



ГЕОХИМИЯ МАГМАТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА 2

Петролого-геохимическая систематика магматических пород

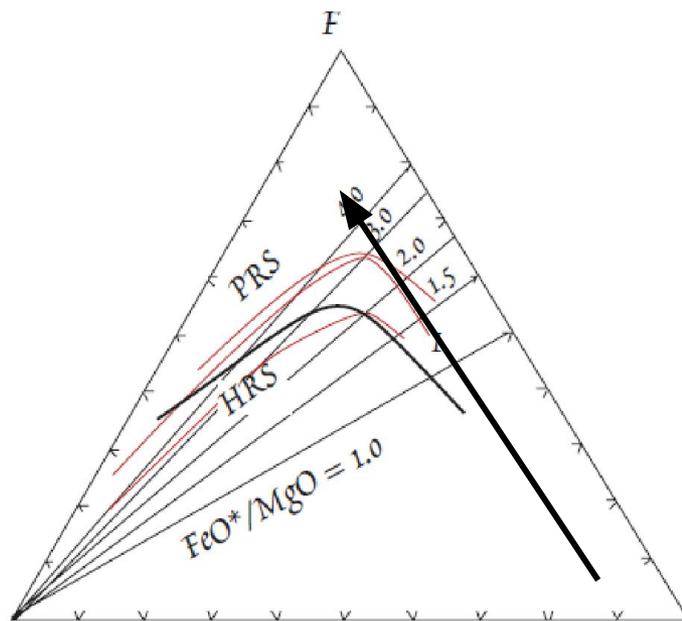
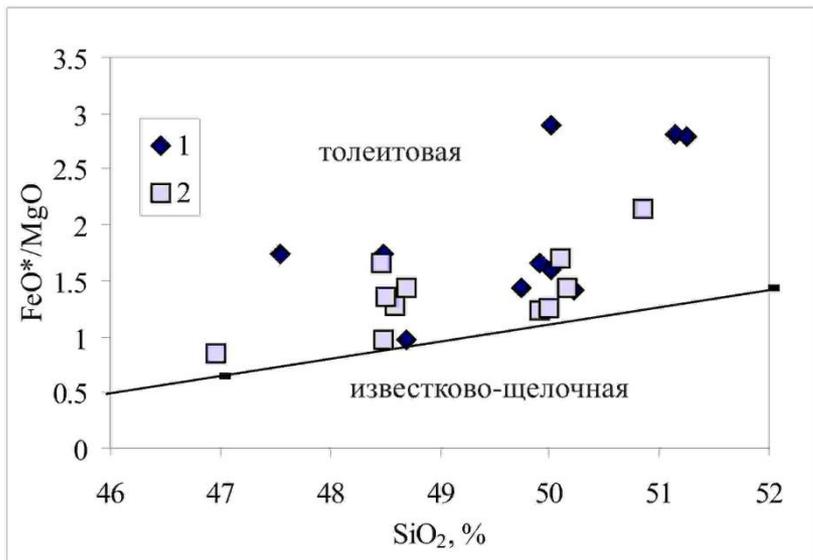
Геохимическая систематика основана на эмпирически выявленных особенностях распределения и уровнях накопления редких элементов в магматических породах. Установлено, что содержания и отношения редких элементов контрастно изменяются не только при переходе от семейства с одним уровнем кремнекислотности к другому, но и в пределах каждого семейства при изменении общей щелочности или принадлежности к той или иной петрохимической серии (толеитовой, известково-щелочной, щелочной). Они также различаются для пород близкого петрохимического состава, но имеющих различное происхождение. В основу геохимической систематики магматических пород положен генетический принцип. Наиболее явно и последовательно это выражено в определении Л. В. Таусона: «Геохимический тип магматических пород это группа пород, характеризующихся общностью способа и условий образования материнских магм, что находит отражение в их приуроченности к определенным геодинамическим обстановкам, а также в сходстве химического, редкоэлементного и минерального состава»

Петрохимические серии магматических пород

Классификация серий магматических пород по тектоническим обстановкам

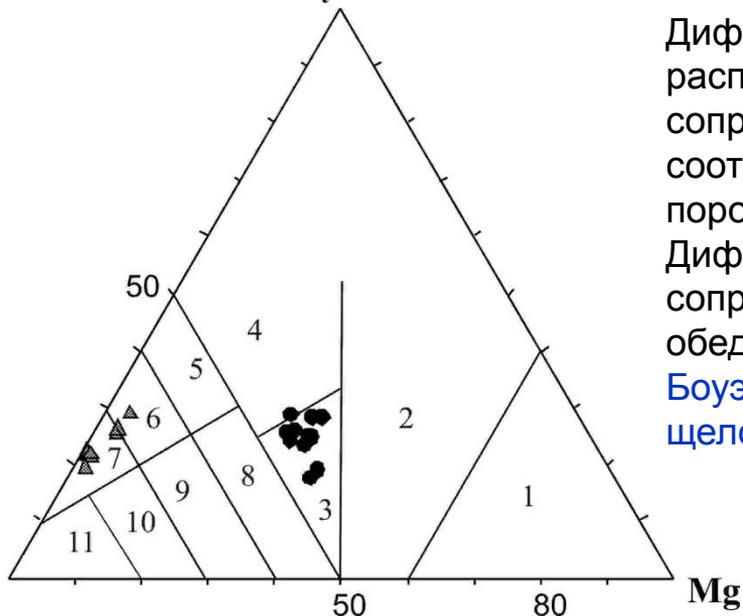
Окраины плит		Внутриплитные			
Субдукционные зоны	Океанические хребты	Океанические	Континентальные		
		Океанические острова	Рифты	Кратоны	Коллизионные зоны
Толеитовая Известково-щелочная Субщелочная	Толеитовая	Толеитовая Щелочная (бимодальная)	Бимодальные Толеитовая и щелочная	Щелочная Бимодальная	Известково-щелочная Субщелочная

Петрохимические серии магматических пород



$$\text{FeO}^*/\text{MgO} = 0.1562 \times \text{SiO}_2 - 6.685$$

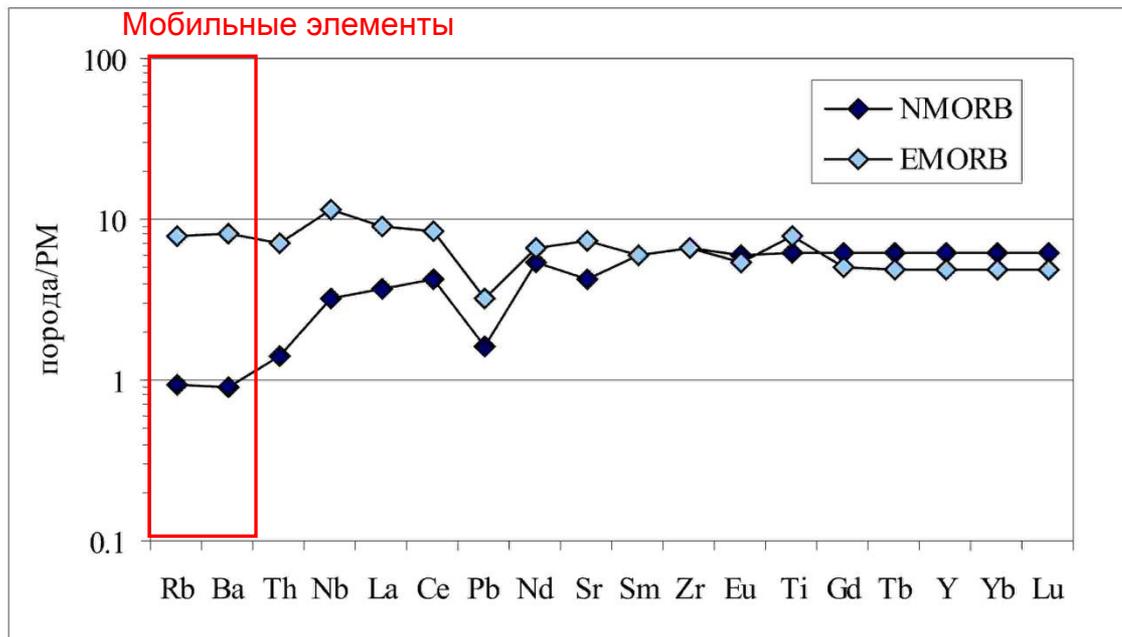
$\text{Fe}_t + \text{Ti}$



Дифференциация более «сухих» и восстановленных базальтовых расплавов происходит вдоль оливин-плаггиоклазовой котектики и сопровождается относительным накоплением железа, что соответствует **Феннеровскому тренду** (образующиеся при этом породы принадлежат **толеитовой серии**).

Дифференциация «водных» и окисленных расплавов сопровождается кристаллизацией магнетита, что приводит к обеднению железом. Такой тренд дифференциации называется **Боуэновским**, а образующиеся породы отвечают **известково-щелочной серии**.

Мультиэлементные диаграммы



Общим правилом является, что **Th, Nb, Ta, Zr, Hf, Ti** менее мобильны, чем **LREE**. Инертность HFSE, Th, Ti сопоставима с HREE при низком до умеренного отношении вода/порода при гидротермальных процессах на морском дне или низкоградном региональном метаморфизме. Такие элементы как Cs, Rb, Ba, K весьма мобильны.

Мобильность элементов может быть выявлена по наличию прямой корреляции концентраций редких элементов с потерями при прокаливании (п.п.п.) [Pollat et al., 1999; Pollat, Kerrich, 2000].

Коровая контаминация мантийных магм выявляется по одновременному **обеднению Nb (Ta), P, Eu, Ti**, и она сама может служить индикатором, поскольку ее признаки отсутствуют у базальтов океанических бассейнов.

