зависимость концентрации MgO от содержания вкрапленников ОI в базальтах – эффект аккумуляции

оливина

Figure 17. Plot of modal olivine abundance (from thin sections) versus whole-rock MgO content in HSDP2 lavas. The good correlation between these two parameters and the high content of olivine in many of these lavas indicate that many HSDP2 lavas have accumulated substantial olivine. Data are from Table 3 and Rhodes and Vollinger [2004].

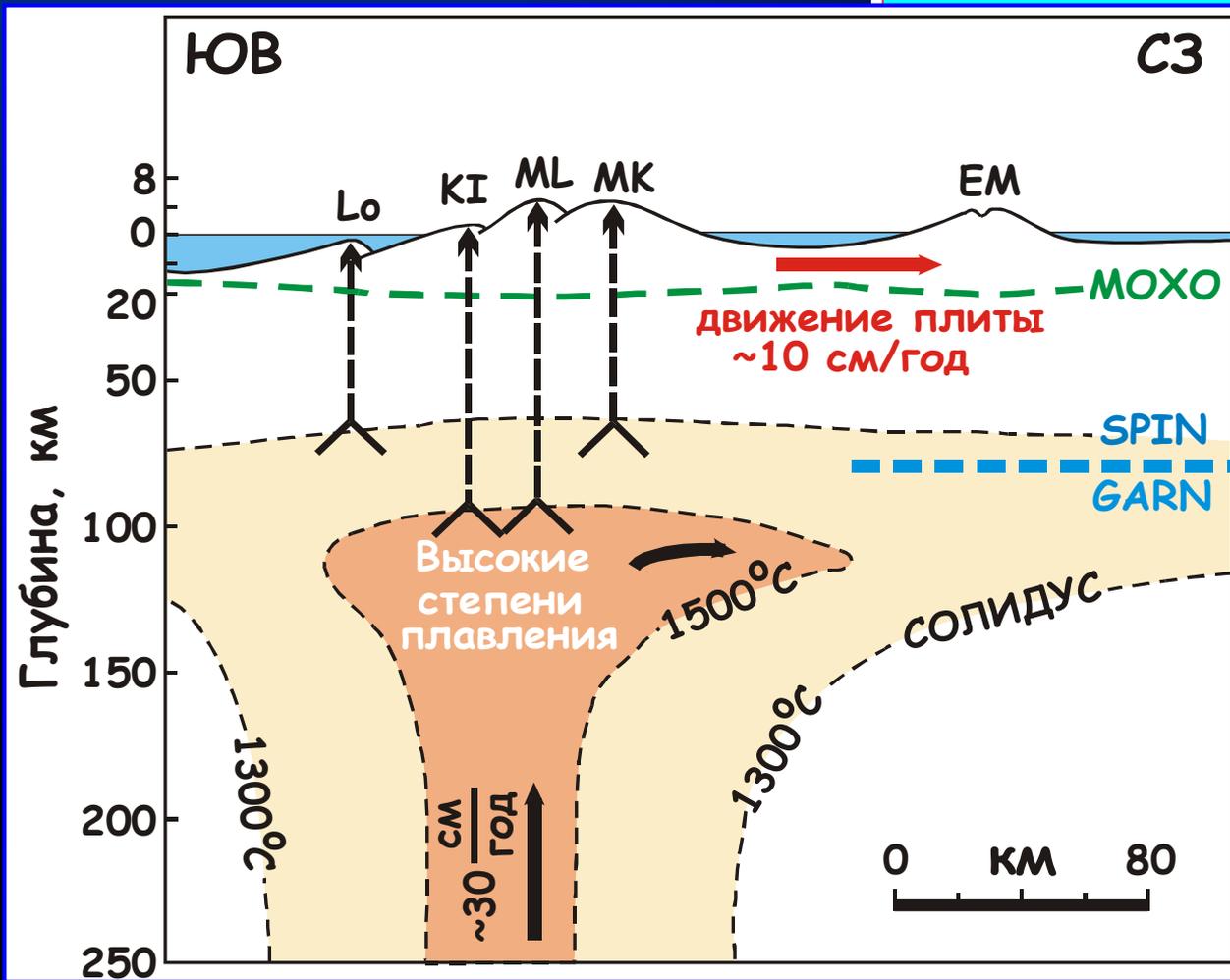
Figure 15. Histograms of variations in HSDP2 submarine massive units: (a) thickness, (b) vesicularity (vol.%), and (c) olivine content (vol.%). Median values are indicated by the downward pointing arrows. Bins start at left with 0 to 1 m thickness. These units are generally thinner, less vesicular, and more olivine-rich than adjacent hyaloclastite units. These characteristics are consistent with submarine massive flows erupting subaerially and entering the ocean nonexplosively via lava tubes [e.g., Garcia and Davis, 2001; Seaman et al., 2004]. Data are from Table 1 and Table S1.

Лекция № 16

МАГМАТИЗМ ГАВАЙСКИХ ОСТРОВОВ:

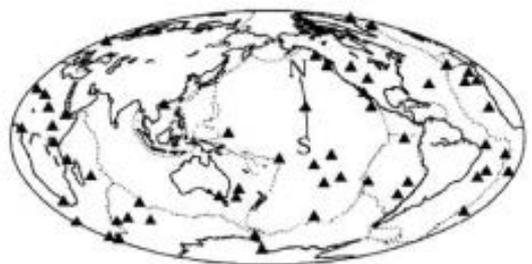
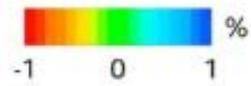
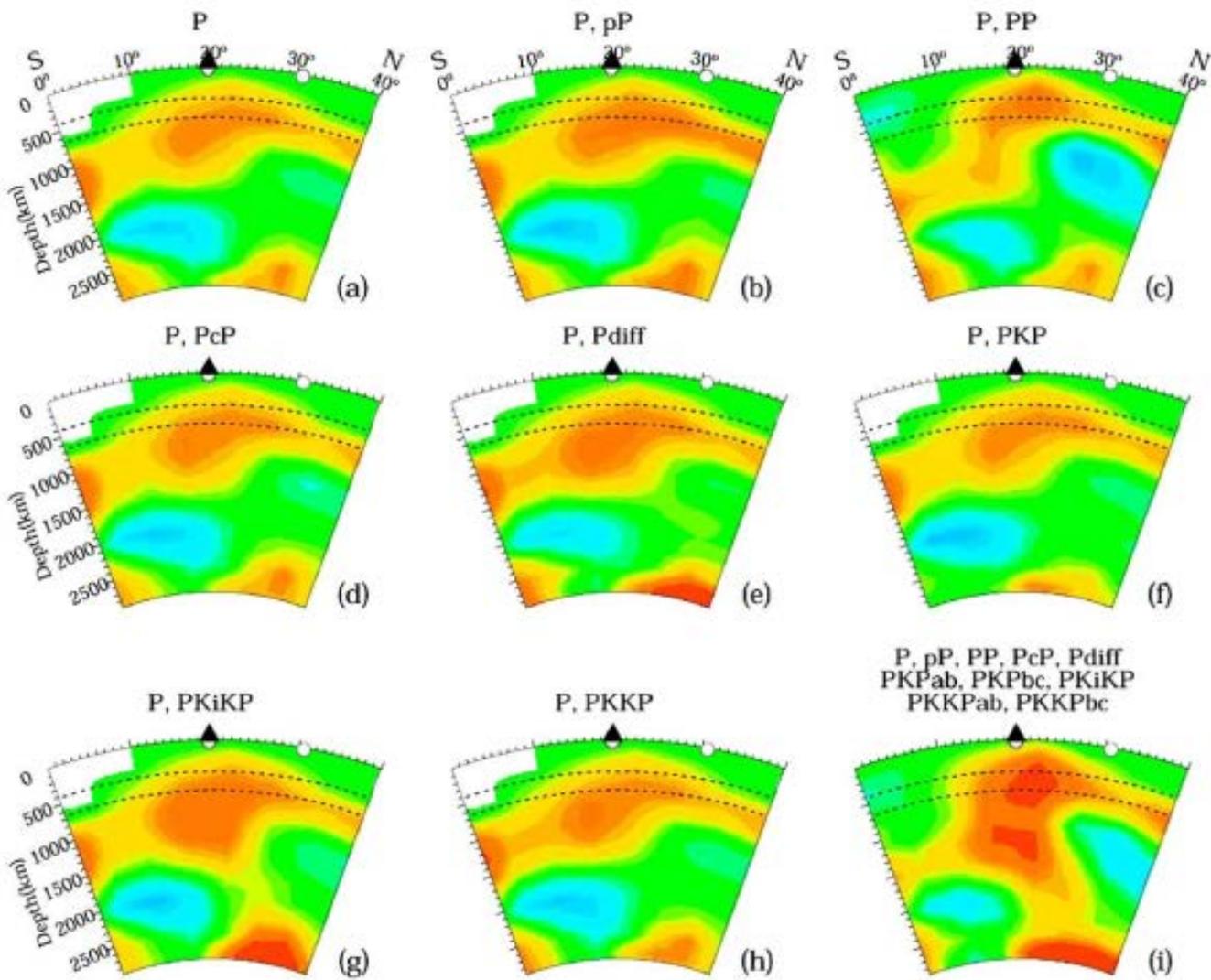
***Происхождение источника и эволюция
исходных магм***

