



ГЕОХИМИЯ МАГМАТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА 3

Субдукционно-связанные магмы

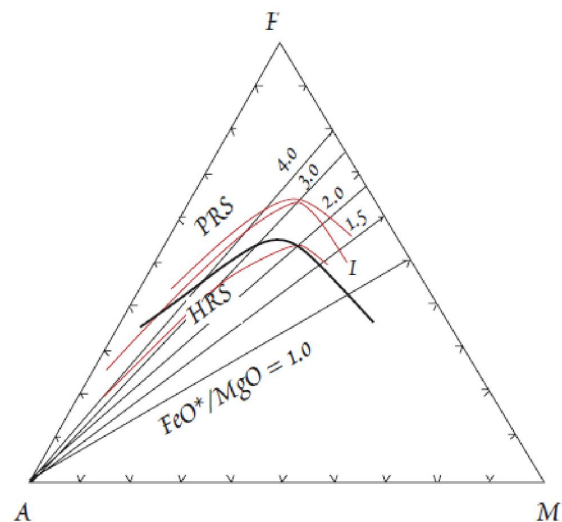
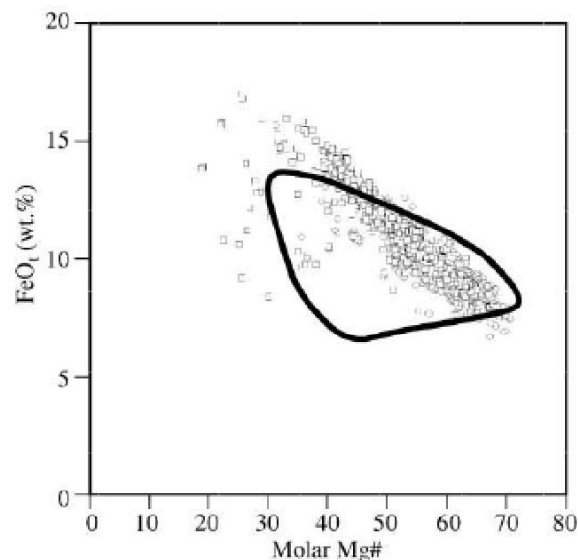
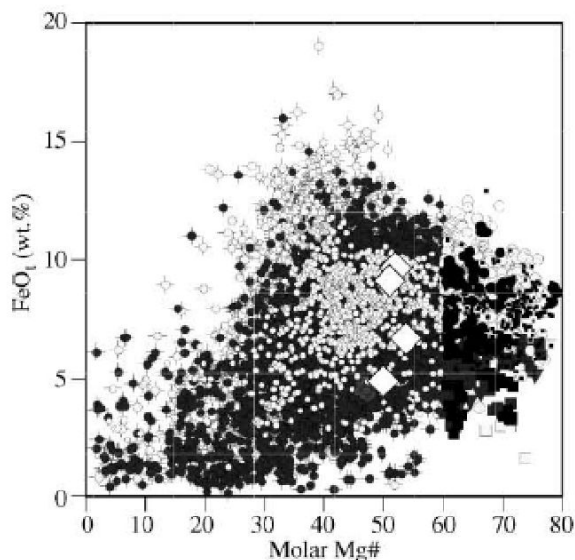
Субдукционные базальты характеризуются:
широким диапазоном кремнекислотности - SiO_2 (45-53%),
повышенным Al_2O_3 (16-20%) и
низким содержанием TiO_2 (1%).

Повышенная титанистость (TiO_2 до 2-2,5%), напротив, характерна для базальтов, образующихся в условиях задугового растяжения.

В отличие от MORB субдукционные базальты чаще имеют низкую магнезиальность и являются кварц-нормативными, что отражает их бóльшую степень дифференциации в промежуточных камерах.

Субдукционно-связанные магмы

В пользу фракционирования магнетита свидетельствует то, что островодужные толеиты не обнаруживают сильного обогащения железом, характерного для MORB. Фракционная кристаллизация может приводить к образованию дифференцированных породных серий от основных до средне-кислых, генетическая связь которых подтверждается сходством в распределении несовместимых элементов и изотопных отношениях. В пределах одной островодужной системы отмечается тесная ассоциация вулканитов толеитовой и известково-щелочной серий. Наиболее примитивные высокомагнезиальные члены этих серий петрохимически практически неотличимы, и обе серии могут иметь один и тот же мантийный источник. Различие между сериями проявляется по более эволюционировавшим членам и обусловлено особенностями фракционной кристаллизации.



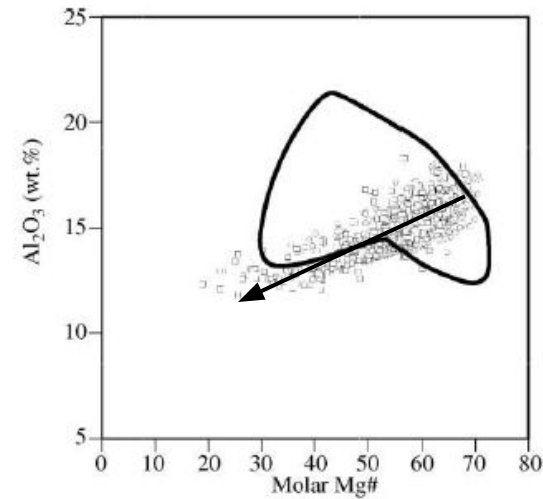
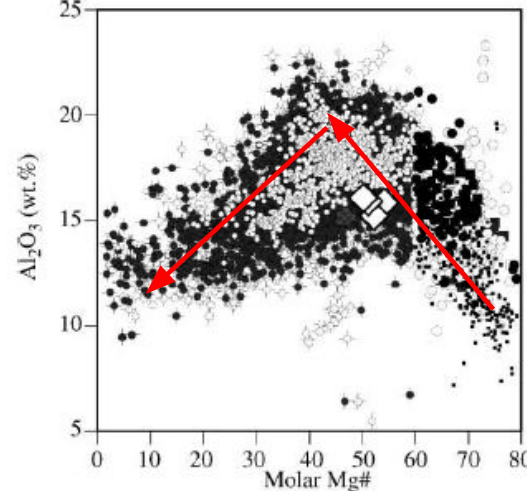
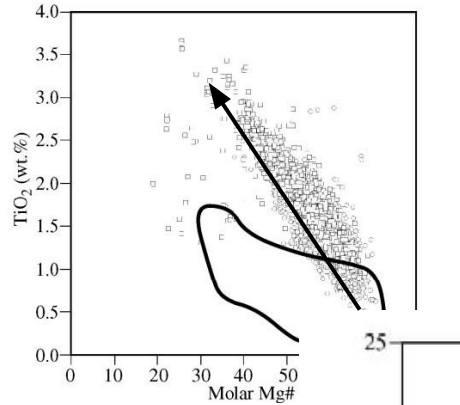
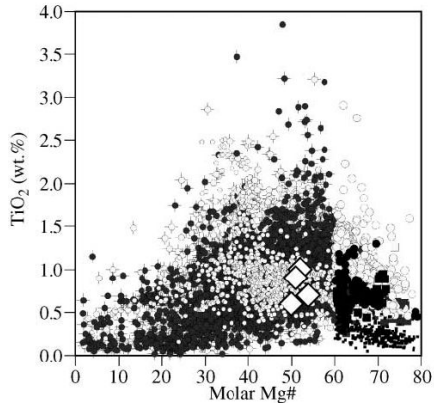
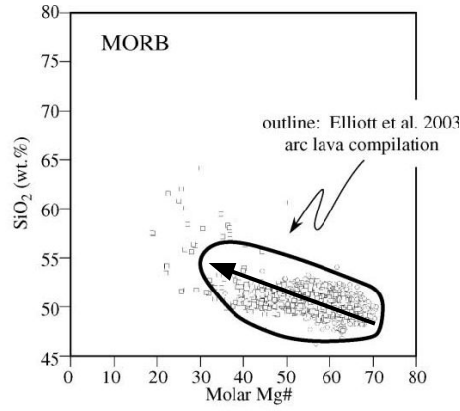
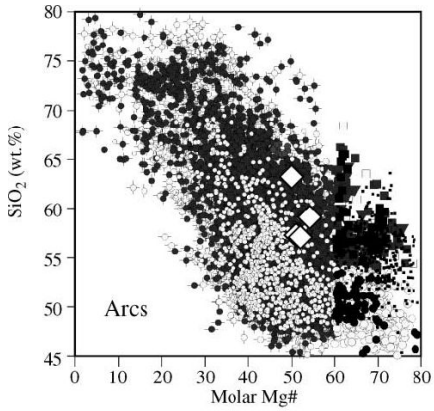
Субдукционно-связанные магмы

Породы толеитовой серии фракционируют на малых глубинах в относительно сухих условиях и при высоких температурах, минорная кристаллизация магнетита приводит к тренду с умеренным обогащением железом. Редкость средних и кислых членов толеитовой серии может быть следствием быстрой транспортировки магмы на поверхность.