Для высокомагнезиальных основных пород признаками коровой контаминации служат прямая корреляция содержания SiO₂ и некогерентных редких элементов и их обратная корреляция с MgO.

Базальты срединно-океанических хребтов

Судя по экспериментальным данным, MORB образуются при 10–20 % плавлении верхнемантийных источников на глубине 50–85 км, при этом образуются оливин-нормативные толеитовые магмы. Многие MORB являются толеитами или кварцнормативными толеитами, что обусловлено фракционной кристаллизацией вдоль оливин-плагиоклазовой котектики в малоглубинных камерах при низком давлении (< 10 кбар). Поскольку мантийный оливин имеет содержание форстерита 90–92 %, то расплав, равновесный с ним, должен иметь атомное отношение $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ около 0.72. Среднее значение Mg# для MORB составляет 59, наиболее примитивные MORB имеют $Mg\# = 70$. Следовательно, большинство MORB представляют продукты фракционирования исходных более высокомагнезиальных расплавов, и важнейшим процессом, контролирующим состав MORB, является фракционная кристаллизация. Основные кристаллизующиеся фазы – это оливин, авгитовый клинопироксен, кальциевый плагиоклаз и шпинель.

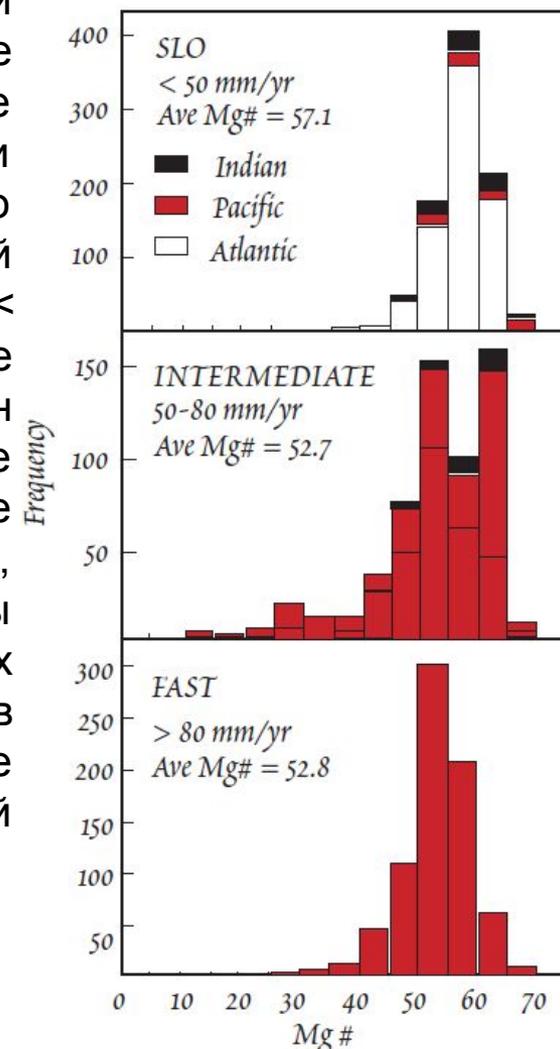
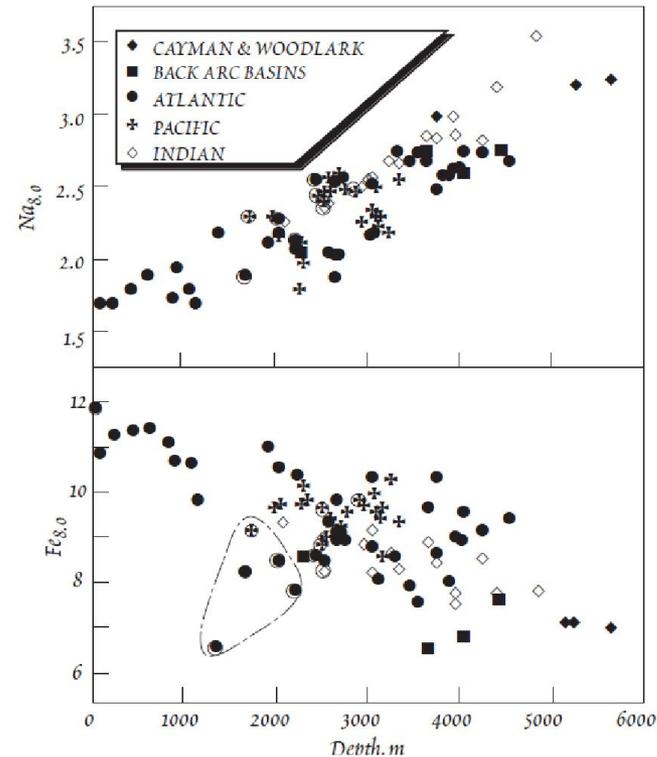
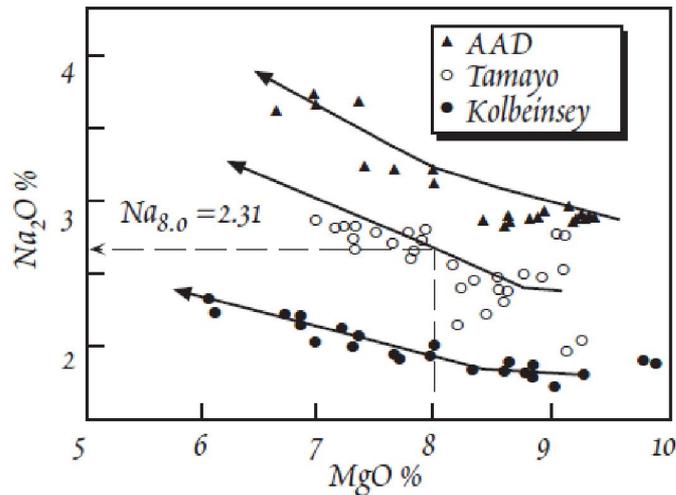


Figure 12.2. Mg# in basalts from mid-ocean ridges of differing spreading rates. The Mg#

Базальты срединно-океанических хребтов

Влияние степени и глубины плавления



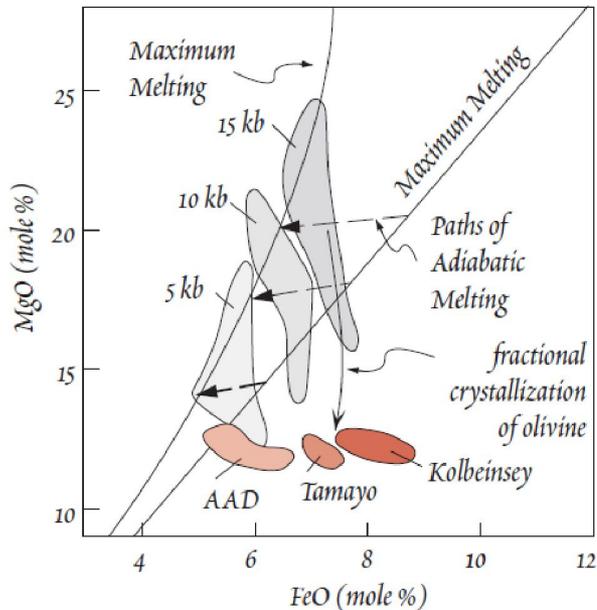
«горячая»
больше глубина и F
плавления

«холодная»

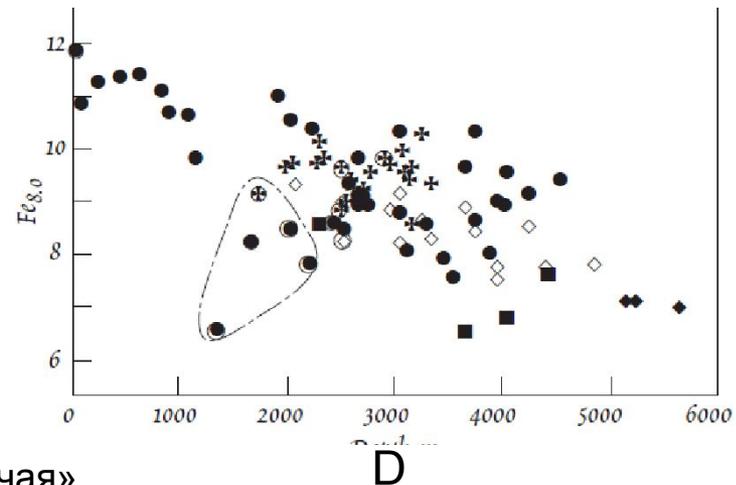
Содержание элемента приведено к одному содержанию MgO (8%), то есть одинаковой степени дифференциации

Содержание Na_2O в базальтовом расплаве контролируется только степенью плавления и подобно несовместимым элементам уменьшается с ростом степени плавления.