Схема зонального строения Гавайского плюма

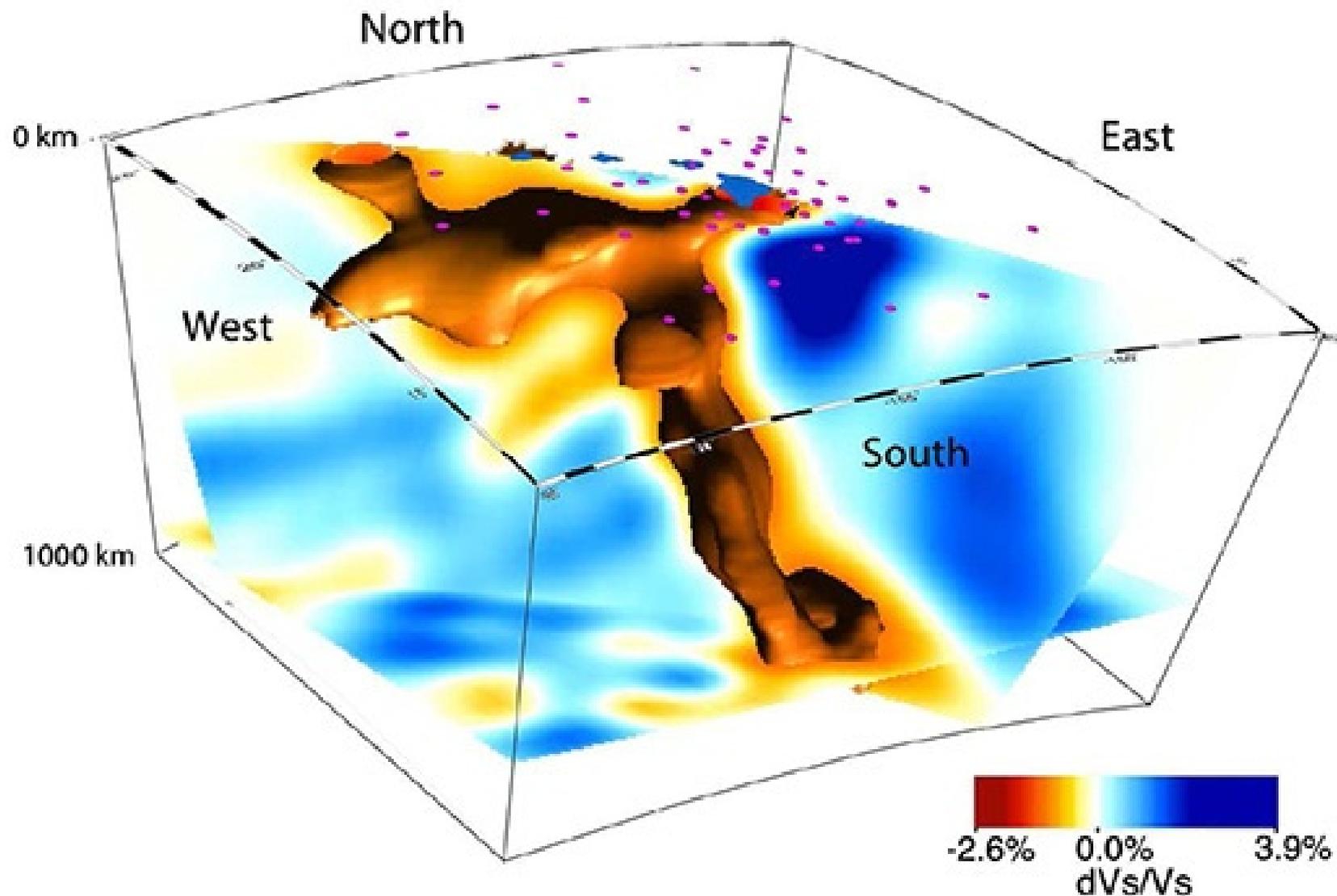


Watson and McKenzie (1991)

Сейсмическая томография Гавайского плюма



3D Model of Mantle Plume Beneath Hawai'i



(Cheng, C., Allen, R. M., Porritt, R. W., and Ballmer, M. D. (2015), Seismic Constraints on a Double-Layered Asymmetric Whole-mantle Plume Beneath Hawai'i, in *Hawaiian Volcanoes: From Source to Surface*, AGU Geophysical Monograph 208, John Wiley & Sons, Inc. p. 19-34.)

Представительные составы базальтов влк. Килауэа

Оксиды	Среднее	Подводная часть вулкана			Извержения 1959-60 гг.
		2	3	4	
SiO₂	49.36	49.40	49.44	50.32	49.20
TiO₂	2.50	2.16	2.47	2.65	2.57
Al₂O₃	13.94	11.69	12.98	13.61	12.77
FeO	11.23	11.19	11.23	11.25	11.39
MnO	0.16	0.17	0.18	0.18	0.17
MgO	8.44	12.96	9.79	7.59	10.00
CaO	10.30	8.95	10.17	10.79	10.75
Na₂O	2.13	2.06	2.24	2.34	2.12
K₂O	0.38	0.40	0.47	0.49	0.51
P₂O₅	0.26	0.23	0.24	0.25	0.25
Mg#	0.578	0.674	0.608	0.546	0.610
Fo, мол. %	82.1	88.0	84.3	80.2	84.5

Аккумуляция или фракционирование оливина ?

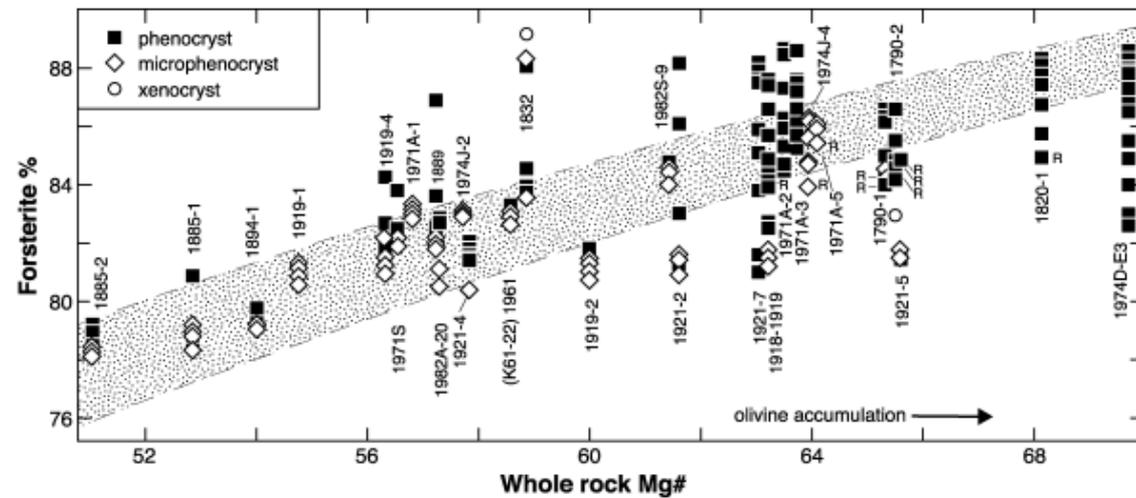
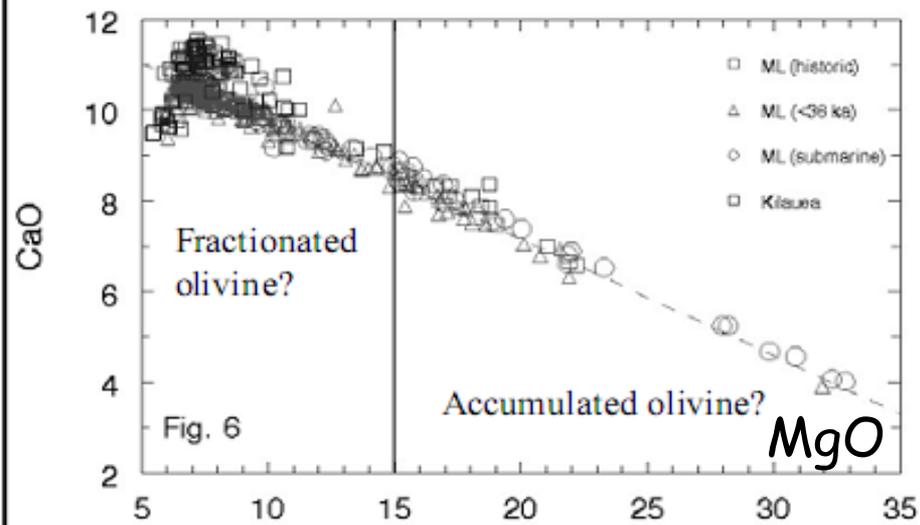
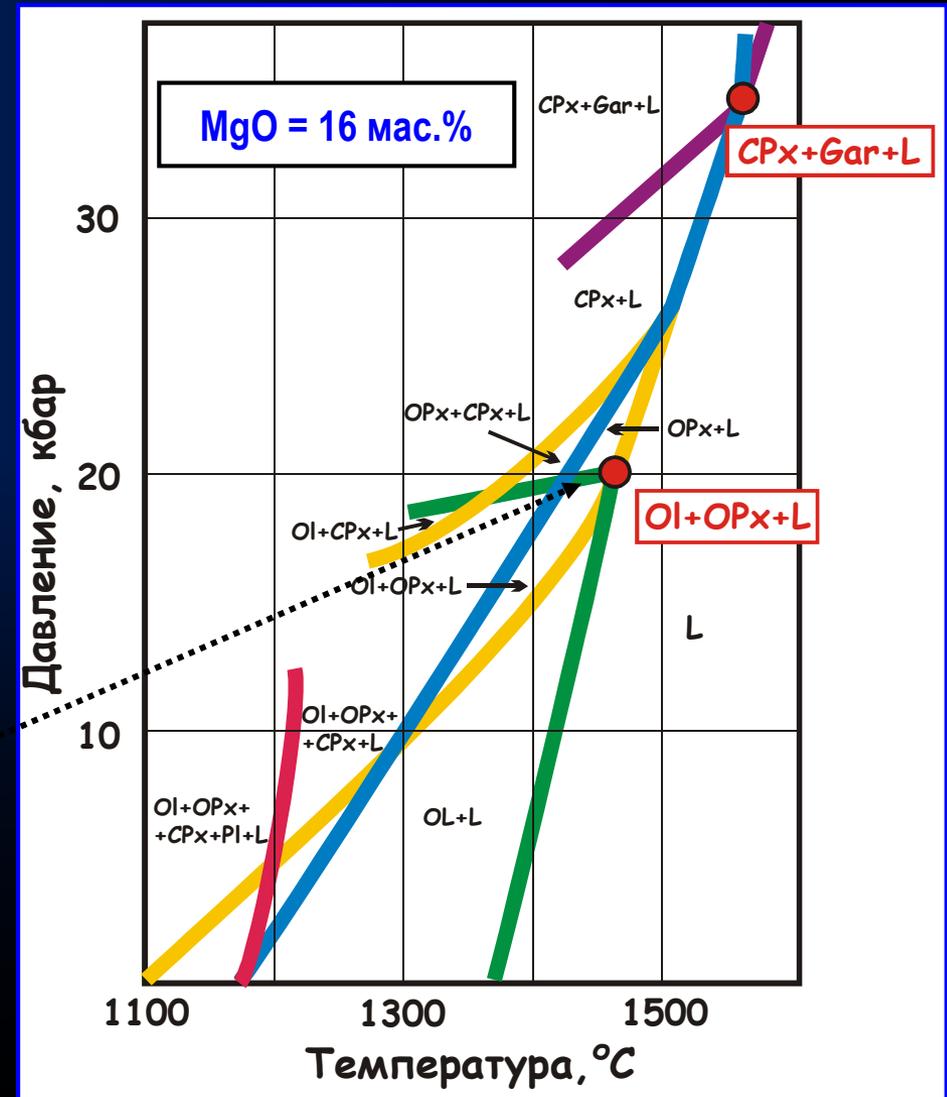