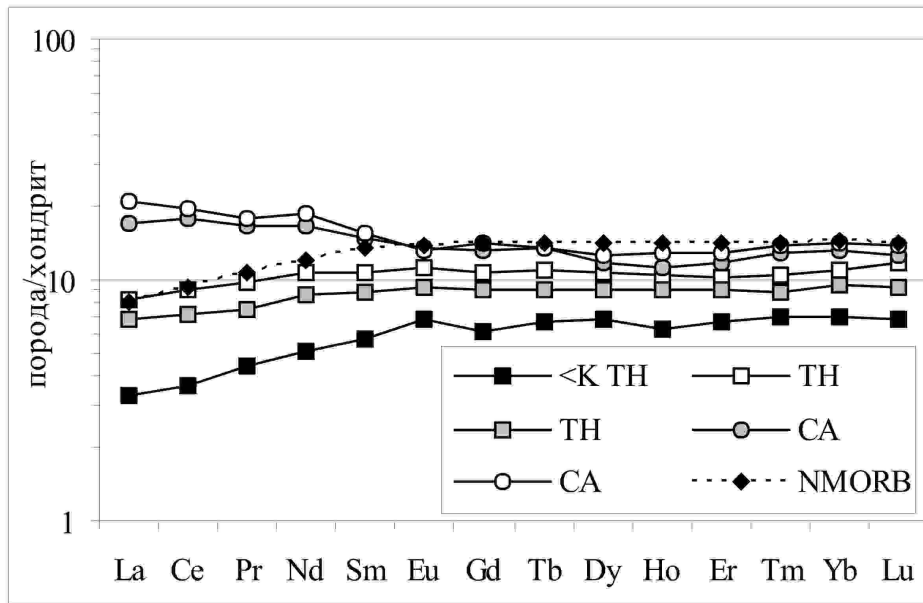
Известково-щелочные магмы, по-видимому, фракционируют в более глубинных камерах и при большем содержании H_2O , о чем свидетельствует присутствие фенокристов водосодержащих минералов (амфибол и др.), а кристаллизация магнетита подавляет обогащение железом. Таким образом, различия в глубине дифференциации и содержании H_2O могут приводить к существованию двух магматических серий в островодужных системах.

Субдукционно-связанные магмы

Островодужные вулканы имеют некоторые черты петрогенезиса отличные от MORB. Низкие содержания TiO_2 и быстрое снижение CaO/Al_2O_3 при уменьшении Mg предполагают фракционирование оливина, клинопироксена и магнетита/ильменита в мало-среднеглубинных камерах, тогда как для MORB главными фракционирующими фазами являются оливин и плагиоклаз.



Субдукционно-связанные магмы

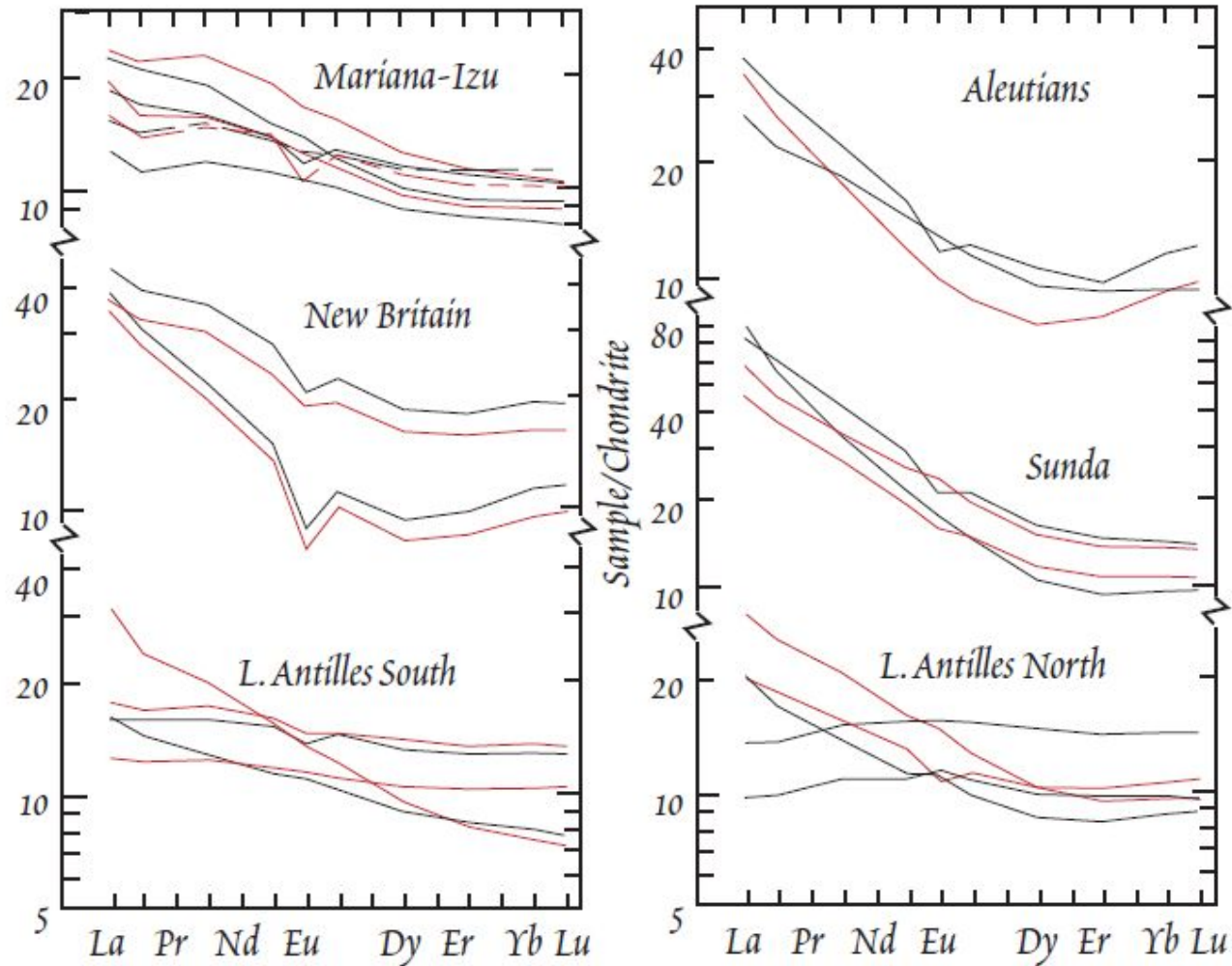


Характер распределения редкоземельных элементов в субдукционных базальтах существенно не отличается от такового для MORB и OIB. Спектры РЗЭ субдукционных базальтов изменяются от слабо деплетированных, сходных с NMORB в островодужных толеитах до в различной степени обогащенных легкими лантаноидами для известково-щелочных базальтов.

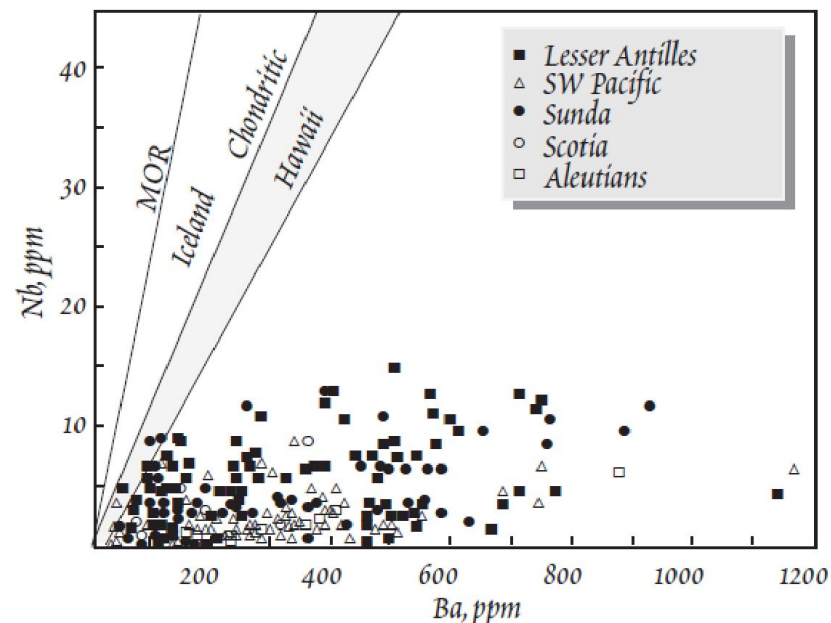
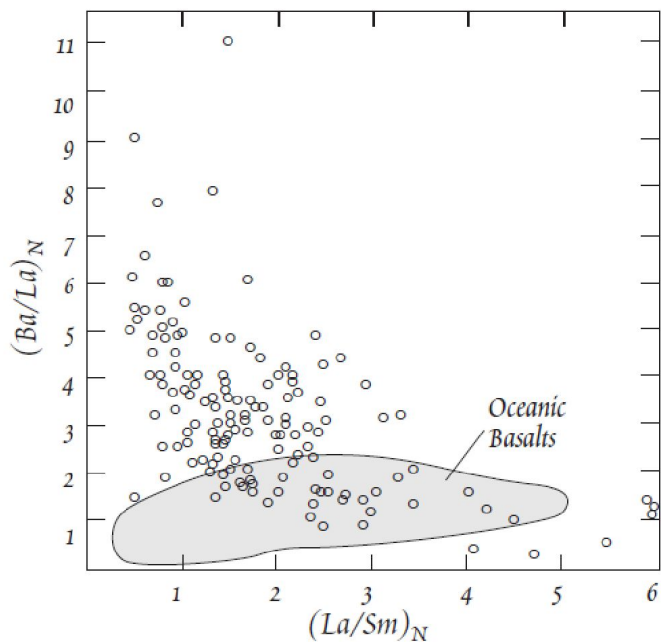
Например, для пород Южно-Сандвичевой островной дуги установлен рост концентраций и увеличение $(La/Yb)_n$ в ряду от низкокалийевых толеитов к толеитам и известково-щелочным базальтам (Pearce, et al., 1995). Следует отметить, что для островодужных толеитов типичен весьма низкий уровень концентраций РЗЭ в целом, что вероятно обусловлено более высокой степенью плавления, чем при образовании MORB или большим обеднением некогерентными элементами перидотитов мантийного клина в сравнение с источником для MORB.