Базальты срединно-океанических хребтов

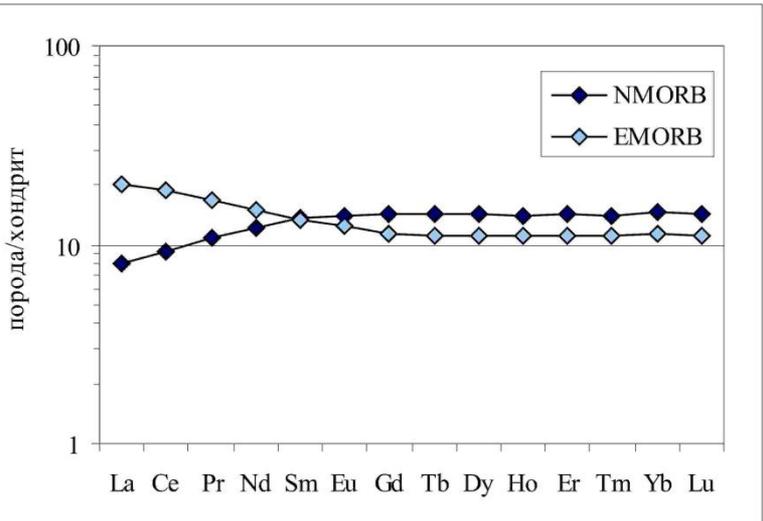


Содержание FeO практически не зависит от степени плавления, оно увеличивается с ростом давления и мало изменяется при фракционной кристаллизации [Klein, Langmur, 1987]. В целом, ключевым фактором, определяющим состав расплавов, является мантийная температура, так как она контролирует и степень плавления, и среднюю глубину плавления. По данным Э. Клейна и С. Лангмюра [Klein, Langmur, 1987], для объяснения вариаций в составе MORB необходимы вариации степени плавления от 8 до 20 % и давления от 5 до 16 кбар, различия в температуре должны составлять около 250°C.



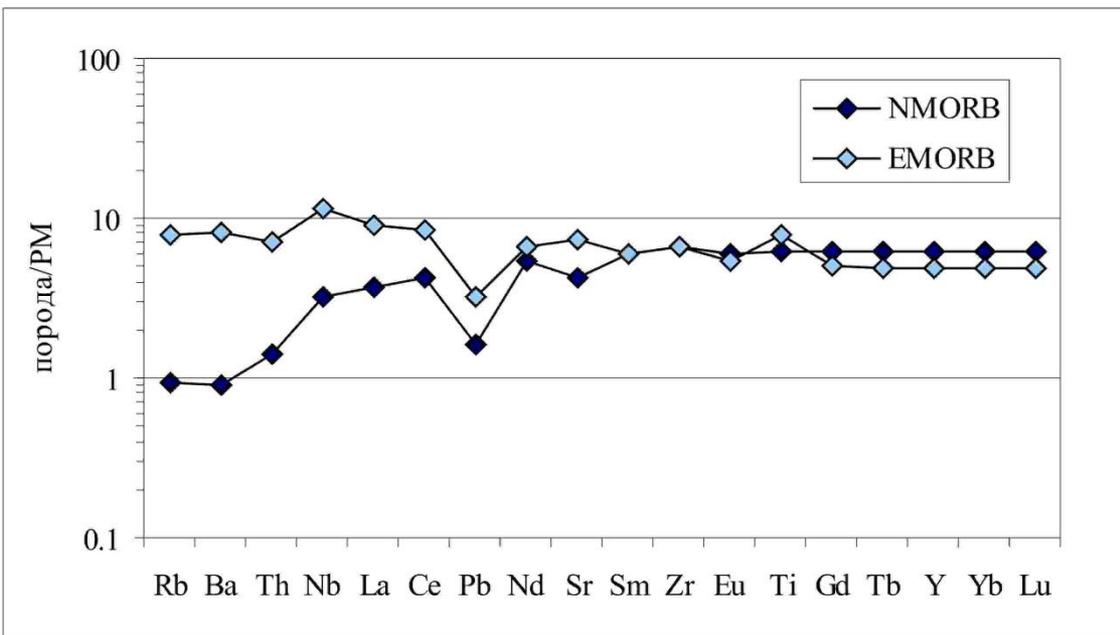
«горячая»
больше глубина
плавления

Базальты срединно-океанических хребтов подразделяются на деплетированные (NMORB – normal mid-ocean ridge basalt), обогащенные (EMORB – enriched mid-ocean ridge basalt) и переходные (TMORB – transitional mid-ocean ridge basalt) разновидности.



Все разновидности базальтов срединно-океанических хребтов имеют минимум по Pb на мультиэлементных спектрах. Для EMORB отмечается слабая положительная аномалия Nb, что сближает их с базальтами океанических островов. Эта черта, а также слабое обогащение LILE и легкими РЗЭ, может отражать участие расплавов, подобных базальтам океанических островов, в их образовании.

Различие в уровне накопления наиболее несовместимых элементов определяются составом источника: от деплетированного до недеплетированного



Внутриплитные базальты

Внутриплитные базальты (WPB – within-plate basalt) включают базальты: океанических островов (OIB – oceanic island basalt), океанических плато (OPB – oceanic plateau basalt) и симаунтов, континентальные рифтогенные (CRB – continental rift basalt) платобазальты CPB –continental flood basalt).

Присутствуют 2 типа базальтов: толеитовые и щелочные

На океанических островах и в континентальных обстановках присутствуют и толеитовые, и щелочные вулканиты, но первые доминируют. Могут наблюдаться вариации состава магм во времени, например, в Гавайско-Императорской цепи островов ранние вулканиты представлены оливиновыми толеитами, за ними в большом объеме следуют железистые кварцевые толеиты, и завершают вулканизм малые объемы щелочных базальтов и их дифференциатов. В некоторых континентальных рифтах установлена зональность со сменой толеитовых базальтов щелочными на флангах рифтов.

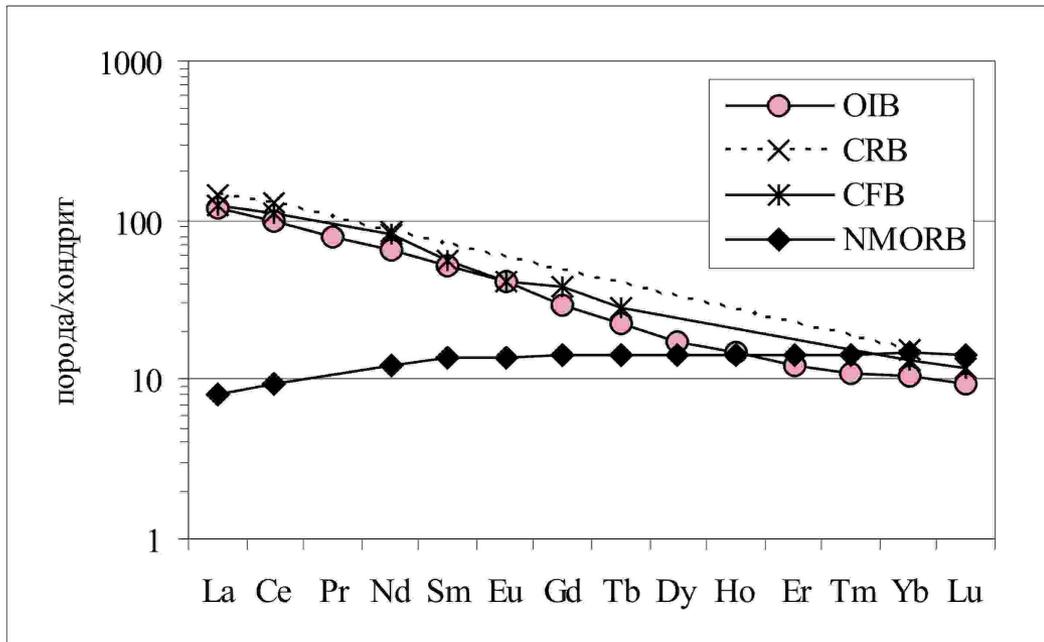
Для рассматриваемых внутриплитных вулканитов предполагаются **бóльшие глубины образования и меньшие степени плавления** чем для MORB. В зависимости от степени плавления образуются толеиты или щелочные базальты, очень малые степени плавления могут объяснить сильное обогащение несовместимыми элементами последних

Внутриплитные базальты

Присутствуют 2 типа базальтов: толеитовые и щелочные

Оба типа базальтов характеризуются широкими вариациями петрогенных элементов, но большинство имеют более низкий Mg # (40-60) и содержание Ni, что предполагает бóльшую степень фракционирования оливина и пироксенов чем для MORB и/или участие пироксенитов в источнике.

Континентальные платобазальты имеют варьирующие и повышенные содержания SiO₂ и K₂O, что частично может отражать контаминацию коровым материалом.

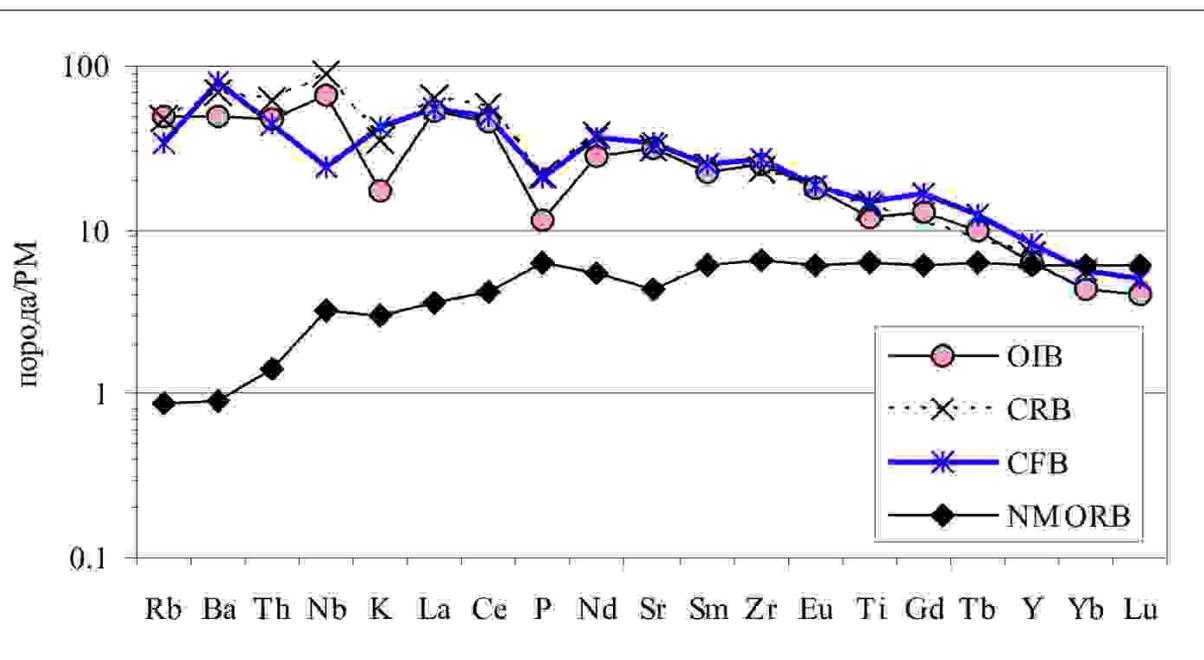


Характерная черта WPB это сильно фракционированные спектры с обогащением легкими РЗЭ – высоким $(La/Yb)_n$, что отражает не деплетированный характер мантийного источника. Повышенное $(Gd/Yb)_n (>2)$ – фракционирование тяжелых РЗЭ свидетельствует о наличии граната среди реститовых фаз.