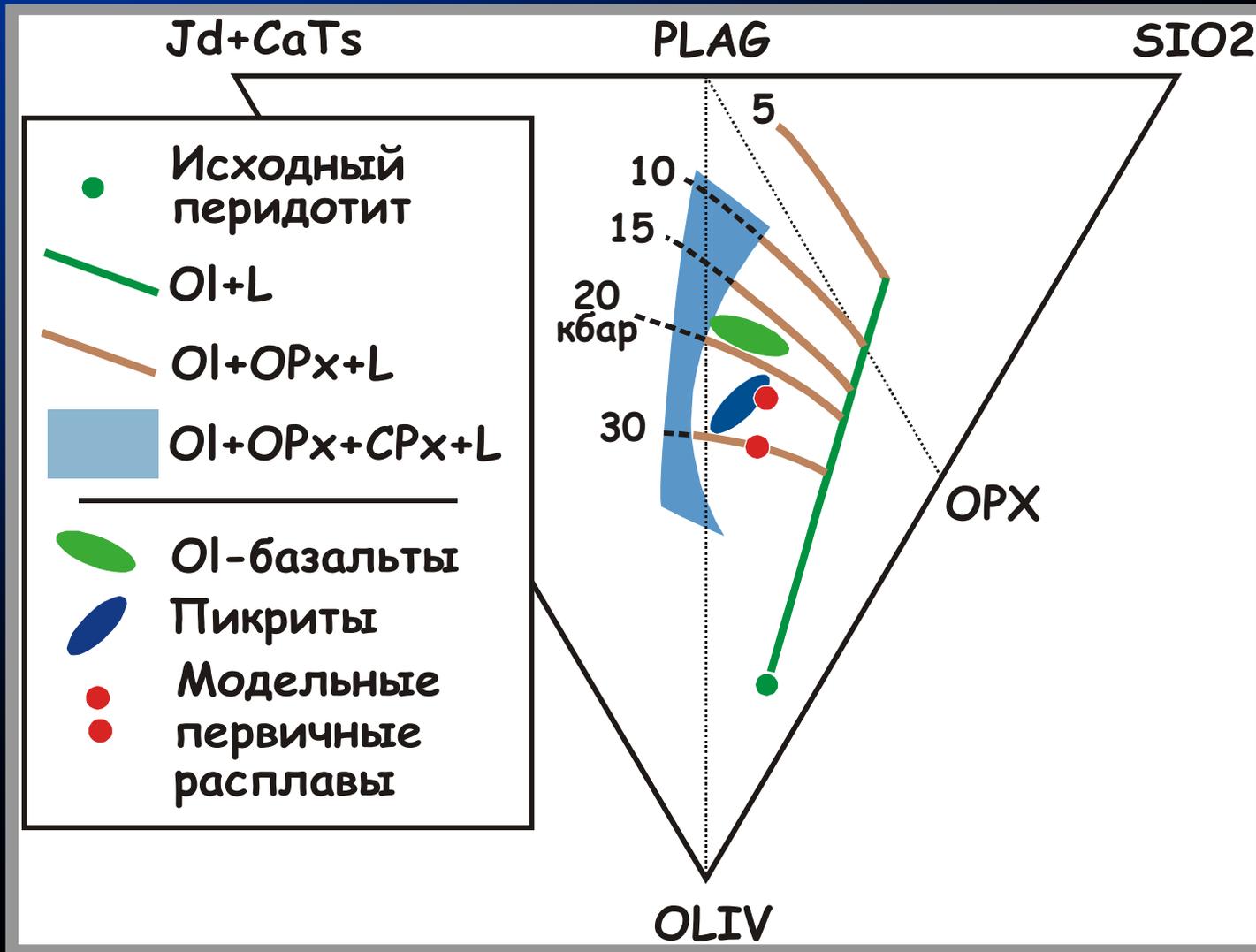
Fig. 3. Olivine core composition (forsterite %) compared with whole-rock Mg number $\{[(\text{Mg}/\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}) \times 100], \text{ with the } \text{Fe}^{2+} \text{ set to } 90\% \text{ of the total iron}\}$ in representative Kīlauea historical summit lavas. Xenocrysts are deformed or resorbed crystals. The broad stippled band shows the range of equilibrium olivine compositions for a given Mg number based on Roeder & Emslie (1970) and Rhodes *et al.* (1979). Rocks with olivines that plot below this band have probably accumulated olivine that grew in more differentiated magma. Rocks with olivines that plot above the band may reflect 'delayed' olivine fractionation (e.g. Maaloe *et al.*, 1988). All crystals are normally zoned or unzoned except those labeled with an 'R', which are reversely zoned. The 2σ errors are smaller than the symbol size. Representative analyses given in Table 3.

Фазовые отношения для пикритовой магмы (16 мас.% MgO)

Наличие точки совместного насыщения *OI* и *OpX*, позволило предположить, что первичные расплавы гавайских оливиновых толеитов могли быть равновесны с гарцбургитовым реститом. В соответствии с фазовой диаграммой это равновесие фиксируется при давлении около **20 кбар** и температуре **1450°C**