Рост концентраций РЗЭ и $(La/Yb)_n$ от низкокалийевых толеитов к толеитам и известково-щелочным базальтам

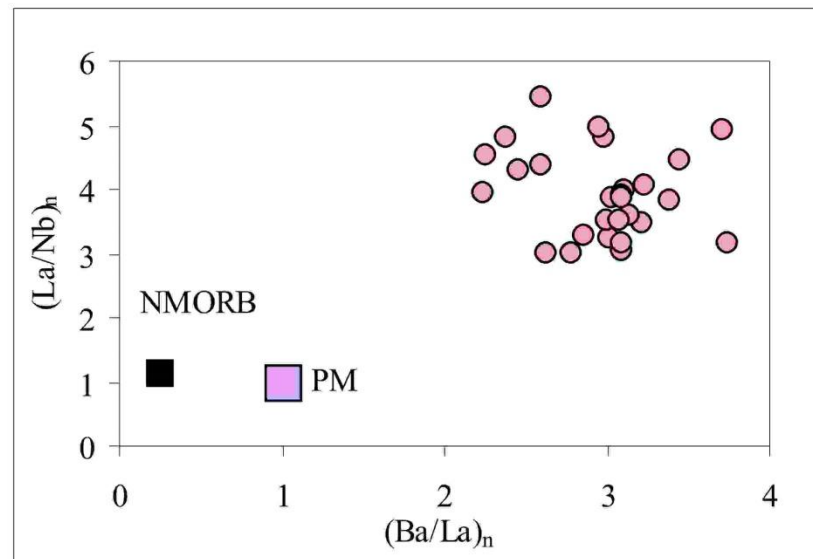
Субдукционно-связанные магмы



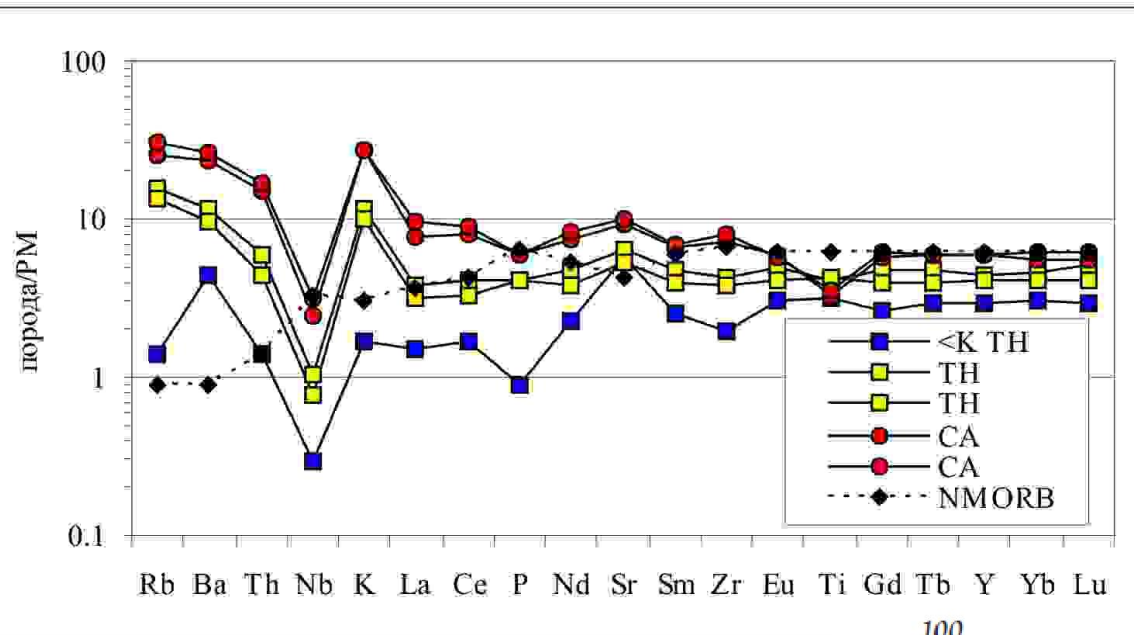
Субдукционно-связанные магмы



Субдукционные вулканы отличаются от MORB отчетливое **обогащение LILE** (Rb, Ba, K), а также Sr, Pb относительно легких РЗЭ и высокозарядных элементов, таких как Nb (Ta). Указанная группа элементов (LILE, Sr, Pb) относится к мобильным в водном флюиде в отличие от относительно инертных РЗЭ и HFSE.