Внутриплитные базальты

Базальты океанических островов, также как и континентальные рифтогенные и платобазальты **обогащены LILE, LREE, HFSE, Ti и P** в сравнении с MORB, что отчетливо проявлено на редкоземельных и мультиэлементных спектрах. Кроме того, на мультиэлементных спектрах отчетливо проявленные минимумы по K, P.

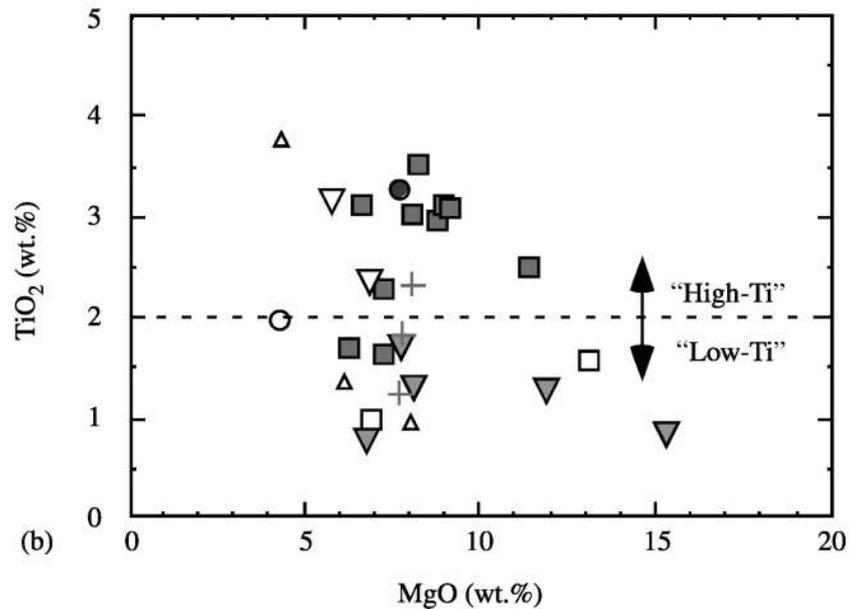
Внутриплитные базальты континентальных областей обнаруживают бóльшую степень обогащения LILE и Th. Для них нередко отчетливо проявлен **Nb минимум** на мультиэлементных спектрах (CFB), что в сочетании с обогащением наиболее несовместимыми элементами может свидетельствовать о вкладе материала субконтинентальной литосферы / континентальной коры.



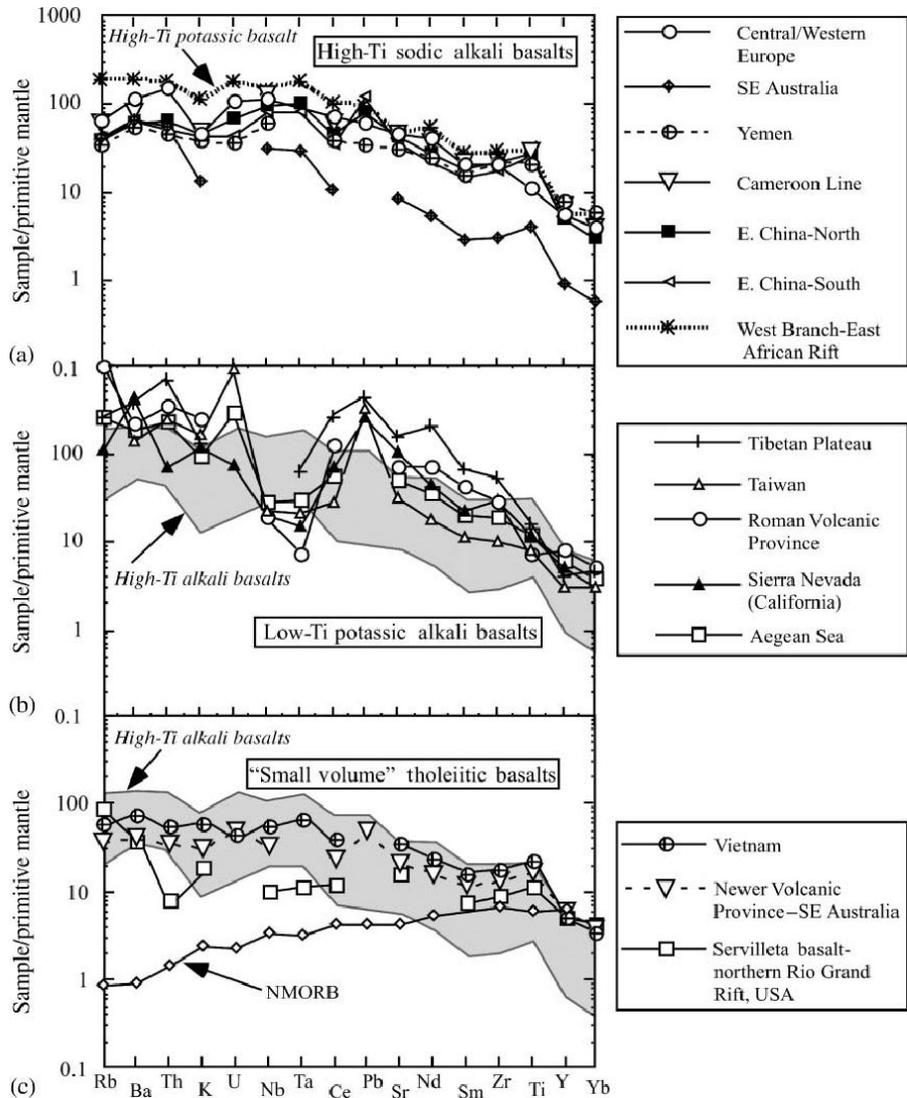
Фракционированные спектры с обогащением наиболее несовместимыми элементами свидетельствуют о недеплетированном характере мантийного источника.