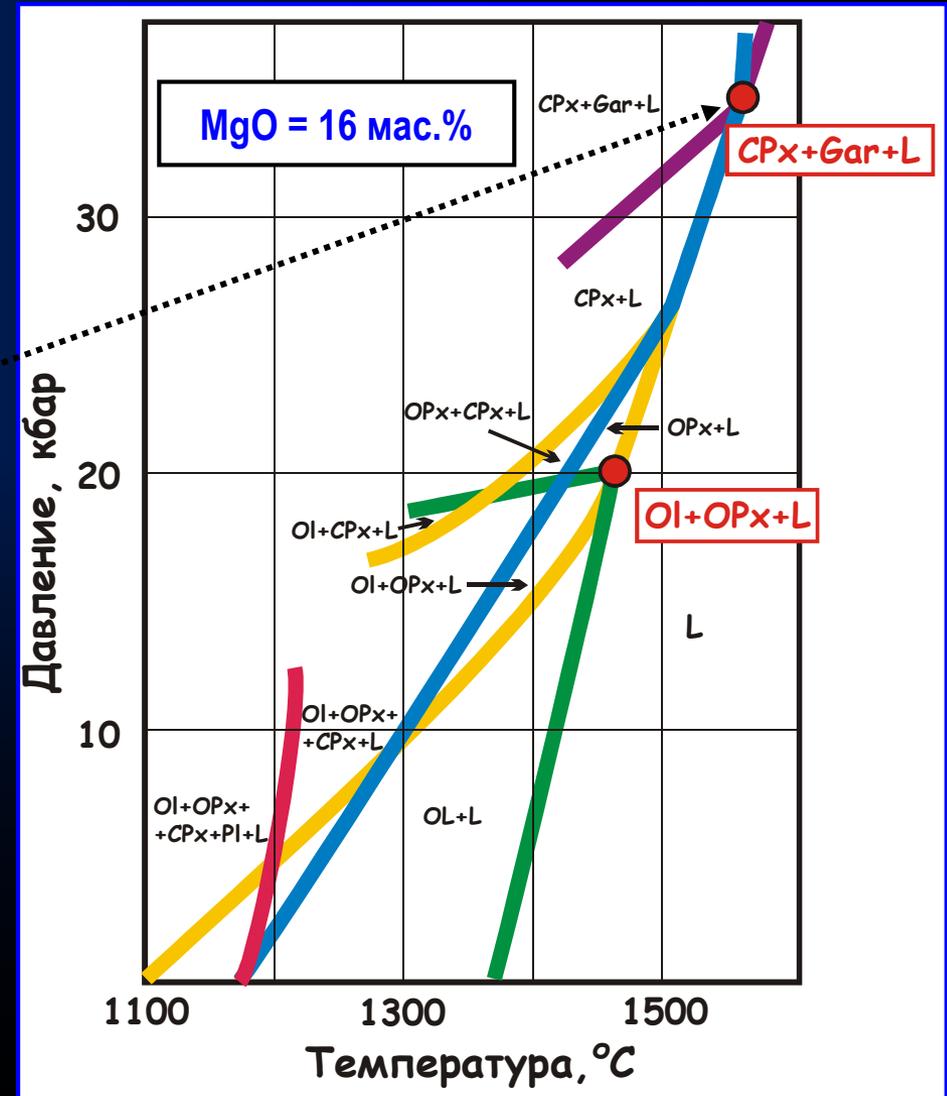


Гарцбургитовая природа первичных гавайских магм

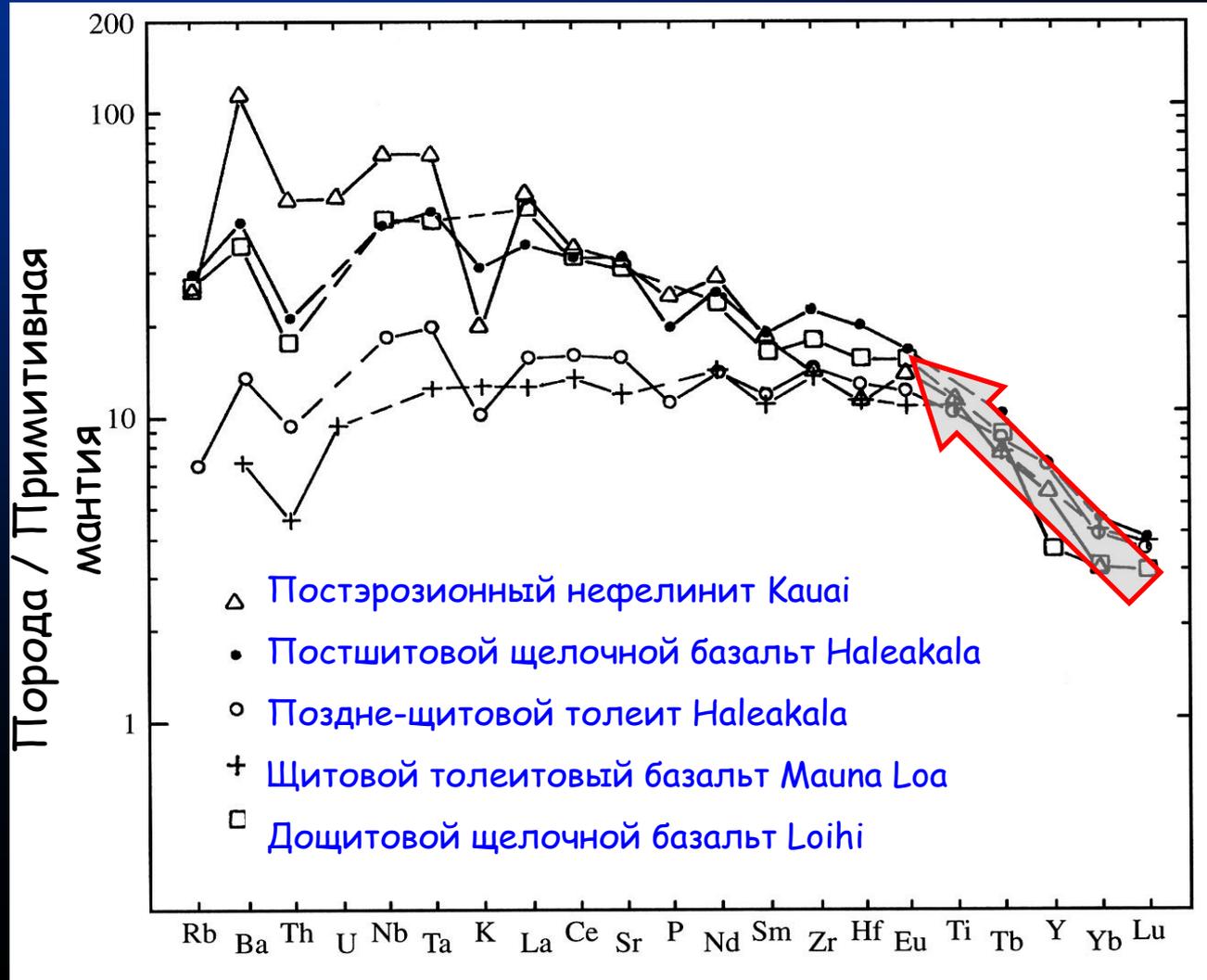


Фазовые отношения для пикритовой магмы (16 мас.% MgO)

Гранат появляется на ликвидусе при давлениях около 35 кбар
и при этом находится в равновесии не только с расплавом, но также с **Crx**



Особенности микроэлементного состава толеитовых, субщелочных и щелочных базальтов Гавайских о-вов



Геохимическая метка граната – резкое обеднение тяжелыми РЗЭ и Y

Противоречия в оценках условий зарождения первичных гавайских магм

- Распределение редкоземельных элементов указывает на **присутствие граната**, что отодвигает давление магмогенерации примерно до **35 кбар**, а глубины – до **100 км**. При этом состав первичного первичного состава может смещаться в область еще более высокомагнезиальных расплавов, содержащих около 20 мас.% MgO и равновесных с FeO_{93} .

*И действительно, в 80-х и 90-х годах в гавайских лавах были установлены оливины, содержащие более **91% форстеритового компонента**.*

- Изучение фазовых равновесий по методу обратного экспериментирования с пикрит-базальтами указывает на **отсутствие граната** среди ликвидусных фаз первичной **гарцбургитовой ассоциации**, устойчивой при давлении порядка **20 кбар**.

Гибридный характер источника гавайских магм

Традиционные представления

о магмогенерации под гавайскими вулканами включают, как минимум, две стадии генезиса первичных магм:

- Сначала на глубинах порядка 100 км зарождается небольшое количество расплавов, равновесных с гранатовым перидотитом или гранатовым пироксенитом.

Геохимическая специфика этих расплавов определяется высокими коэффициентами распределения тяжелых РЗЭ между гранатом и жидкостью. Они просачиваются на более высокие уровни, где гранат становится неустойчив.

- Вторая стадия включает процессы взаимодействия этих неравновесных жидкостей с **гарцбургитовой мантией** или смешения с менее магниезиальными продуктами плавления на глубинах около 60 км.

**НОВЫЕ ДАННЫЕ
И
НОВЫЕ МОДЕЛИ**

Химическая структура Гавайского плюма

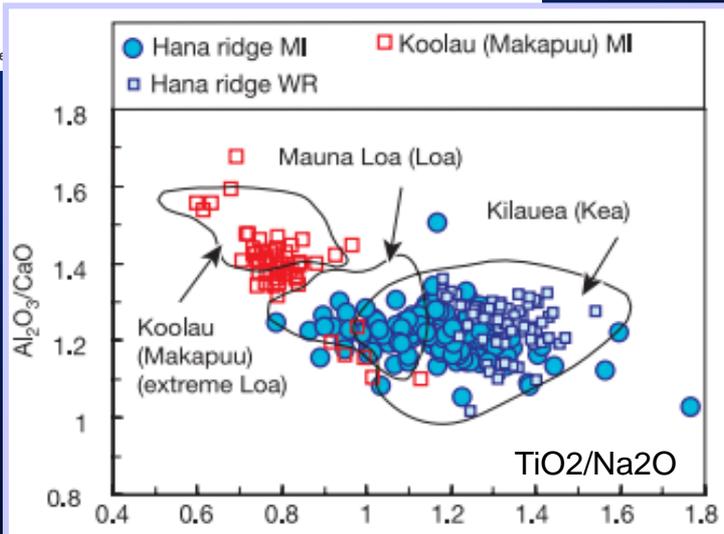
Vol 436 | 11 August 2005 | doi:10.1038/nature03907