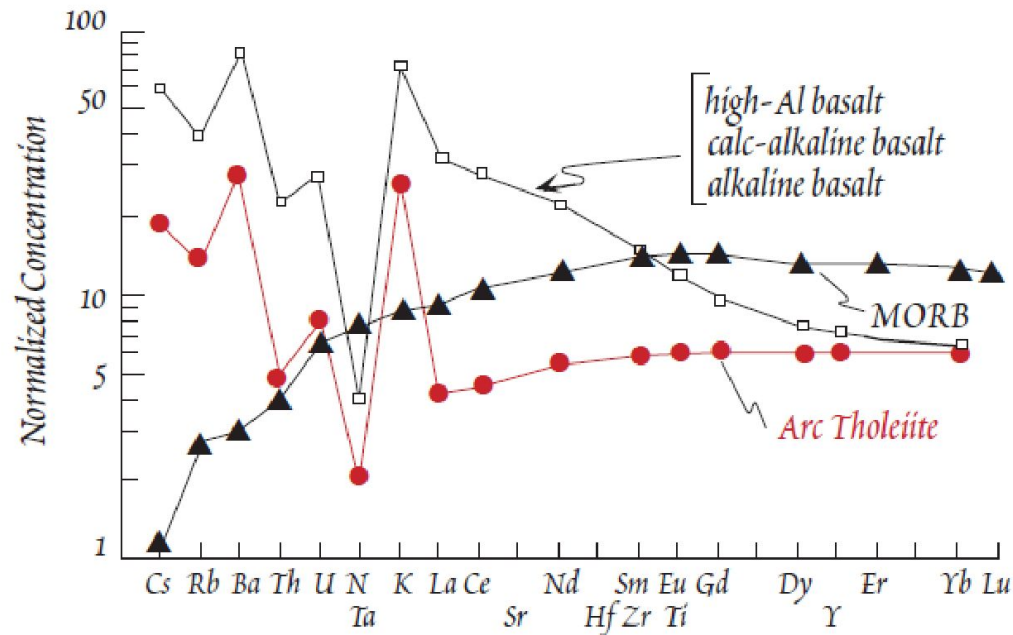


Субдукционно-связанные магмы

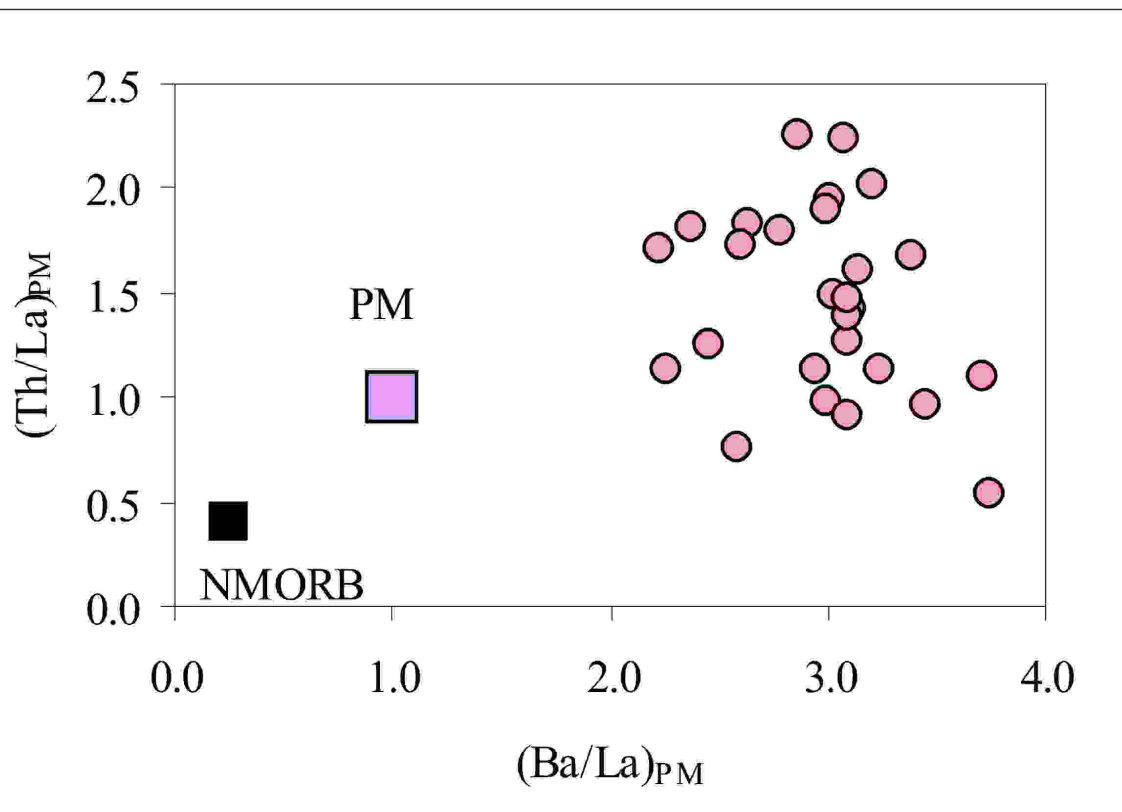


Обогащение LILE и
обеднение Nb(Ta)

Другая характерная черта островодужных базальтов это **обедненность Nb (Ta)** относительно LILE и легких РЗЭ, что обуславливает $(La/Nb)_{PM} > 1$. Следует отметить, что субдукционные вулканы не только обладают Nb (Ta) минимумом на мультиэлементных спектрах, но и общий уровень содержания этих элементов во многих случаях ниже, чем в NMORB

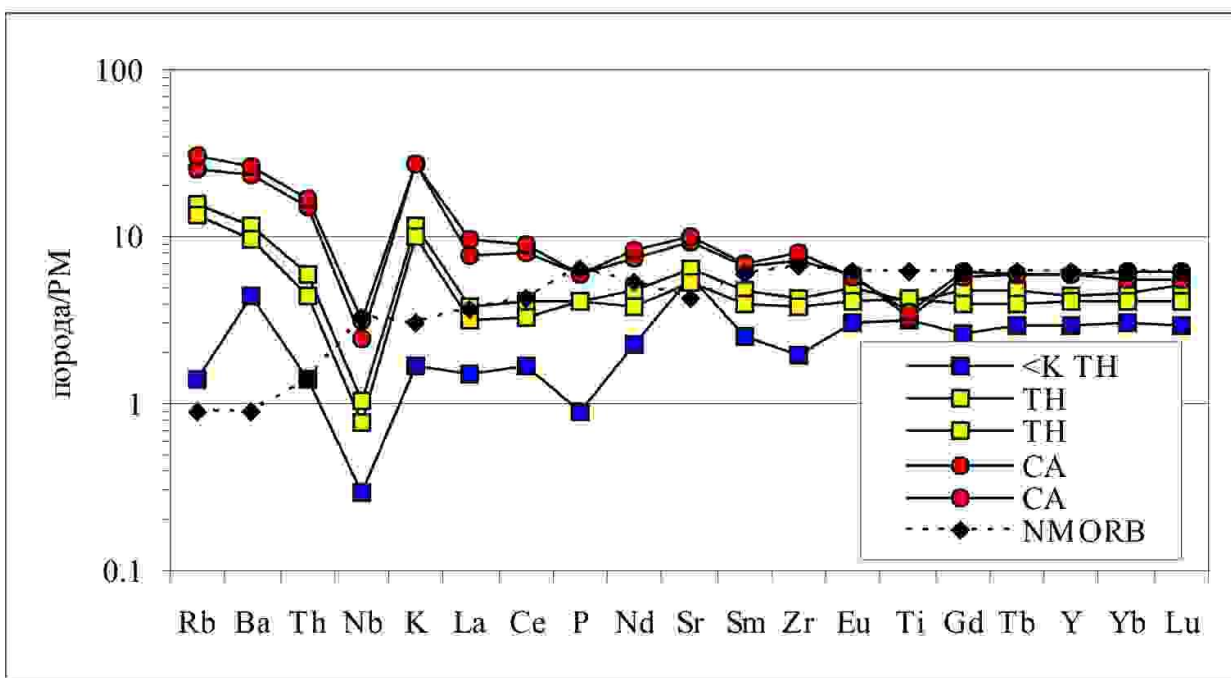


Субдукционно-связанные магмы



Преимущественное обогащение относительно легких РЗЭ установлено также для **Th**, который относится к числу более инертных элементов.

В отличие от большинства субдукционных базальтов с $(Th/La)_{PM} > 1$, для низкокалийевых толеитовых базальтов величина $(Th/La)_n$ меньше 1.



Среди субдукционных вулканитов выделяют толеитовые (IAB – island arc basalt) и известково-щелочные базальты островных дуг (CABI – calc-alkaline island arc basalt) и активных континентальных окраин (CABM – continental-margin arc basalt).

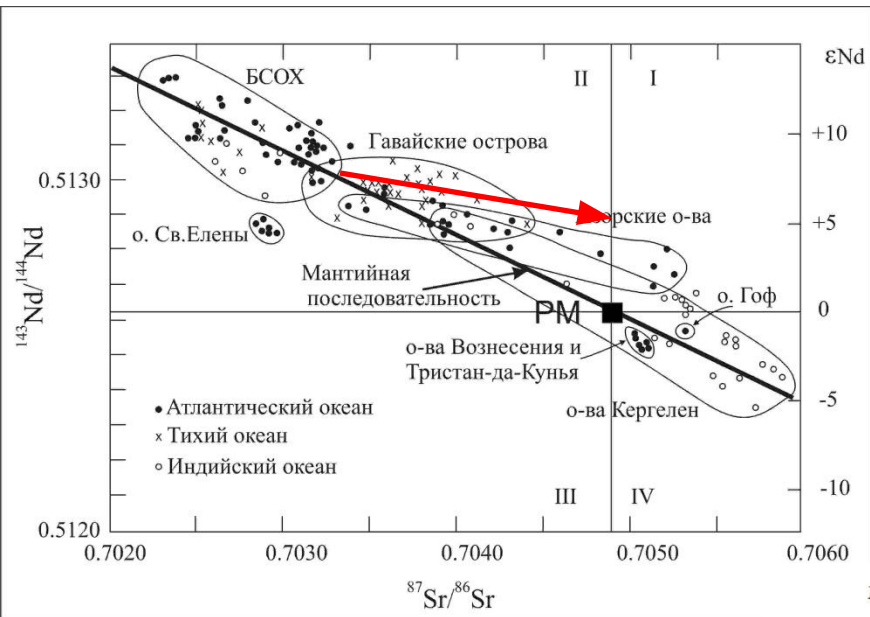
Первые типичны для незрелых океанических островных дуг и обладают умеренным обогащением LILE, умеренной Nb-Ta аномалией и нефракционированным распределением PЗЭ и HFSE относительно NMORB. Они также отличаются от NMORB по низкому содержанию Ni и Cr при близком магнетиальном номере.

Известково-щелочные базальты окраинно-континентальных (энсиалических) дуг и активных континентальных окраин (CABI и CABM) имеют большее обогащение LILE и увеличивающуюся Nb-Ta аномалию, а также все более отчетливое фракционирование LREE относительно HREE (повышенное La/Yb).