Внутриплитные базальты

Высоко- и низкотитанистые типы



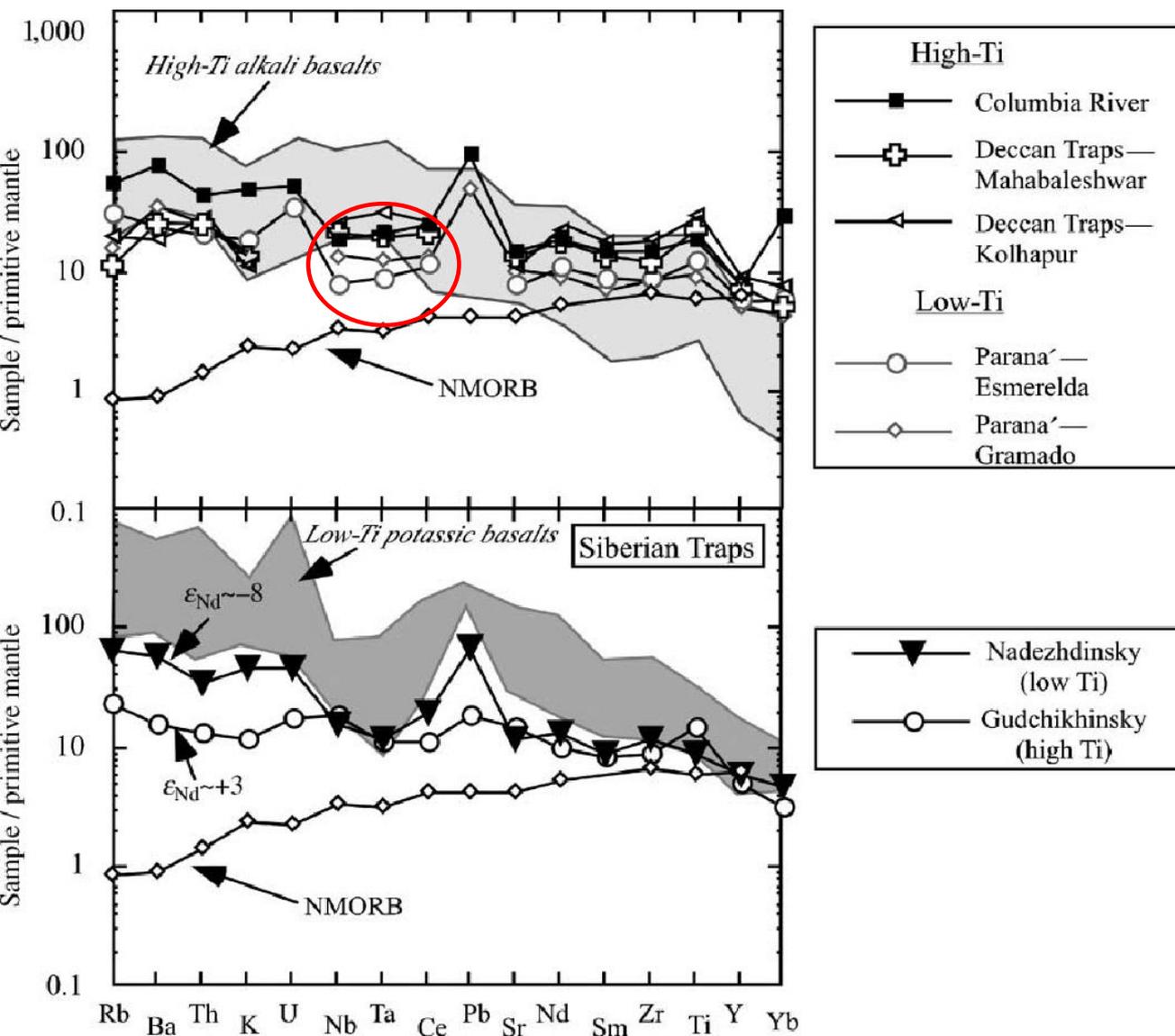
Рифтогенные базальты



High-Ti – отсутствует Nb-Ta минимум

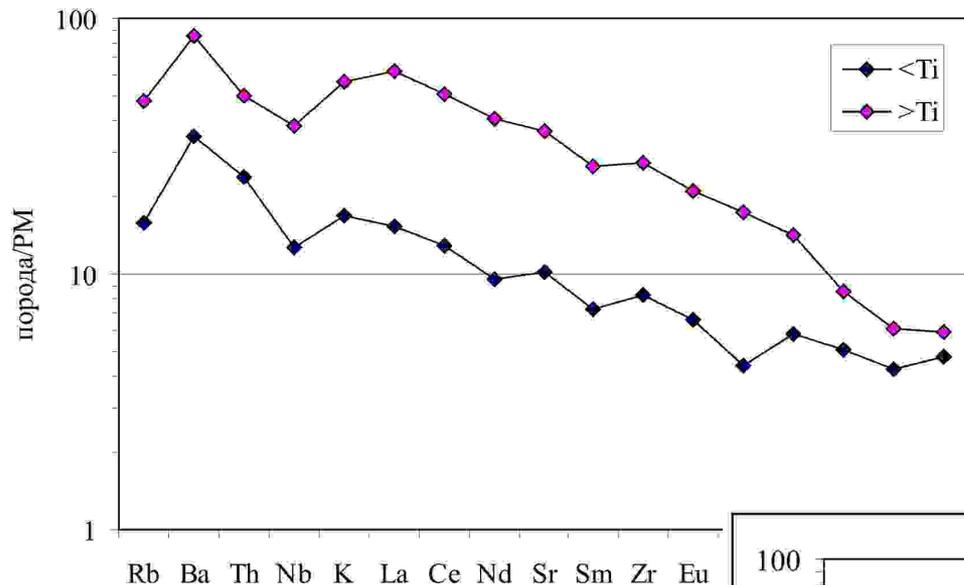
Low-Ti – присутствует Nb-Ta минимум

Континентальные платобазальты

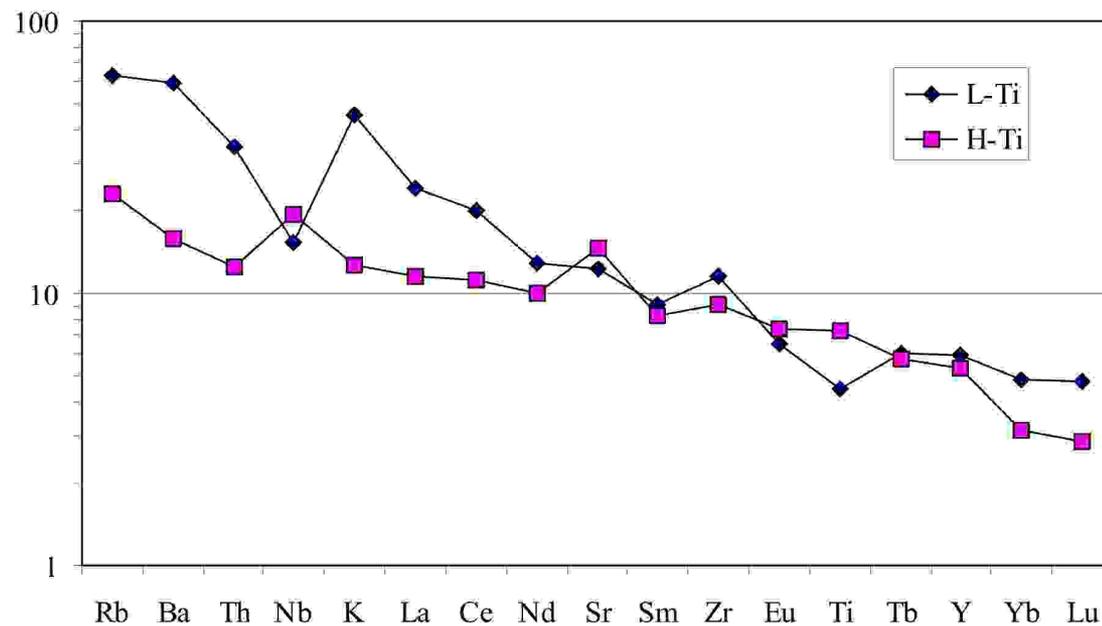


Континентальные платобазальты

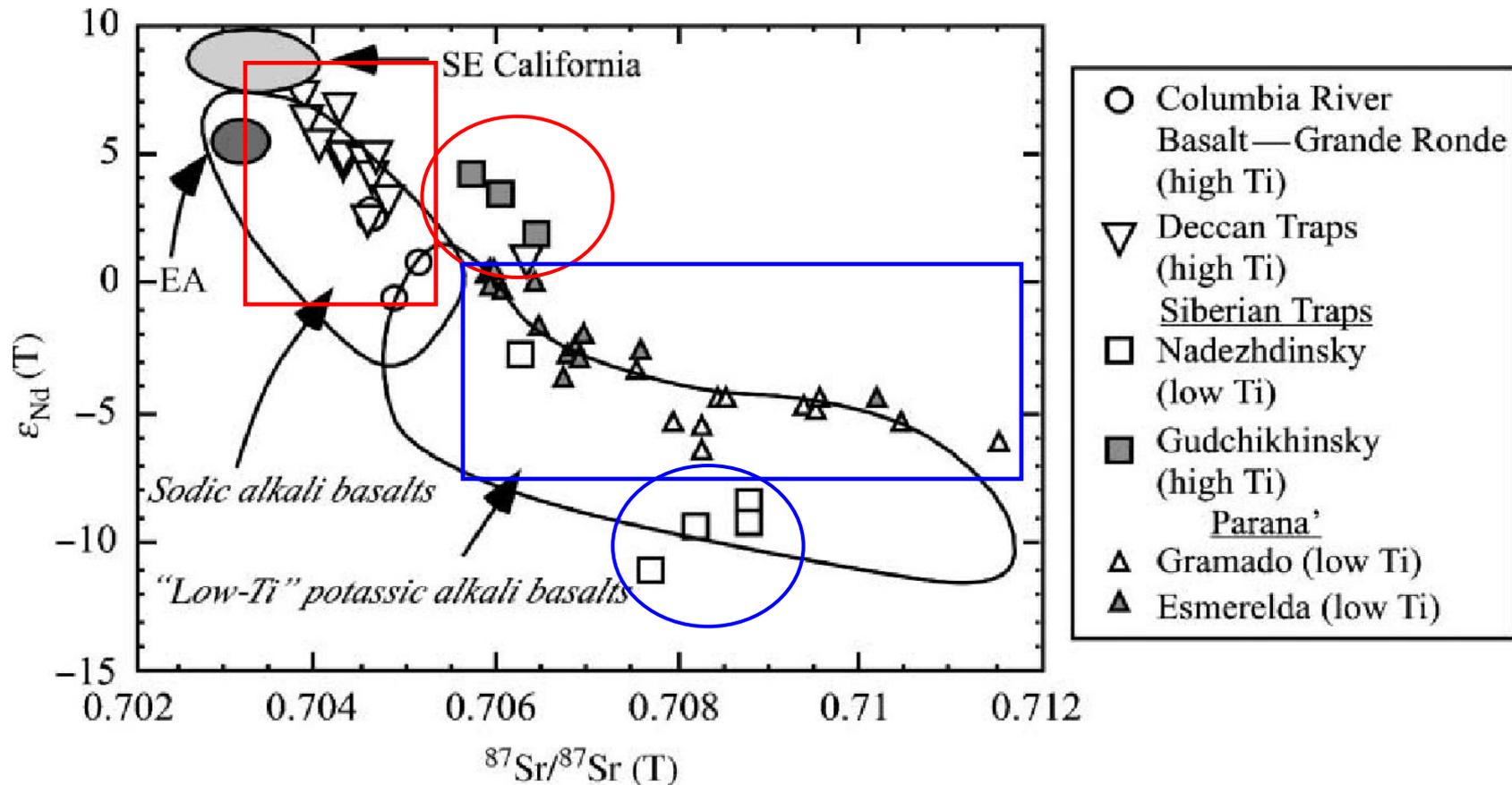
Траппы Парана



Сибирские траппы



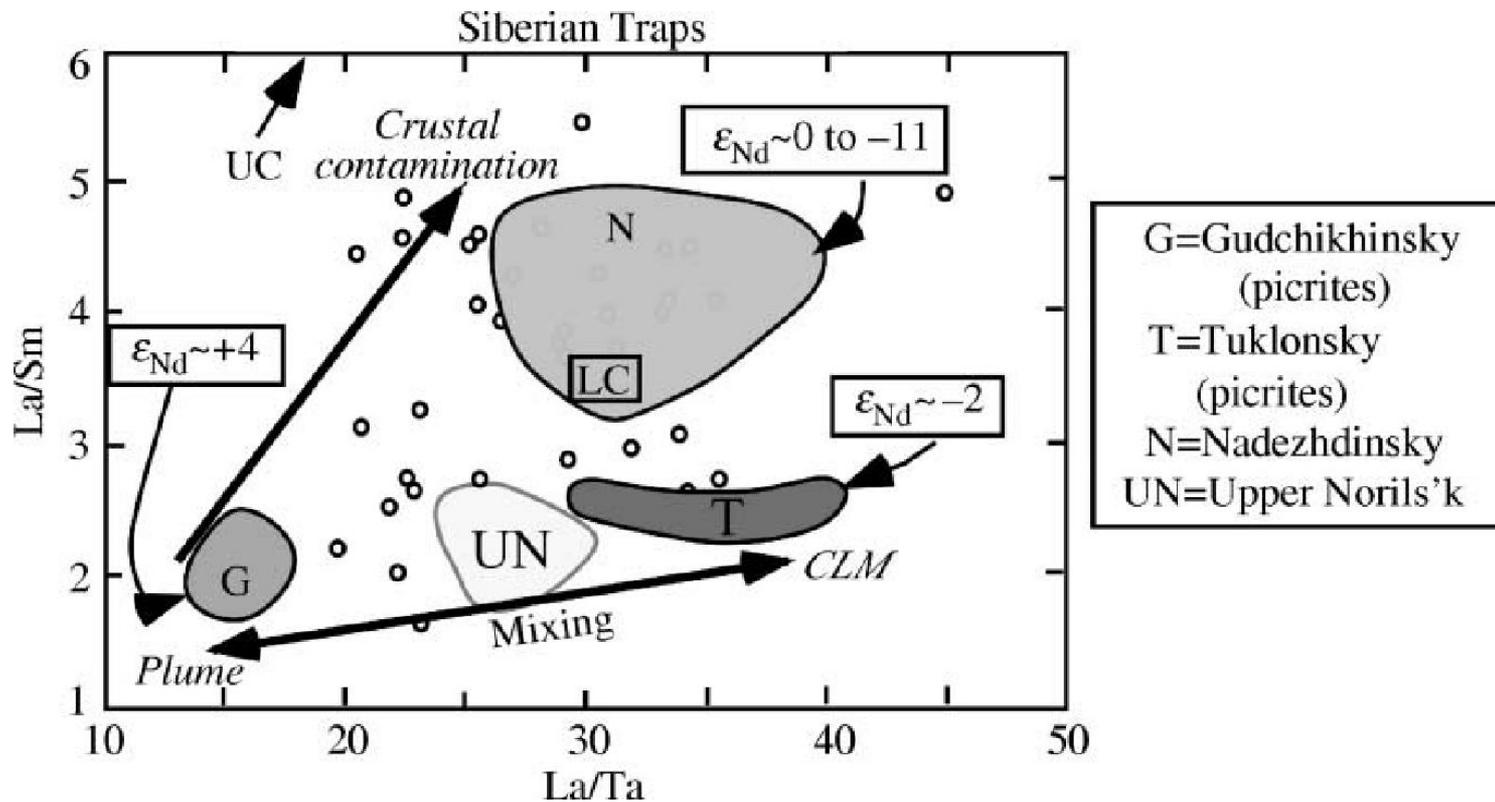
Континентальные платобазальты



>Ti – деплетированные изотопные характеристики

<Ti – обогащенные изотопные характеристики

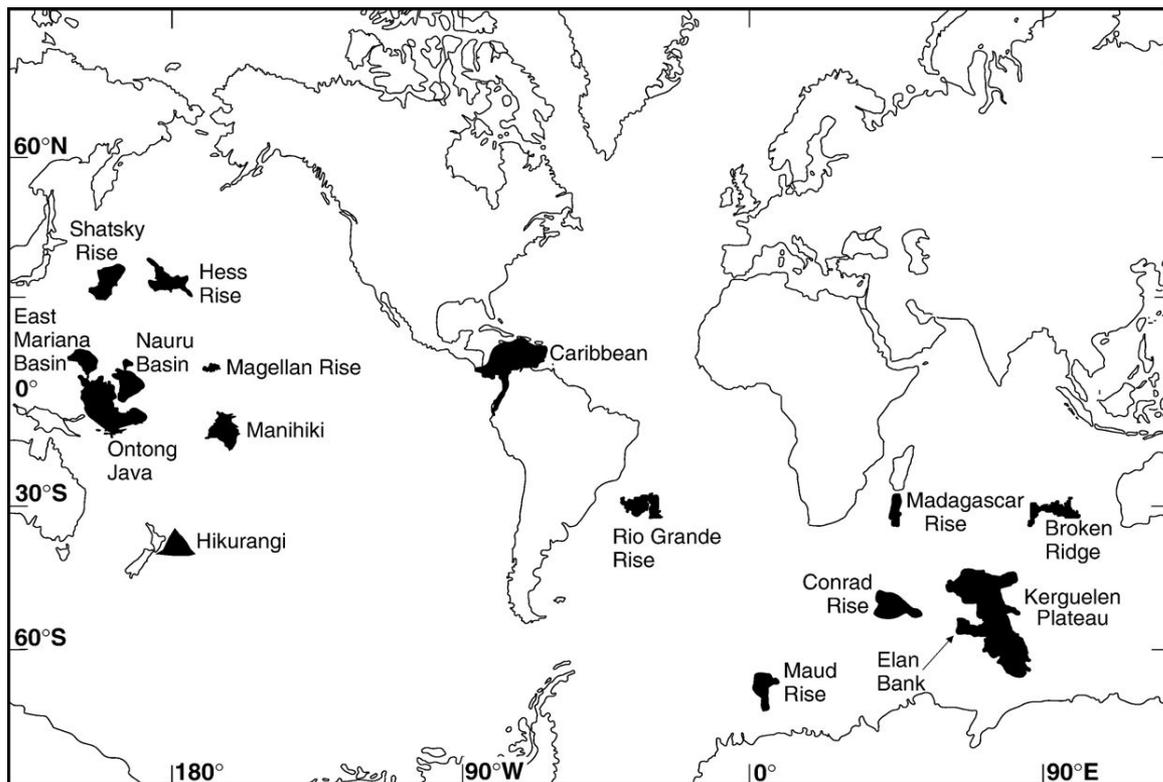
Континентальные плато базальты



Влияние коровой контаминации и вклад субконтинентальной мантии

Океанические плато и симаунты

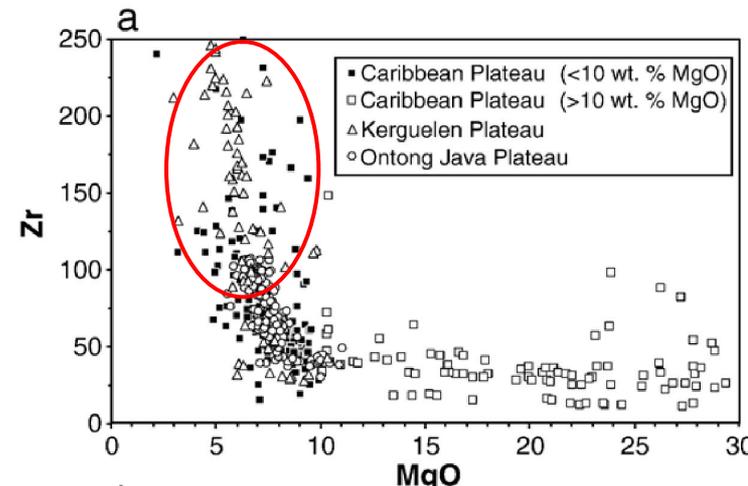
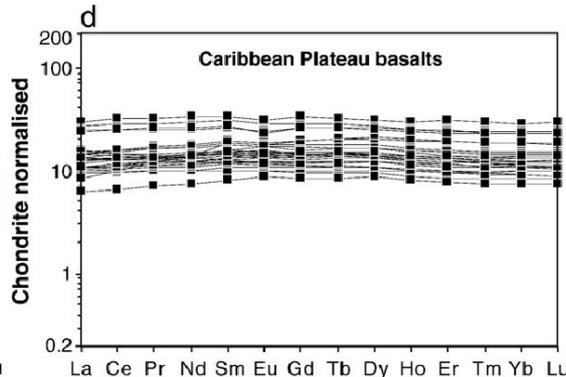