nature

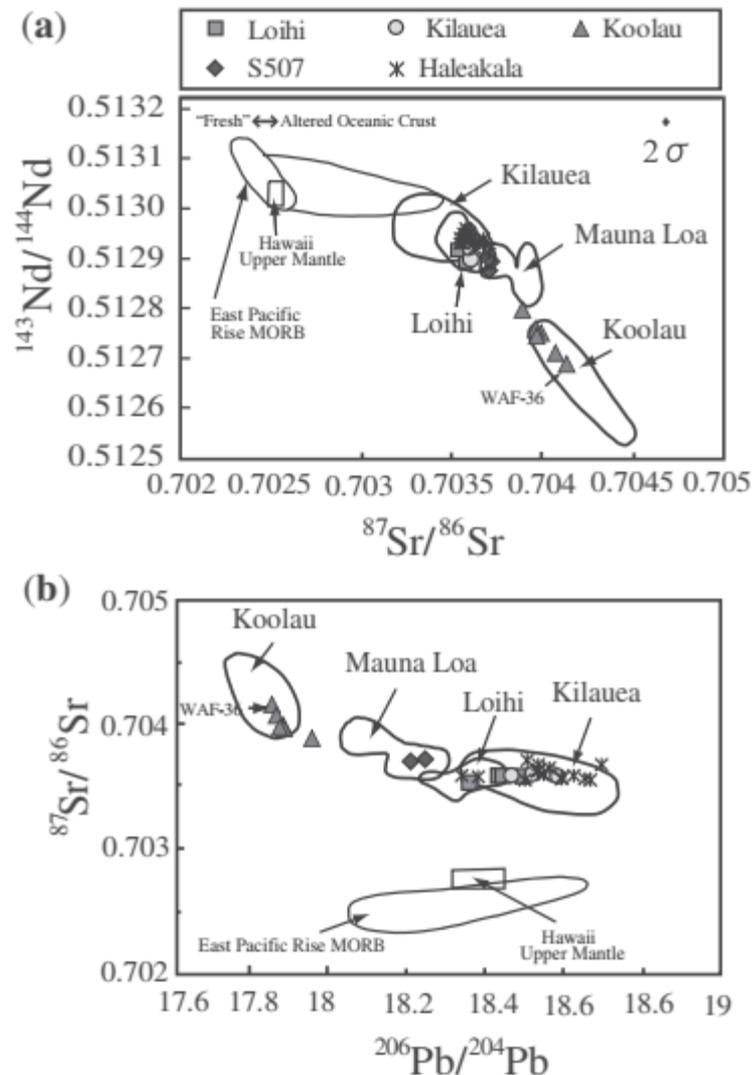
LETTERS

The chemical structure of the Hawaiian mantle plume

Zhong-Yuan Ren¹, Stephanie Ingle

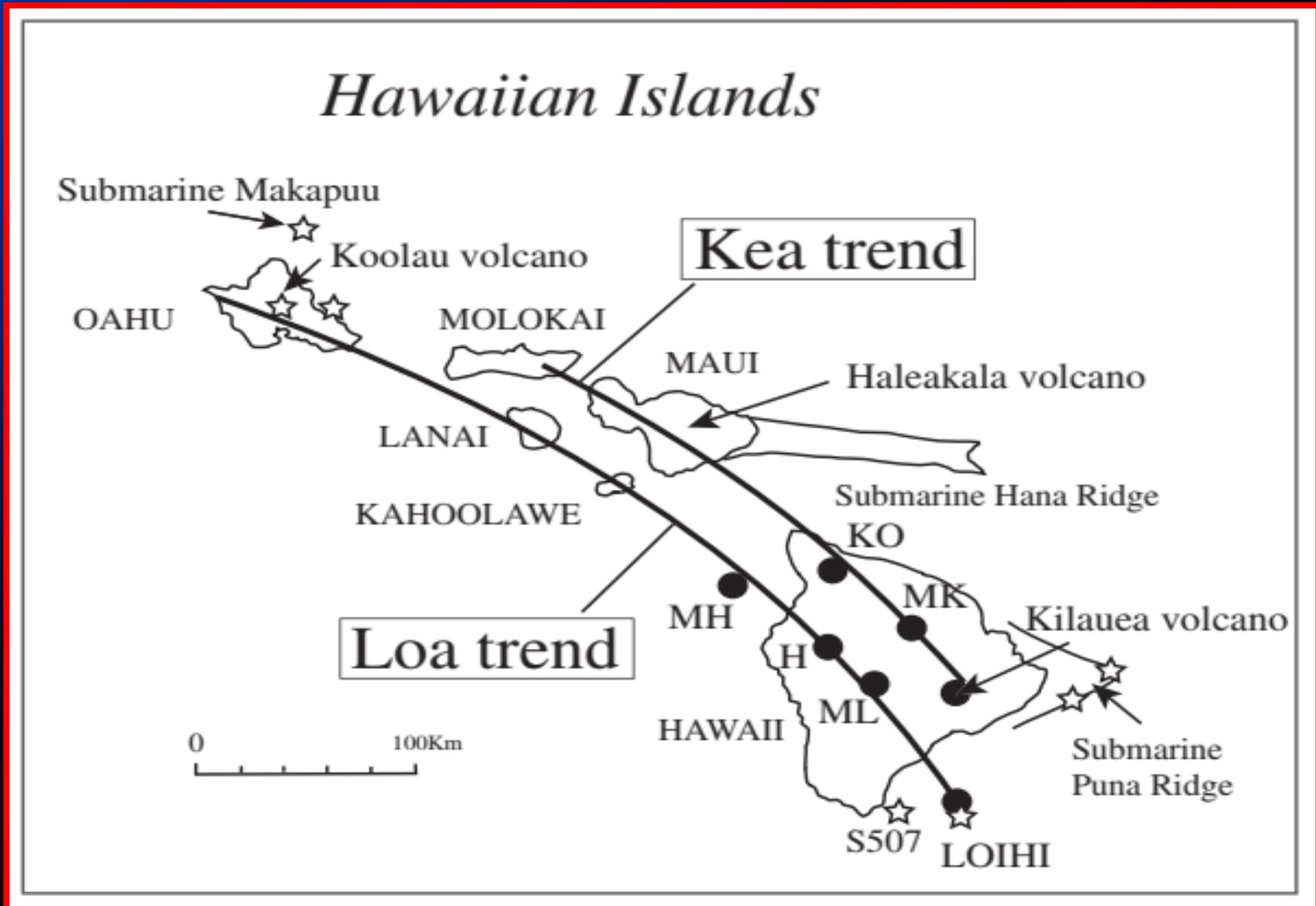


The Hawaiian–Emperor volcanic island and seamount chain is usually attributed to a hot mantle plume, located beneath the Pacific lithosphere, that delivers material sourced from deep in the mantle to the surface^{1–5}. The shield volcanoes of the Hawaiian islands are distributed in two curvilinear, parallel trends (termed ‘Kea’ and ‘Loa’), whose rocks are characterized by general geochemical differences^{2–5}. This has led to the proposition that Hawaiian volcanoes sample compositionally distinct, concentrically zoned, regions of the underlying mantle plume^{4,5}. Melt inclusions, or samples of local magma ‘frozen’ in olivine phenocrysts during crystallization, may record complexities of mantle sources⁶, thereby providing better insight into the chemical structure of plumes. Here we report the discovery of both Kea- and Loa-like major and trace element compositions in olivine-hosted melt inclusions in individual, shield-stage Hawaiian volcanoes—even within single rock samples. We infer from



Ren et al. (JP-2009)

Химическая структура Гавайского плюма

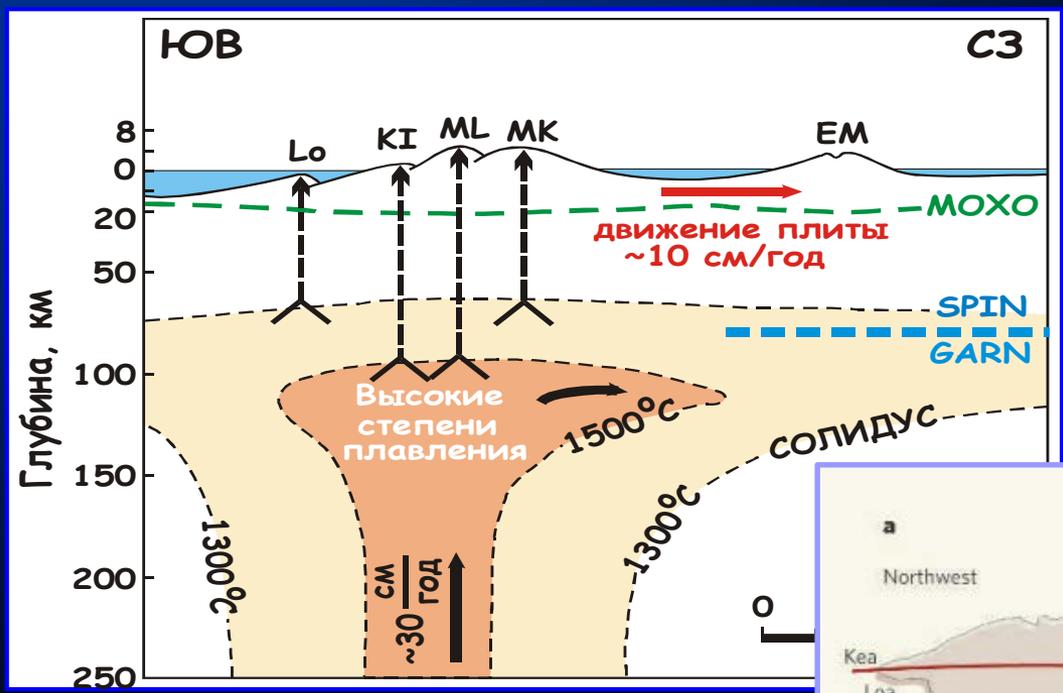


Big lessons from little droplets

Claude Herzberg

Nature 2005

How is it possible that whole-rock samples from an individual volcano support either a Loa or a Kea source, but the inclusions support both sources? Why does the scale of the geochemical observation yield different interpretations? The answers lie in an understanding of how rock melts. The Hawaiian plume melts by forming millimetre-sized liquid droplets that inherit the geochemical properties of their source rock. Each drop of melt usually mixes with other drops during transport to the surface. Although it is not clear exactly where mixing takes place, it is known to homogenize the geochemistry on the centimetre scale of the hand specimen and the kilometre scale of an individual volcano. A rock from Kilauea



Watson and McKenzie (1991)