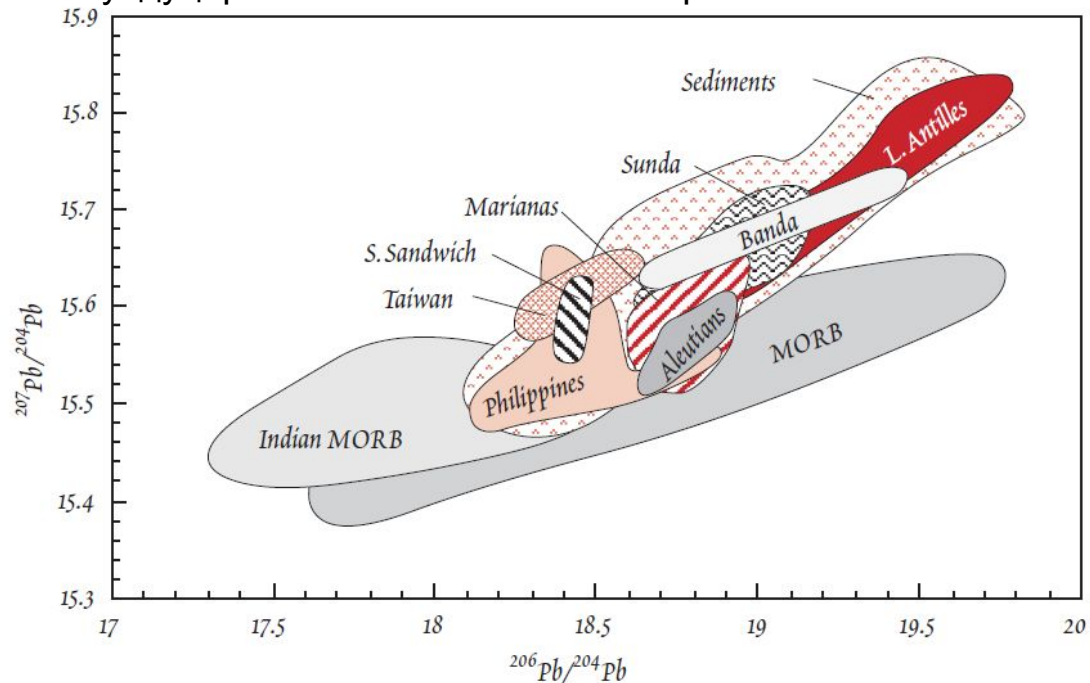
Андезиты и более кислые вулканиты имеют распределения редких элементов подобные ассоциирующим с ними базальтам, но с влиянием процессов фракционной кристаллизации, то есть ростом содержания некогерентных элементов.

Субдукционно-связанные магмы

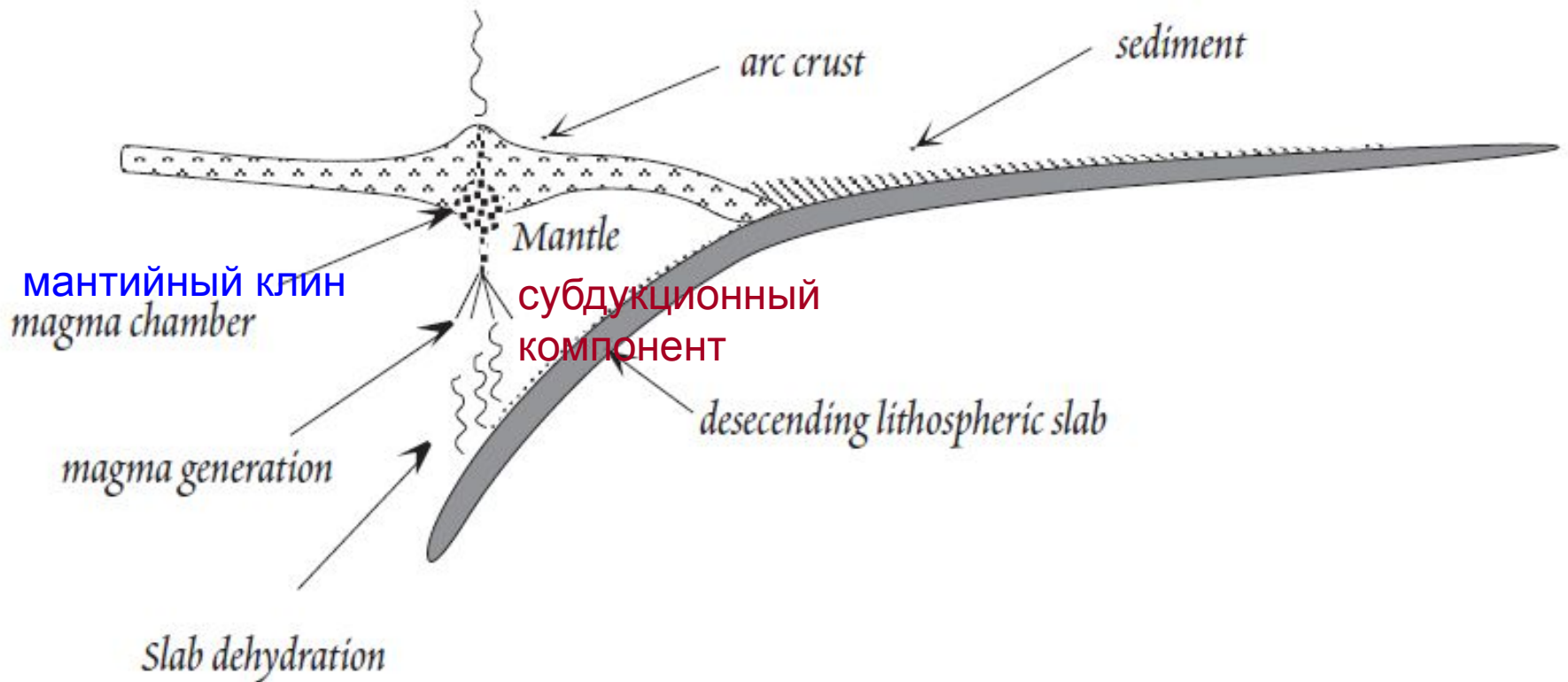
Субдукционные базальты имеют более низкие значения ϵNd и повышенные $87Sr/86Sr$, что свидетельствует о невозможности их образования из такого же, как для NMORB, мантийного источника или путем переплавления океанической коры в зоне субдукции. Средние величины для базальтов океанических дуг составляют: $\epsilon Nd = 8$ и $87Sr/86Sr = 0.7033$. Для субдукционных базальтов отмечается тенденция к повышенному $87Sr/86Sr$ для данного ϵNd в сравнении с океаническими базальтами, то есть смещение с линии мантийной последовательности. Это рассматривается как вклад в образование островодужных магм флюидов, отделенных от субдуцированной океанической коры.



Субдукционные базальты перекрываются с океаническими по величинам $^{206}Pb/^{204}Pb$, но обладают более высокими $^{207}Pb/^{204}Pb$ отношениями, достигающими значений для океанических осадков. По данным (Karig, Kay, 1980) для большинства островных дуг изотопные отношения Pb вулканитов находятся между величинами для MORB и локальных осадков вблизи дуги.



Источники субдукционных магм



Имеются два основных источника, определяющих состав субдукционных магм: **мантийный клин** и **субдукционный компонент**.

Источники субдукционных магм – мантийный

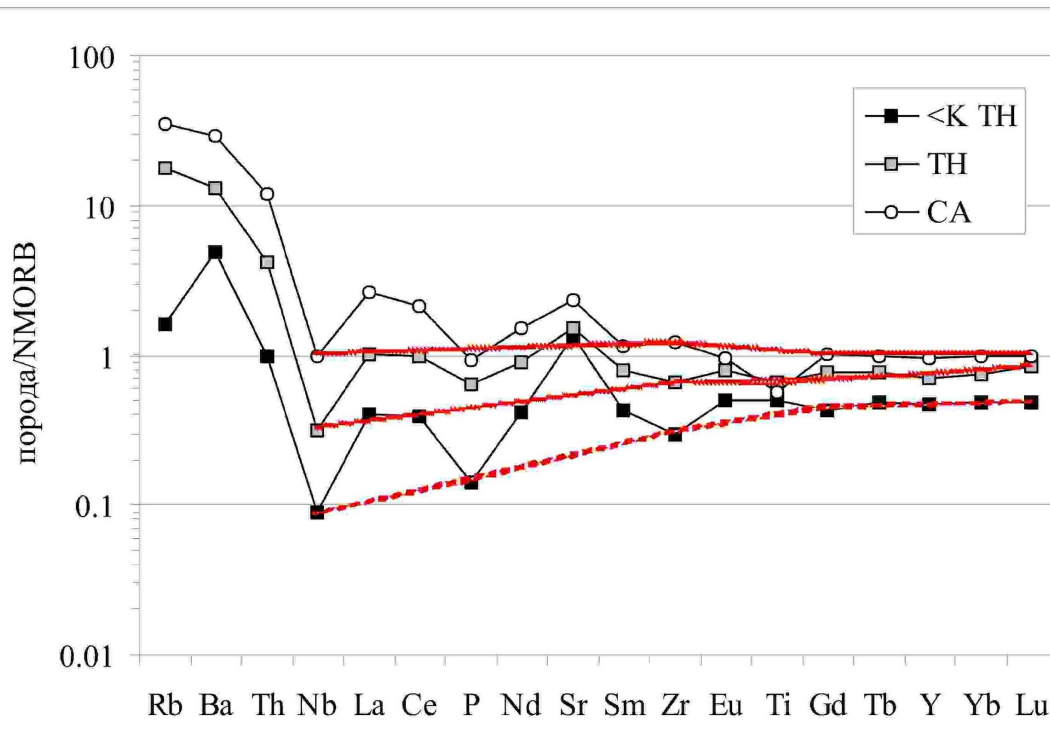
КЛИН

Влияние разных источников на состав базальтов может быть выявлено при нормировании состава вулканитов на NMORB. В зависимости от величин коэффициентов распределения между мантийными перцолитами и водным флюидом редкие элементы могут быть разделены на:

консервативные (инертные) (Ti, HREE, HFSE),

умеренно неконсервативные (LREE, Th)

сильно неконсервативные (Rb, Ba, Sr, Pb, K).