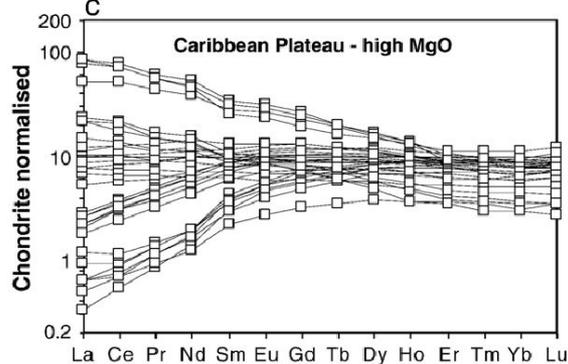
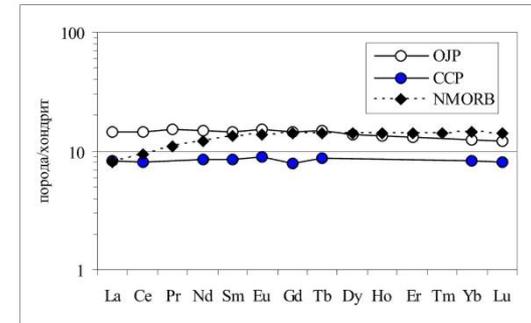
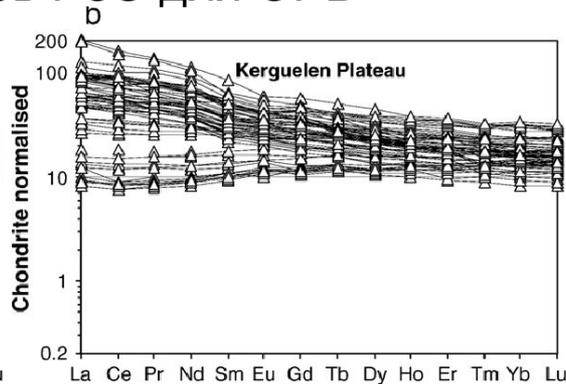
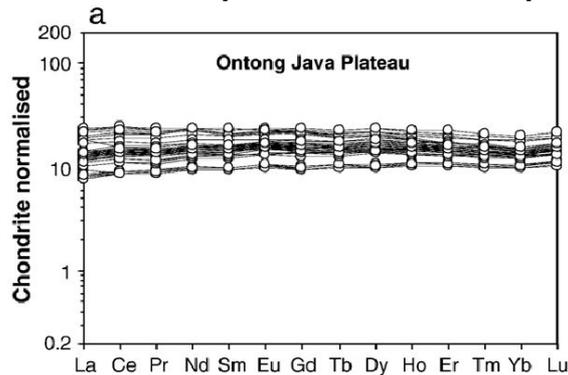
Океанические плато это большие магматические провинции во внутриокеанической обстановке. Наиболее крупные океанические плато были образованы в меловое время, к их числу относятся плато Кергелен, Онтонг Джава, Карибско-Колумбийское, Манихики и другие. Океанические плато отличается большая мощность коры, достигающая 30 км, в сравнение со «стандартной» океанической корой, что требует для их образования повышенных мантийных потенциальных температур в сравнении с окружающей мантией. Океанические плато могут быть результатом взаимодействия плюма со спрединговым центром, как в случае Исландии, или просто действия мантийного плюма, примером является плато Онтонг-Джава - часть Тихоокеанского суперплюма.