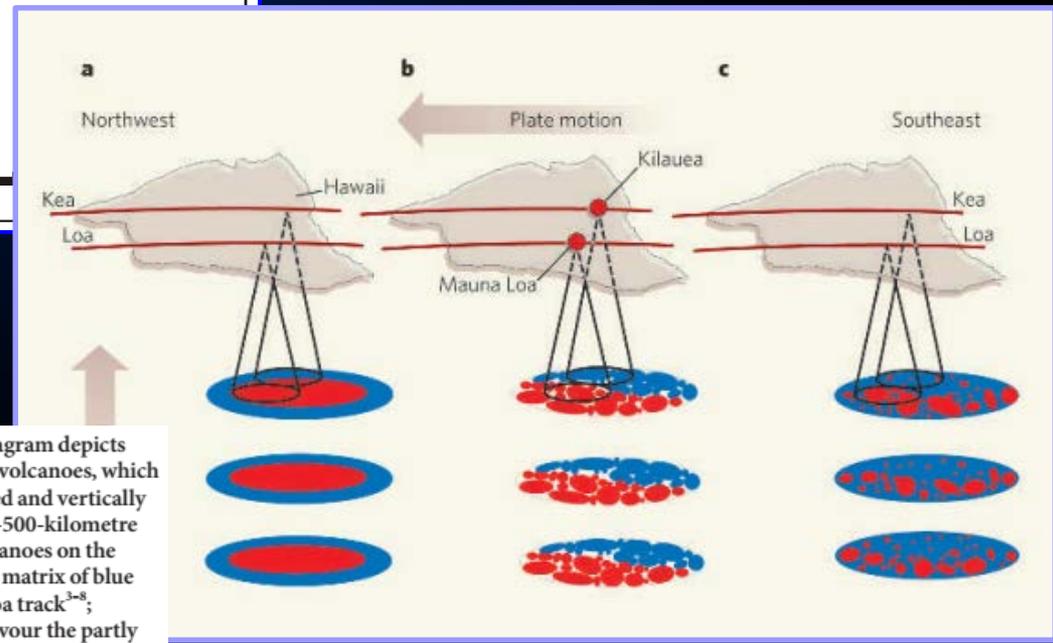
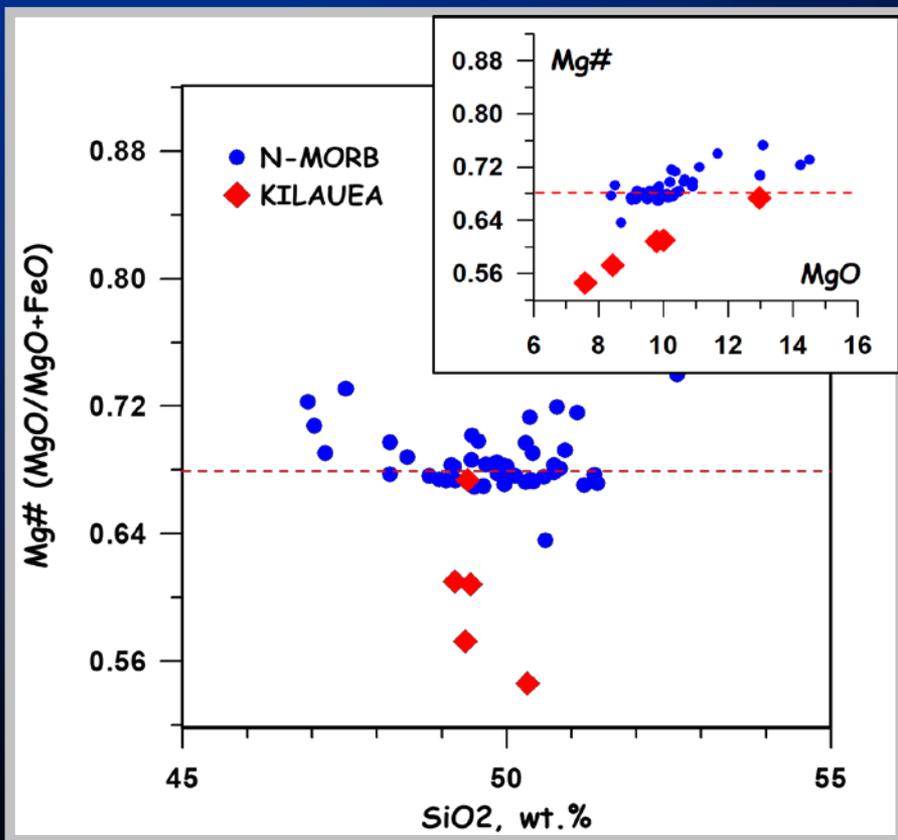


Figure 1 | Models of the geochemical structure of the Hawaiian mantle plume. The diagram depicts three possible plume structures below the two alignments (Kea and Loa) of Hawaiian volcanoes, which are surface expressions of the tectonic plate on which they sit. **a**, A concentric and vertically continuous plume⁶. **b**, A bilateral bundle of filaments vertically continuous on the 50–500-kilometre scale⁷, with undefined spaces between filaments. Mauna Loa and Kilauea are two volcanoes on the Loa and Kea trends, respectively. **c**, A partly ordered structure, with streaks of red in a matrix of blue (modified from ref. 8). Red, average geochemical properties of volcanoes along the Loa track^{3–8}; blue, average geochemical properties of volcanoes along the Kea track^{3–8}. Ren *et al.*¹ favour the partly ordered structure (**c**), which they believe is defined by streaks of pyroxenite (red, pyroxene-rich rocks) in a heterogeneous peridotite matrix (blue, olivine-rich rocks).

Herzberg (2005)

Отличия состава примитивных стекол N-MORB и базальтов Килауэа



Различия магнезиальности базальтов N-MORB и гавайских толеитов

При общей тенденции накопления FeO и TiO₂ в остаточных расплавах для гавайских толеитов характерны следующие особенности:

- Во-первых**, продолжительное выделение избыточного оливина приводит в сильно сокращенное (редуцированное) поле кристаллизации *Ol-Pl* котектики.
- Во-вторых**, в основной массе гавайских толеитов распространен *Orx*, а не *Pig*.
- Третье**, исходные расплавы внутриплитных толеитов "несут метку" граната в форме резко фракционированного спектра распределения несовместимых элементов.

Oliv → Oliv + Px ± Plag

- The common crystallization sequence is: olivine (± Mg-Cr spinel), olivine + clinopyroxene (± Mg-Cr spinel), olivine + plagioclase + clinopyroxene

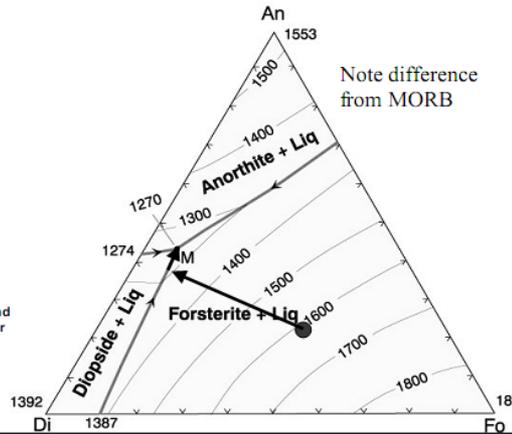
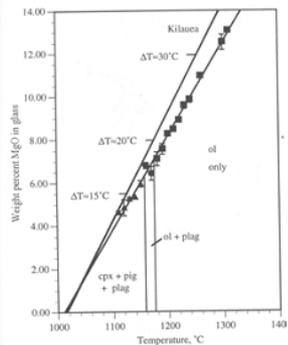
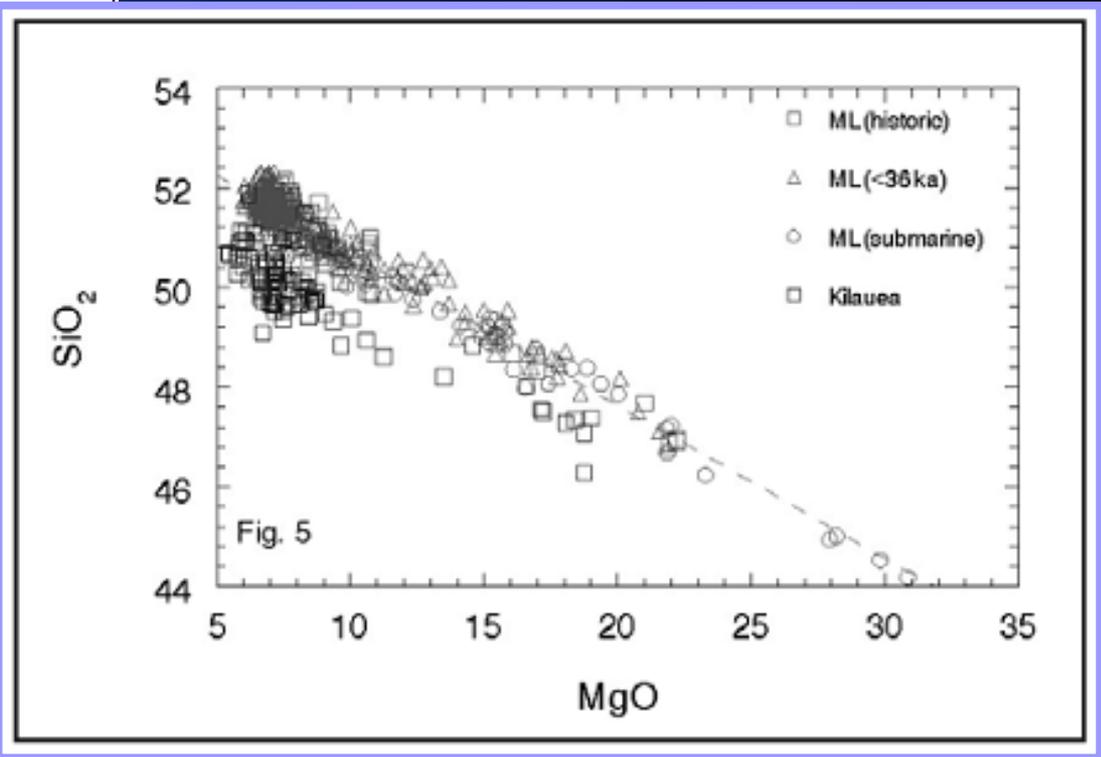


Figure 7-2. After Bowen (1915), A. J. Sci., and Morse (1994), Basalts and Phase Diagrams. Krieger Publishers.