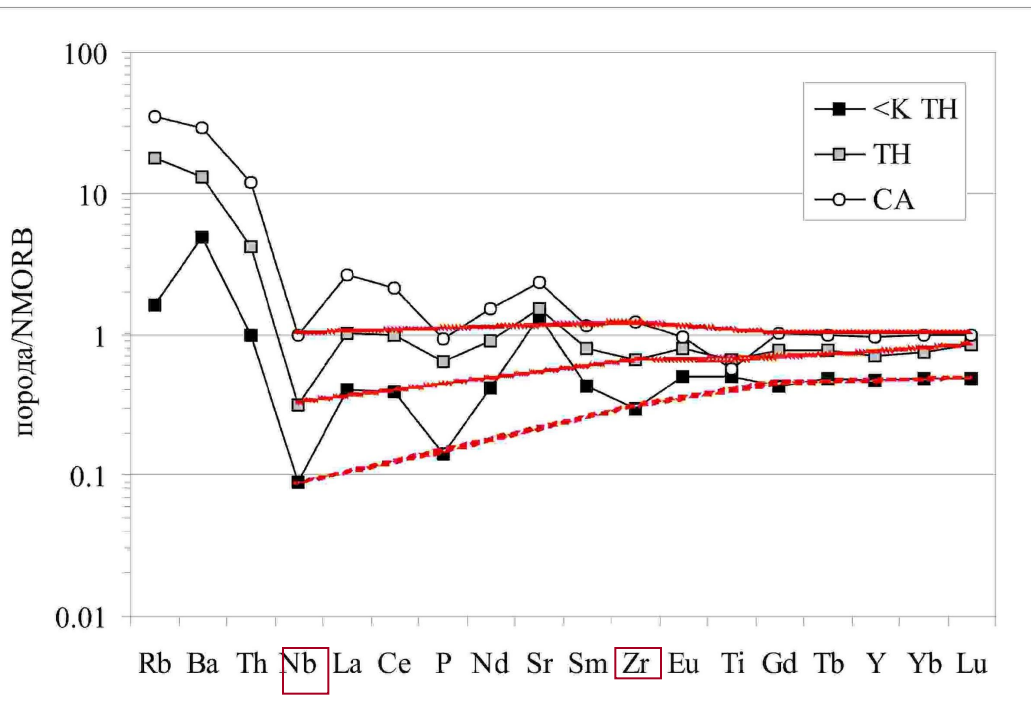
Консервативные элементы не перераспределяются при дегидратации субдуцирующей плиты в мантийный клин, следовательно, они **отражают состав перидотитов мантийного клина.**

В соответствии с наклоном левой части линии мантийный источник может быть деплетированным, недеплетированным или обогащенным относительно мантии, продуцирующей MORB. Для большинства примитивных субдукционных вулканитов установлен деплетированный характер их мантийного источника и даже более деплетированный в сравнение с источником MORB.

Линии, проведенные через консервативные элементы, характеризуют состав мантийного источника.

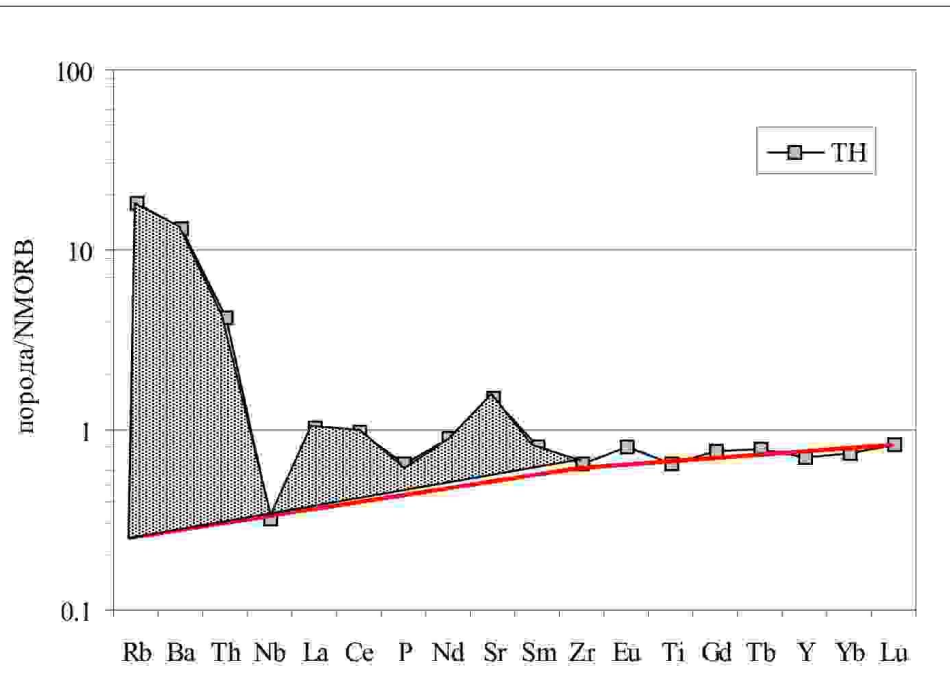
Источники субдукционных магм – степень деплетирования мантийного клина

Zr/Nb отношение в большинстве островодужных вулканитов (10-70) превышает значения для MORB (10-40), что в сочетании с величинами коэффициентов распределения перидотит/расплав $D_{Zr} > D_{Nb}$, указывает на более деплетированный характер мантийного источника (Davidson, 1996). Широкий диапазон Zr/Nb в субдукционных базальтах не может быть объяснен вариациями в степени плавления и отражает различие состава мантийных источников вулканитов.



Большее, чем для MORB обеднение мантийного источника по-видимому предшествовало образованию субдукционных вулканитов, в некоторых случаях предполагается, что оно было связано с плавлением при задуговом спрединге (Woodhead et al., 1993).

Субдукционный компонент



Обогащение элементами, располагающимися выше базовой линии, проходящей через инертные в водном флюиде элементы обусловлено вкладом субдукционного компонента.

Оценки вклада субдукционного компонента в образование островодужных базальтов Южно-Сандвичевой островной дуги изменяются от малого (Nd - 20%) и умеренного (La, Ce, Sr - 50-80%) до доминирующего (Pb, K, Ba, Rb >90%) (Pearce et al., 1995).

в качестве субдукционного компонента рассматриваются:

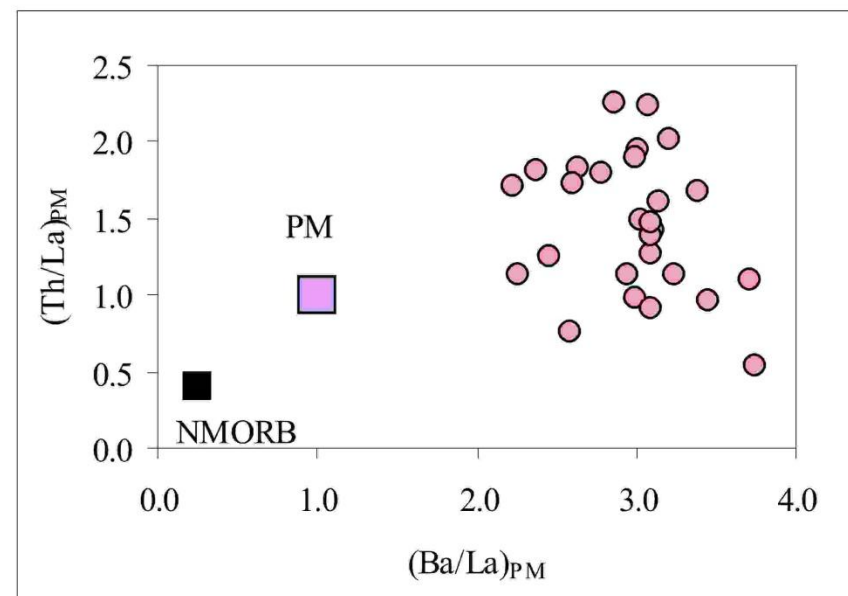
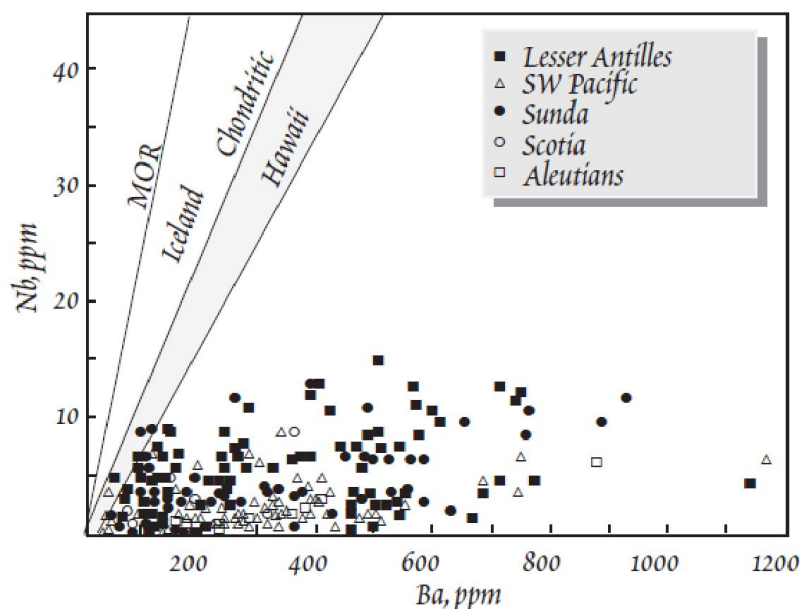
1. водные флюиды, отделяющиеся от гидратированных базальтов или осадков погружающейся плиты;
2. расплавы, образующиеся из базальтов или осадков субдуцирующей плиты.

Дегидратация - Высоко неконсервативные элементы (Cs, Rb, Ba, K, Pb, Sr, U) обогащают мантийный клин за счет воздействия флюидов, отделяющихся от дегидратирующихся базальтов или осадков, что определяет аномалии над базовой линией.

Плавление - Если термальные условия приводят к плавлению, тогда умеренно неконсервативные Th, LREE, имеющие низкие коэффициенты распределения переходят в расплав, что приводит в результате его взаимодействия с перидотитами к обогащению мантийного клина.

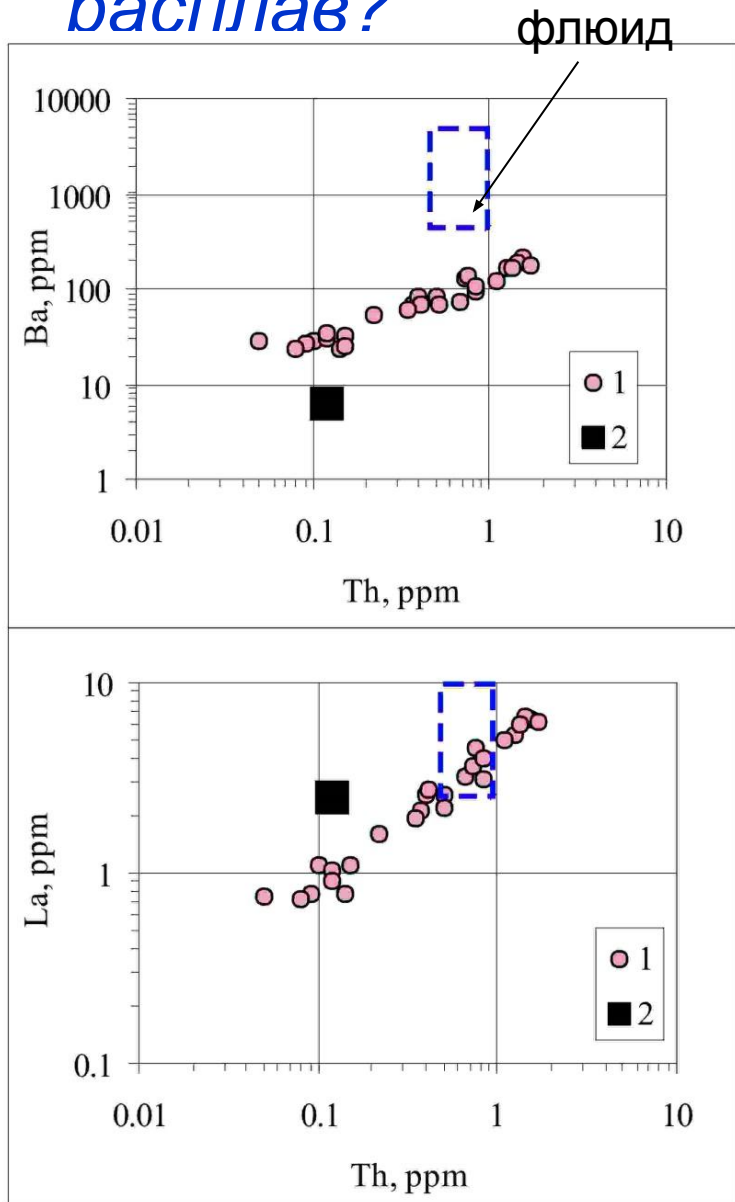
Субдукционный компонент: флюид или расплав?

Воздействию водного флюида на породы мантийного клина традиционно приписывается обогащение субдукционных базальтов сильно неконсервативными элементами относительно умеренно неконсервативных (легкие РЗЭ, Th), что приводит, к высоким отношениям Ba/La, Pb/Ce, Sr/Nd



Повышенное содержание H₂O в субдукционных вулканитах в некоторых случаях коррелирует с содержанием сильно неконсервативных редких элементов. Вода рассматривается в качестве агента, стимулирующего плавление мантийного клина. Источником водного флюида служит дегидратация пород океанической коры, ранее измененных при взаимодействии с морской водой, и субдуцированных осадков. С влиянием водного флюида связывают и высокие изотопные отношения кислорода в островодужных базальтах, унаследованные от гидротермально измененных пород океанической коры.

Субдукционный компонент: флюид или расплав?

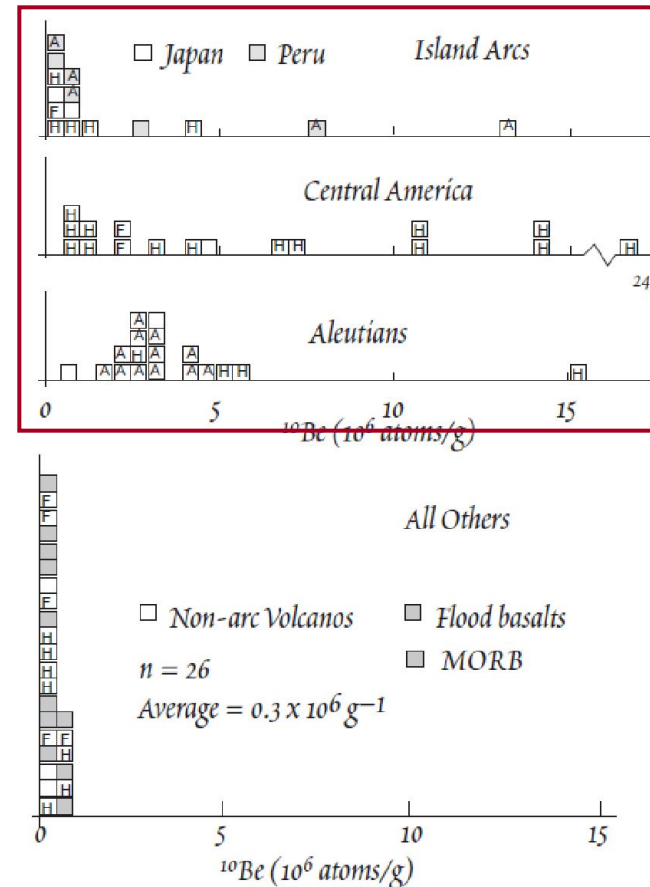
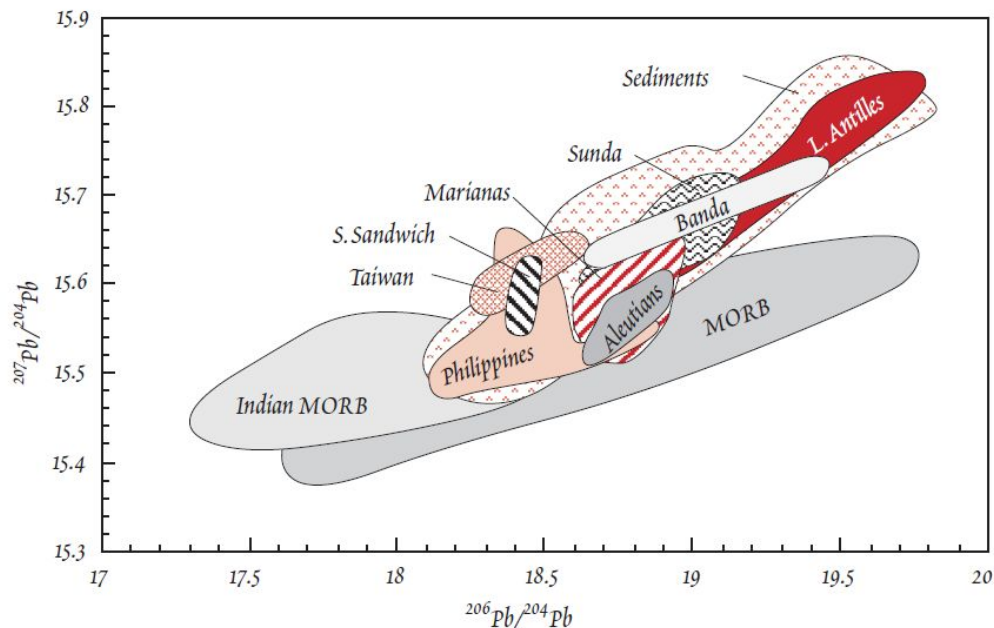