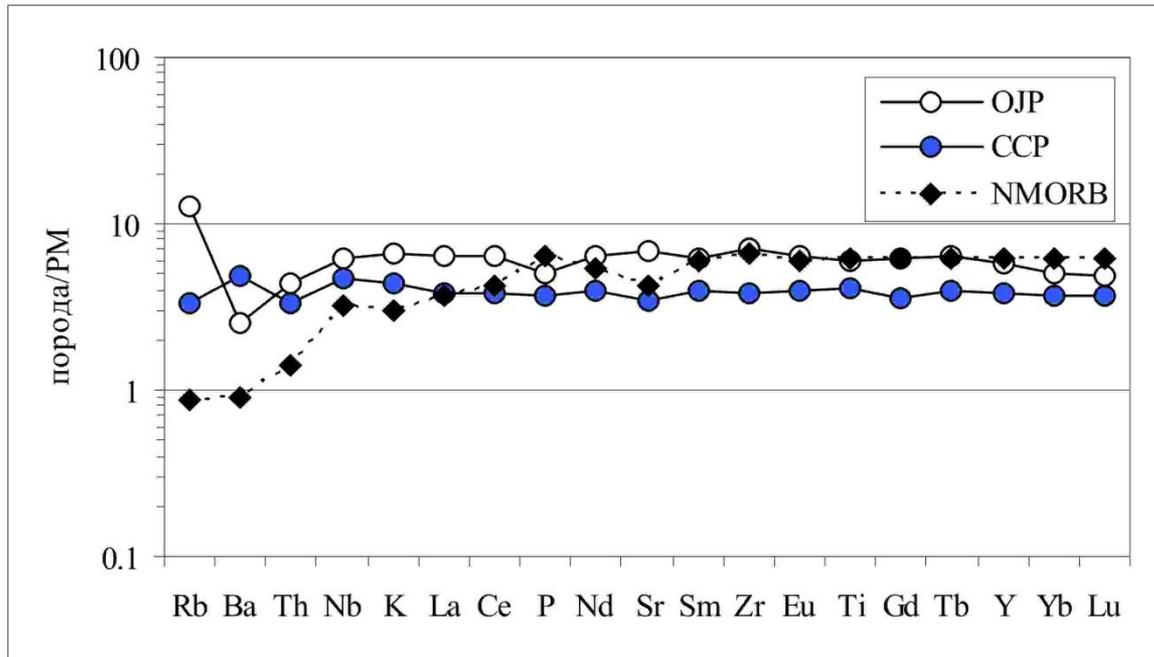
Океанические плато

Доминирующими в верхней (доступной изучению) части разреза океанических плато являются толеитовые базальты, значительно реже встречаются высокомагнезиальные лавы (пикриты и коматииты) установленные в Карибско-Колумбийском плато. В отличие от ОИВ базальты большинства океанических плато не обнаруживают относительно обогащения LILE и LREE. Диагностическим признаком базальтов океанических плато служат практически «плоские» редкоземельные спектры с $(La/Yb)_n \sim 1$.

Три типа спектров РЗЭ для ОПВ



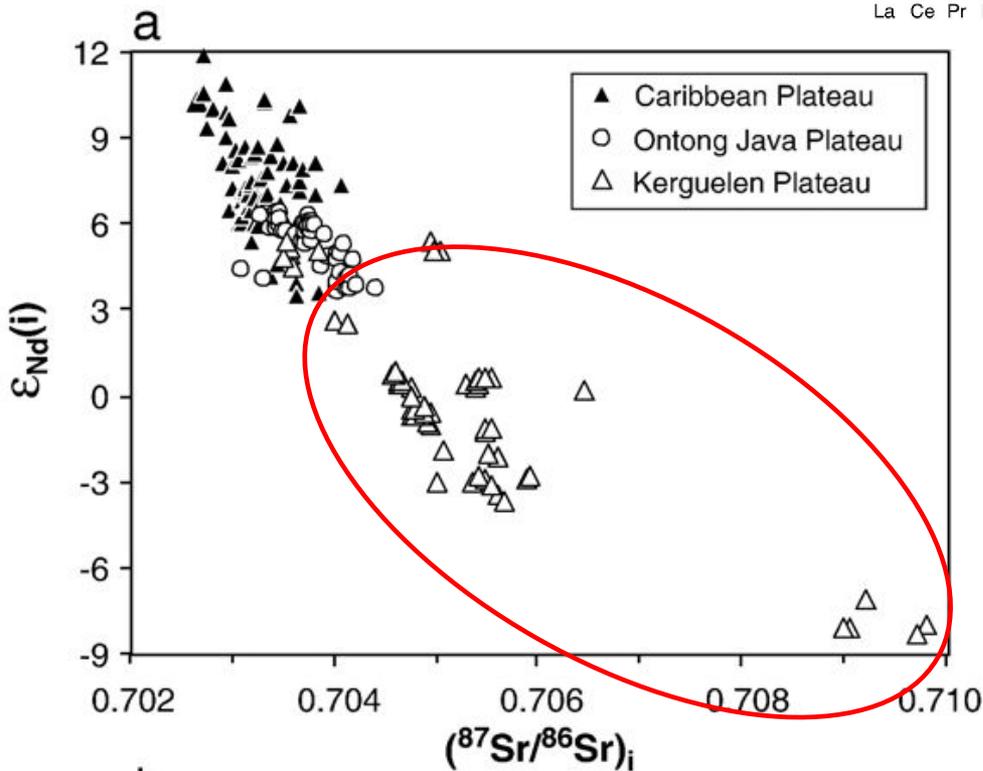
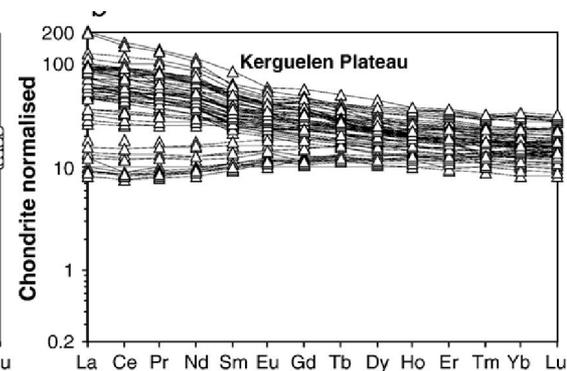
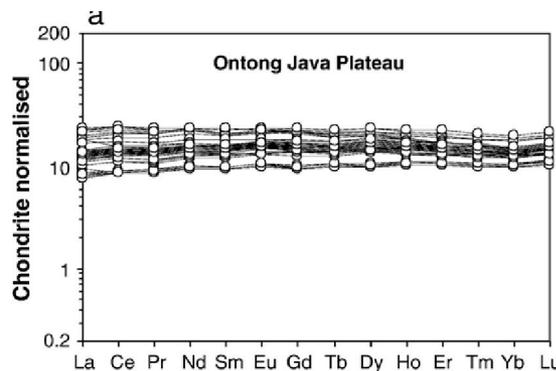
Океанические плато



Мультиэлементные спектры базальтов океанических плато субгоризонтальные (формация Аруба, Карибско-Колумбийское плато) или характеризуются слабым обеднением наиболее несовместимыми элементами (Ba) (плато Онтонг Джава) при незакономерном поведении мобильного Rb.