Различия зависимости SiO₂ от MgO для разных вулканов



Relationship between MgO in and temperature for Mauna (Montierth et al., 1995)

Note how quickly cpx follows plagioclase

$$T(^{\circ}\text{C}) = 23.0(\text{MgO}) + 1012$$

Therefore the temperature of a with 7% MgO will be:-

$$23.0 \times 7.0 + 1012 = 1174 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Similarly for Kilauea
 $T(^{\circ}\text{C}) = 20.1(\text{MgO}) + 1014$
 (Helz and Thornber, 1987)

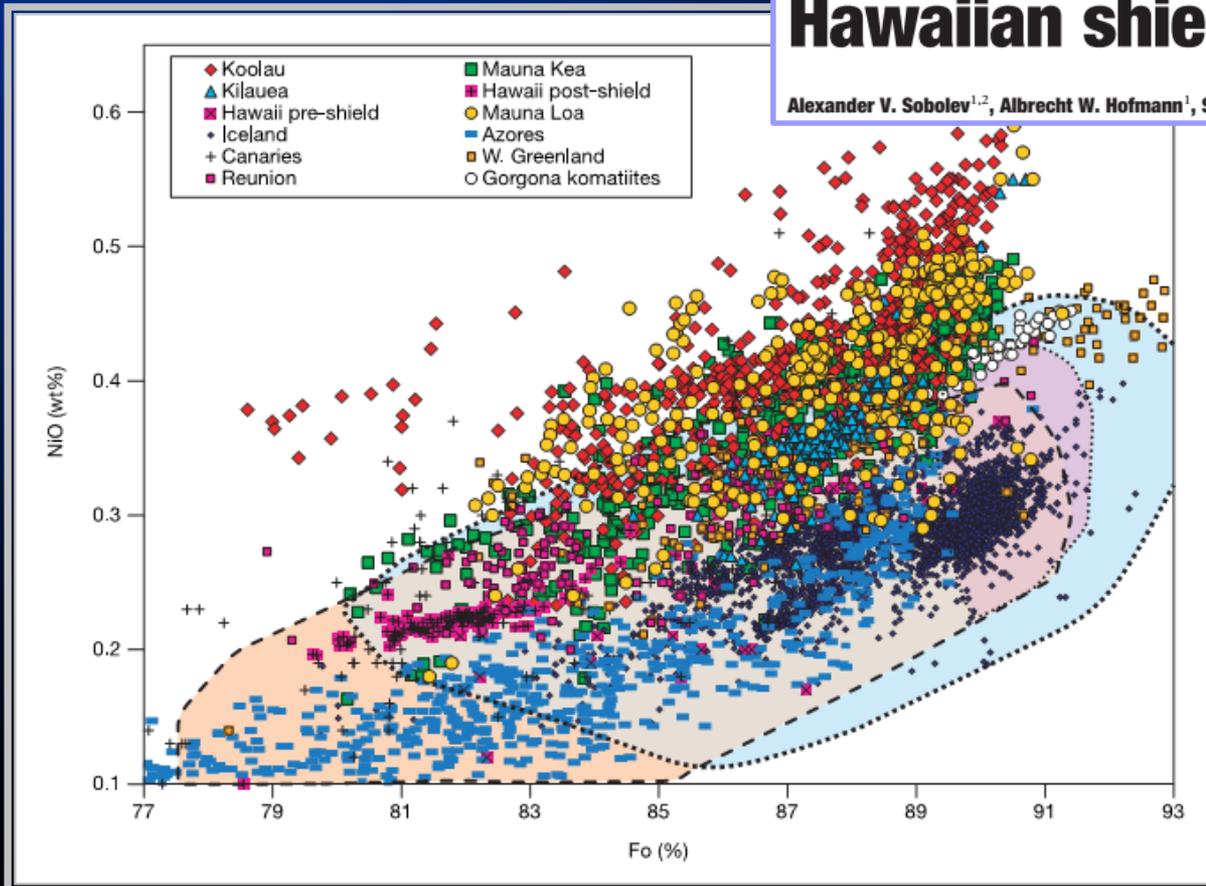
Высокие содержания NiO в гавайских оливинах как признак пироксенитового мантийного источника

articles

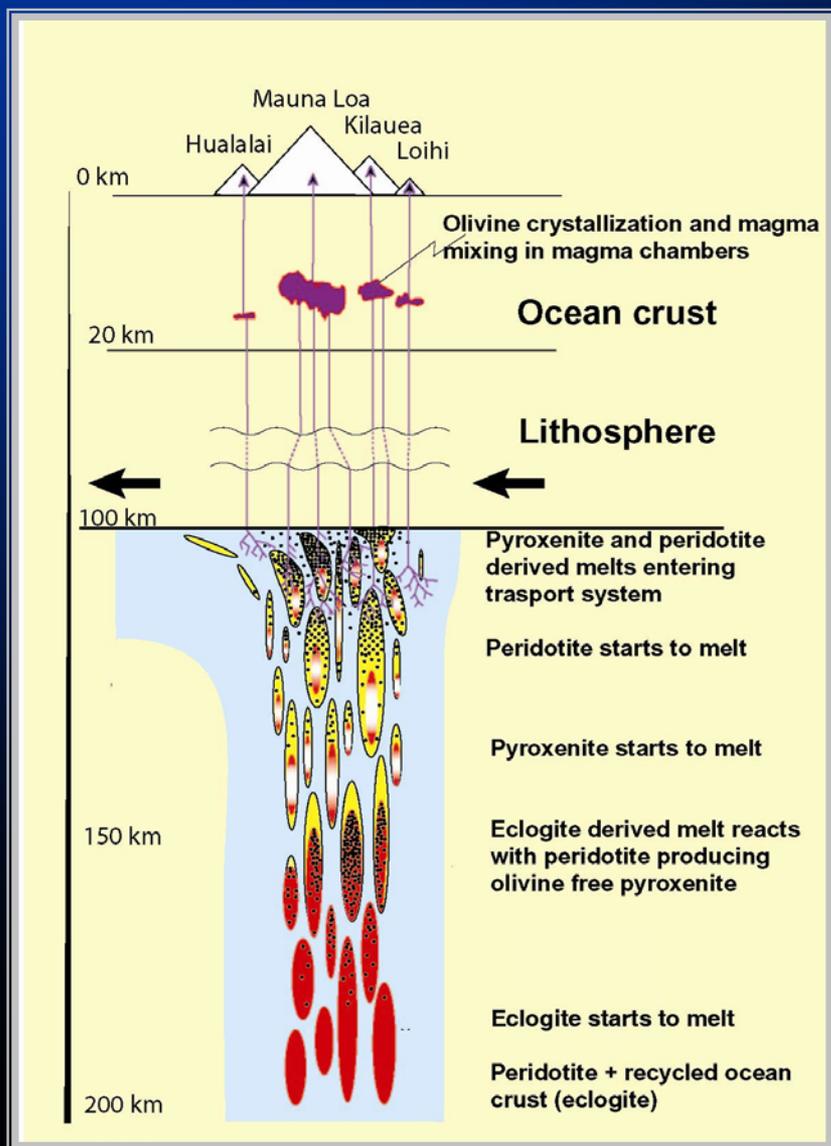
An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts

Alexander V. Sobolev^{1,2}, Albrecht W. Hofmann¹, Stephan V. Sobolev^{3,4} & Igor K. Nikogosian^{5,6}

Nature 2005

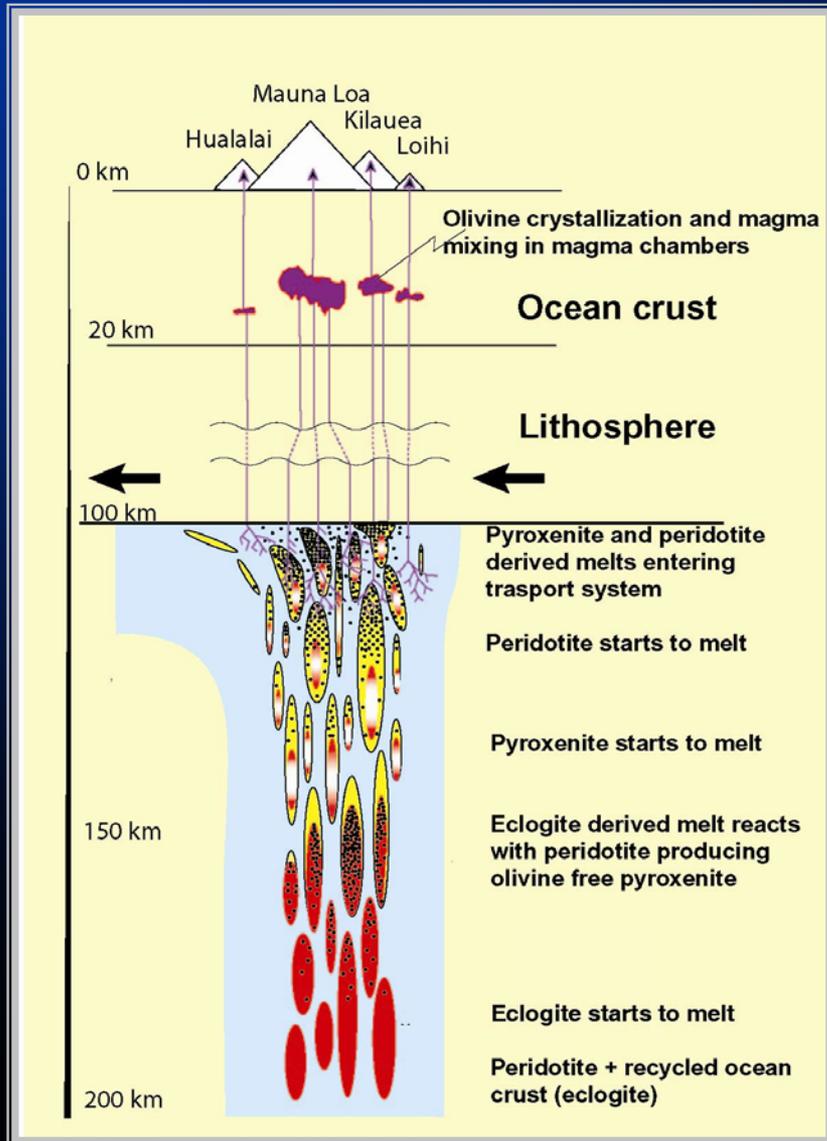


1-3 Основные положения гипотезы А.В. Соболева



- (1) Поднимающийся плюм содержит (по крайней мере) два типа вещества - **эклогит** (представляющий продукт субдукцированной океанической коры) и **перидотит**.
- (2) Эклогит представляет богатую SiO_2 литологию - как смесь океанических базальтов, габбро и осадков. По этой причине температура солидуса эклогита существенно ниже, чем у перидотита.
- (3) Эклогитовый компонент плюма начинается плавиться раньше (на больших глубинах - при более высоком давлении).