Океанические плато

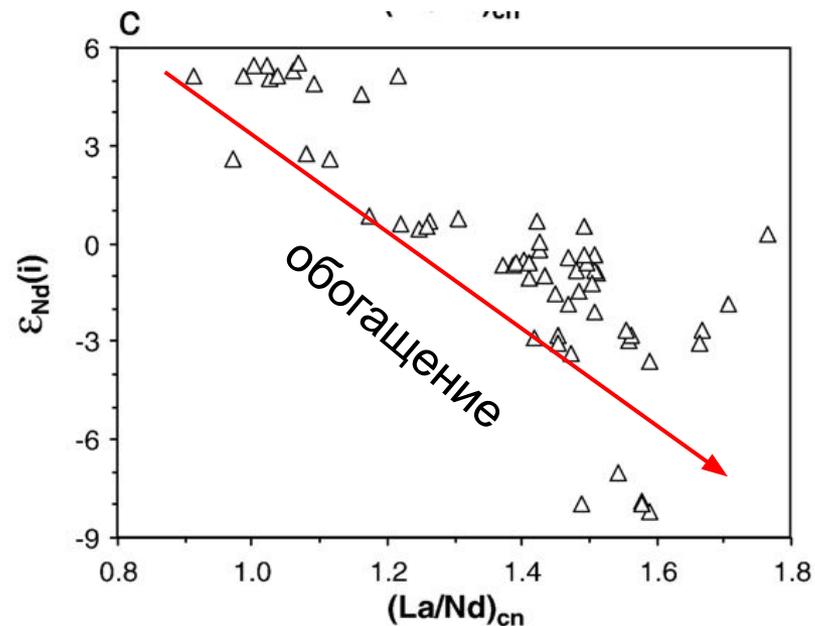
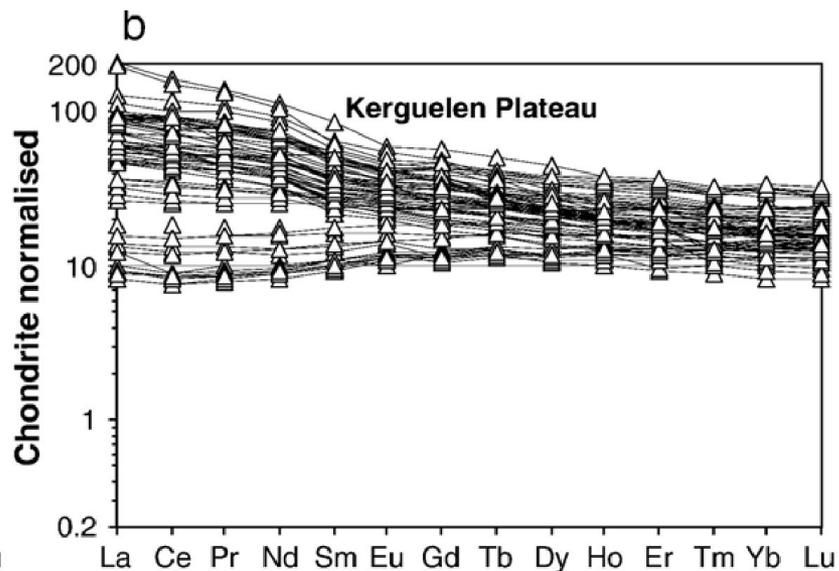
Мантийные источники от деплетированных до содержащих обогащенный компонент



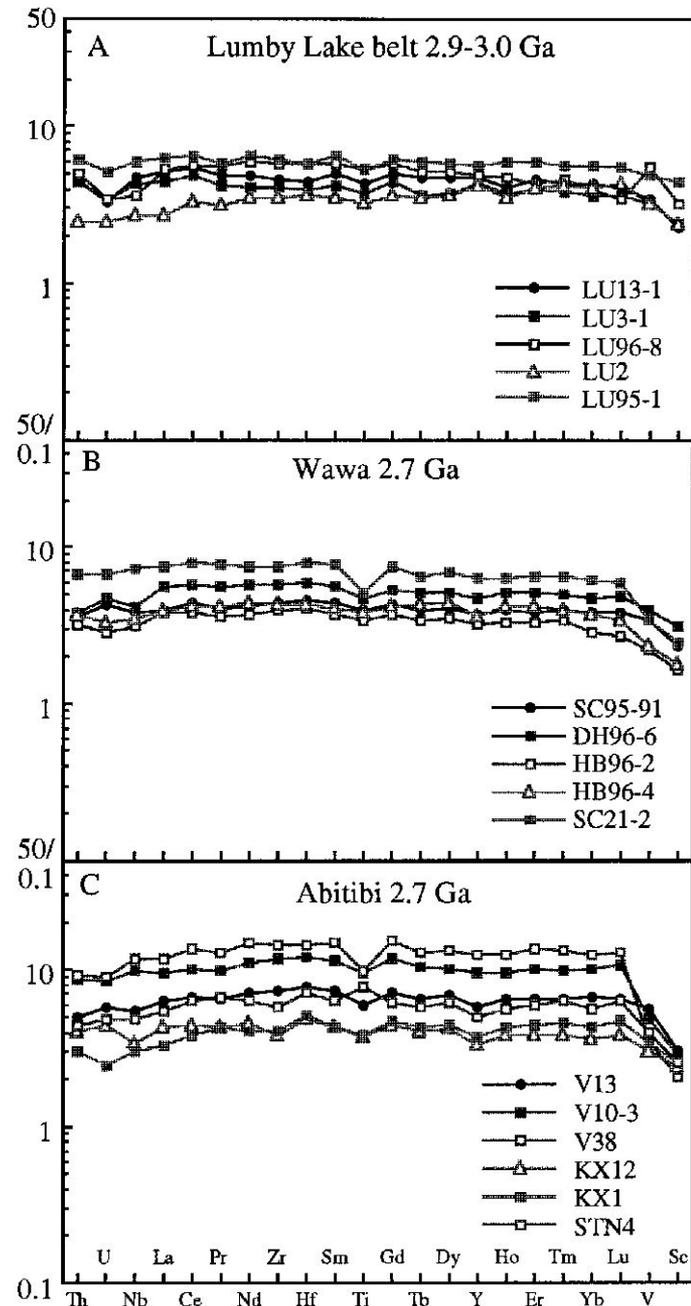
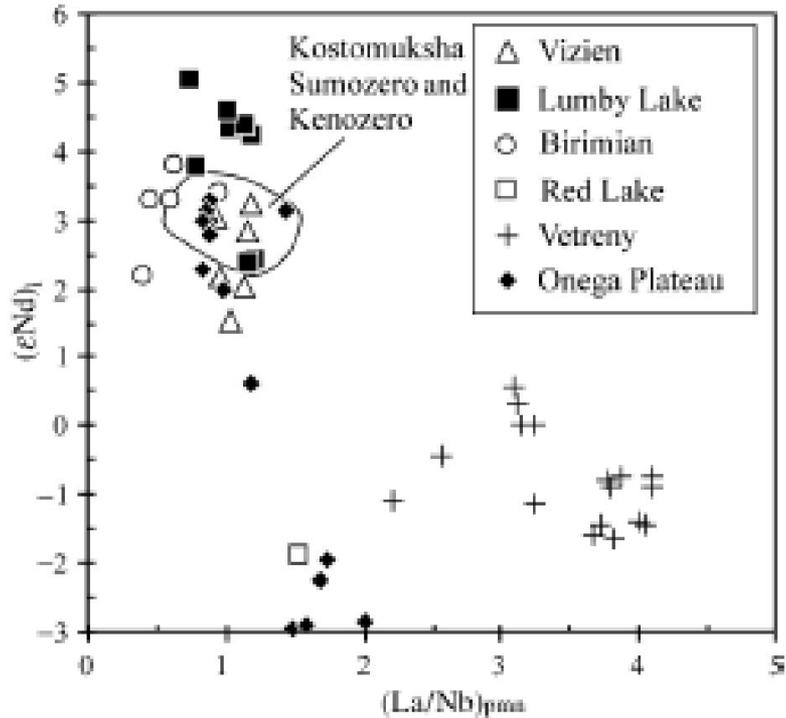
Геохимические особенности базальтов океанических плато объясняют вовлечением в плавление доминирующего материала верхней деплетированной мантии и глубинного мантийного источника, подобного таковому для OIB. Это предположение подтверждается изотопными данными, поскольку базальты плато Онтонг Джава и Карибско-Колумбийского характеризуются положительными величинами ϵ_{Nd} (6-3 и 12-6, соответственно) (Kerr et al., 2000), но более низкими в сравнение с типичными для NMORB.

Океанические плато

Для базальтов плато Кергелен установлены как недифференцированные, так и обогащенные редкоземельные и мультиэлементные спектры (Storey et al., 1992). В составе этой структуры развиты породы нормального и субщелочного ряда широкого диапазона кремнекислотности. Обогащение несовместимыми элементами в сочетании с низкими величинами ϵ_{Nd} (от +5 до отрицательных), позволяет предполагать, что образование этого плато происходило при участии субконтинентальной литосферы или континентальной коры (Frey et al., 2000).



Древние океанические плато



Основные вопросы

- Геохимическая систематика магматических пород
- Петрохимические серии магматических пород
- Базальты разных геодинамических обстановок
- Спрединговые хребты (MORB)
- Внутриплитные обстановки (WPB)
- Базальты океанических островов (OIB)
- Базальты континентальных рифтов и плато-базальты континентов (CRB и CFB)
- Базальты океанических плато (OPB)