4-7 Основные положения гипотезы А.В. Соболева

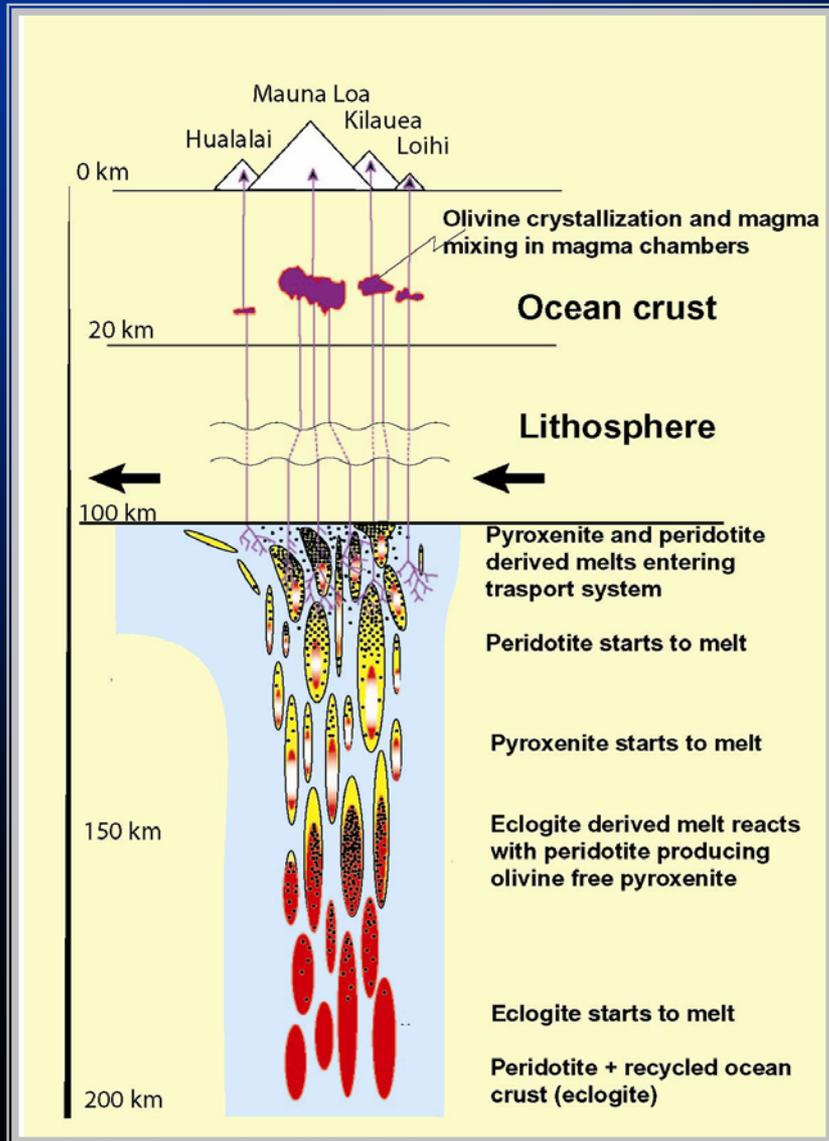


(4) Высоко-Si расплав начинает взаимодействовать с O1-перидотитом – вплоть до полного растворения оливина (для этого необходимо 40-60% эклогитового расплава).

(5) В центральной части плюма образуется пироксенит. Фронт замещения оливина пироксеном движется вверх – вглубь перидотитового вещества.

(6) На реакционном фронте вследствие растворения оливина Ni из этой фазы "перекачивается" в реакционный пироксенит.

Основные положения гипотезы А.В. Соболева



- (7) Плавление эклогита продолжается до стадии, когда в пределах плюма присутствуют три литологии – безоливиновый пироксенит, исходный перидотит и расплав (продукт плавления эклогита).
- (8) На глубинах около 100 км начинает плавиться перидотит. T
- (9) Таким образом, гавайские магмы представляют продукт смешения двух типов магм – относительно богатой SiO_2 и Ni (как продукта плавления пироксенита) и обычных перидотитовых расплавов, которые – беднее SiO_2 и Ni .

Новая модель гавайского плюма (Соболев и др., 2005)

Нами показано, что аномально высокие содержания никеля и кремния в большинстве родоначальных Гавайских расплавов не согласуются с равновесным оливином в их глубинном мантийном источнике. Предложено, что ОI в исходном мантийном перидотите был исчерпан в результате реакции с выплавками рециклированной океанической коры (эклогит).

Численное моделирование показывает, что образованный в этой реакции вторичный пироксенит являлся мантийным источником для 2/3 массы Гавайских магм, образованных за последний миллион лет.

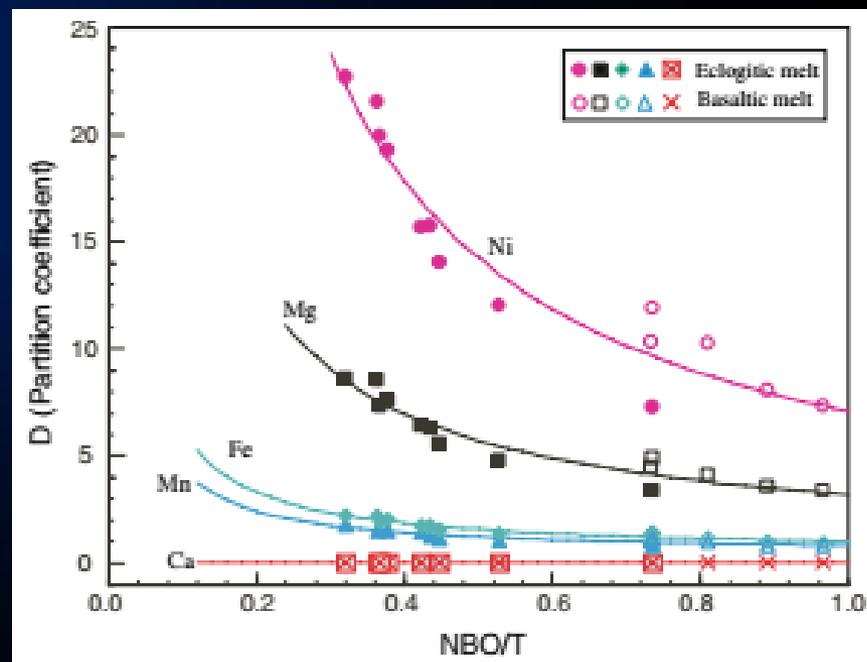
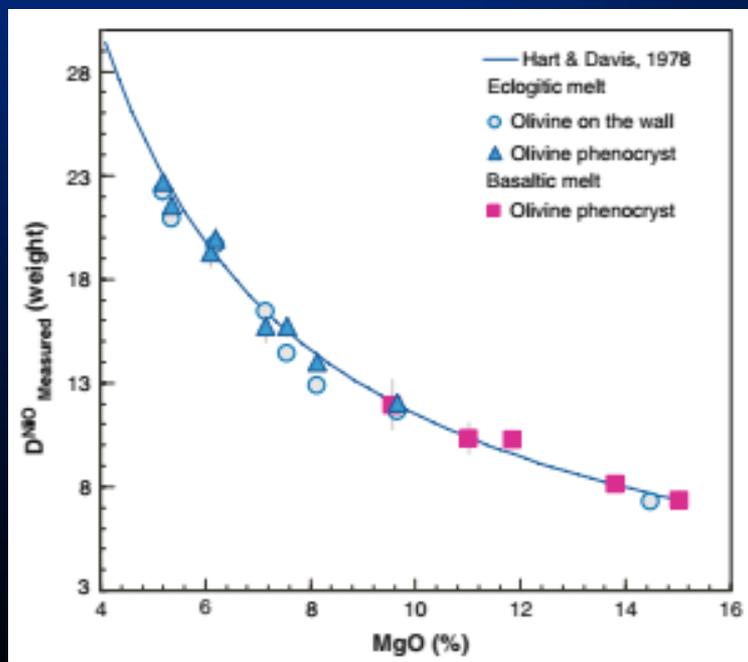
Представленная модель согласуется с геохимическими данными и геофизическими наблюдениями и свидетельствует о расположении корового вещества в центре мантийной струи.

Полученный результат предполагает существенно более высокую роль рециклированного корового материала в образовании мантийных струй чем предполагалось ранее.

Partitioning of Ni between olivine and siliceous eclogite partial melt: experimental constraints on the mantle source of Hawaiian basalts

Zhengrong Wang · Glenn A. Gaetani

Так ли все очевидно ?



Conclusion: This study provides a simple explanation for the presence of high-Ni olivines in Makapuu-stage Koolau lavas, and demonstrates that an olivine-free “hydrid” pyroxenite mantle source is not required within the Hawaiian plume.

Схема океанического магматизма с учетом взаимодействия деплетированного и обогащенного мантийного источника