В отличие от сильно неконсервативных элементов влияние водного флюида не может объяснить обогащение субдукционных базальтов умеренно неконсервативными элементами, такими как Th и легкие РЗЭ.

Оценки состава флюида показывают, что его величины Ba/Th значительно превышают таковые для субдукционных базальтов, тогда как значения La/Th для флюида соответствуют островодужным базальтам.

Следовательно, вклад флюида в магмообразование должен значительно повысить Ba/Th, не оказывая влияния на величину La/Th. Добавка расплава, повышая концентрации, не приведет к их относительному фракционированию. Указанные соотношения для умеренно и сильно неконсервативных элементов свидетельствуют в пользу влияния на перидотиты мантийного клина расплава.

Источники флюида/расплава – терригенные осадки



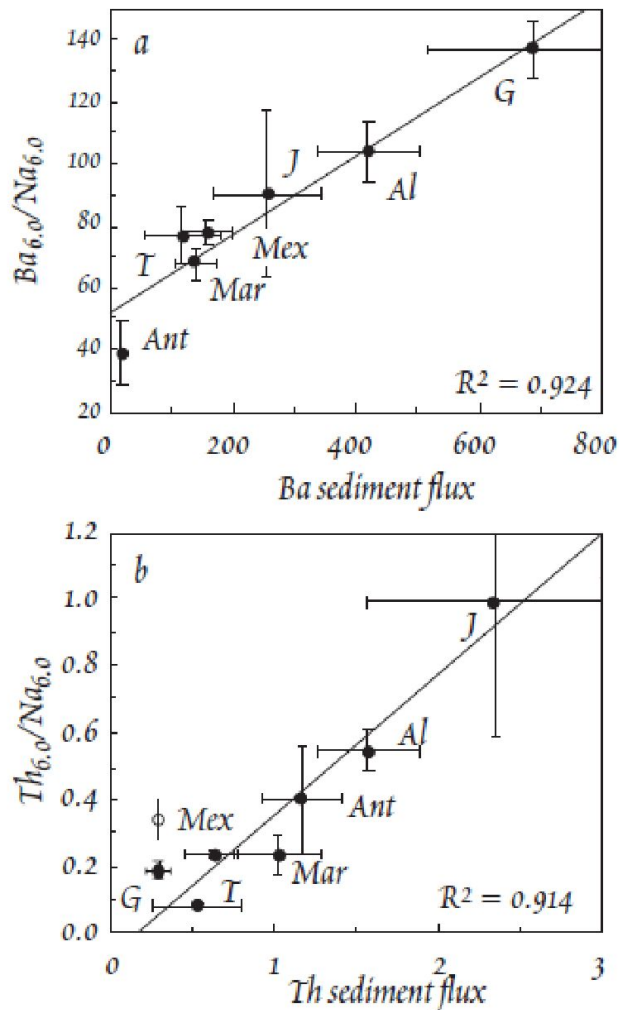
В качестве источника расплава рассматриваются прежде всего осадки, о чем свидетельствуют изотопные характеристики вулканитов. Для большинства островных дуг изотопные отношения $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ вулканитов находятся между величинами для MORB и локальных осадков вблизи дуги. В виду высоких концентраций Pb в осадках, даже их малый вклад (2-3%) приводит к значительному росту $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для вулканитов.

Важным индикатором участия осадков в магмообразовании служит и наличие в молодых островодужных базальтах космогенного изотопа ^{10}Be , накапливающегося в морской воде, а затем и пелагических осадках (Brown et al., 1982).

Источники расплава – терригенные осадки

Влиянием расплава из осадков может быть объяснено пониженное $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и повышенное $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ относительно MORB для островодужных базальтов.

Т. Планком показана устойчивая корреляция между Th/La в вулканитах и локальных осадках вблизи дуг (Plank, 2005). Это предполагает, что субдуцированные осадки контролируют величину Th/La в островодужных магмах.



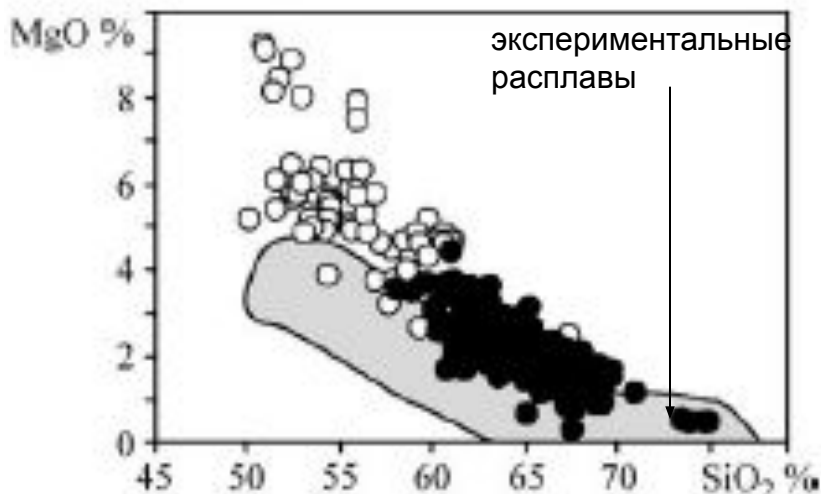
Источники расплава –

эклогитизированные базальты

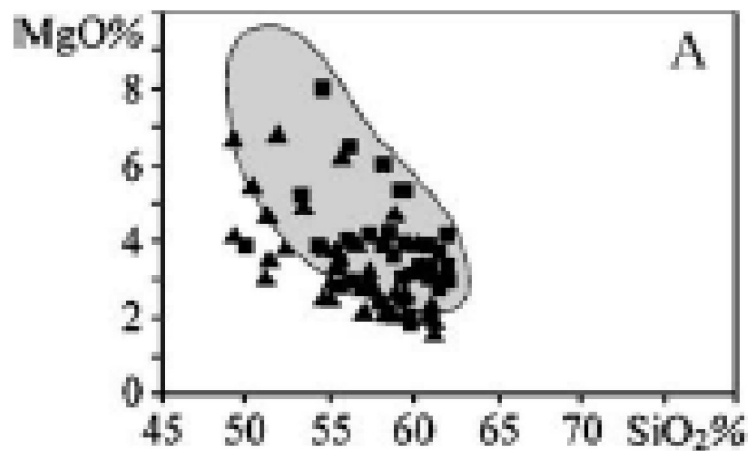
Наряду с осадками плавлению могут подвергаться и эклогитизированные базальты погружающейся плиты. С этим процессом связывают образование низкокалевых вулканитов средне-кислого состава – адакитов в «горячих» зонах субдукции, где погружается «молодая» океаническая кора. Среди адакитов выделяют **низко- и высококремнистые различия**, первые отличаются повышенным содержанием **MgO, Cr, Ni**. Образование высокомагнезиальных различий адакитов рассматривается как следствие взаимодействия расплава из эклогитизированных базальтов с перидотитами магматического клина. В редких случаях в ассоциации с адакитами установлены высоко-Nb базальты, формирование которых могло быть связано с плавлением мантийных перидотитов, испытавших воздействие адакитового расплава.

Перидотиты, преобразованные под действием адакитовых расплавов, могут служить источником санукитоидов.

Адакиты



Санукитоиды



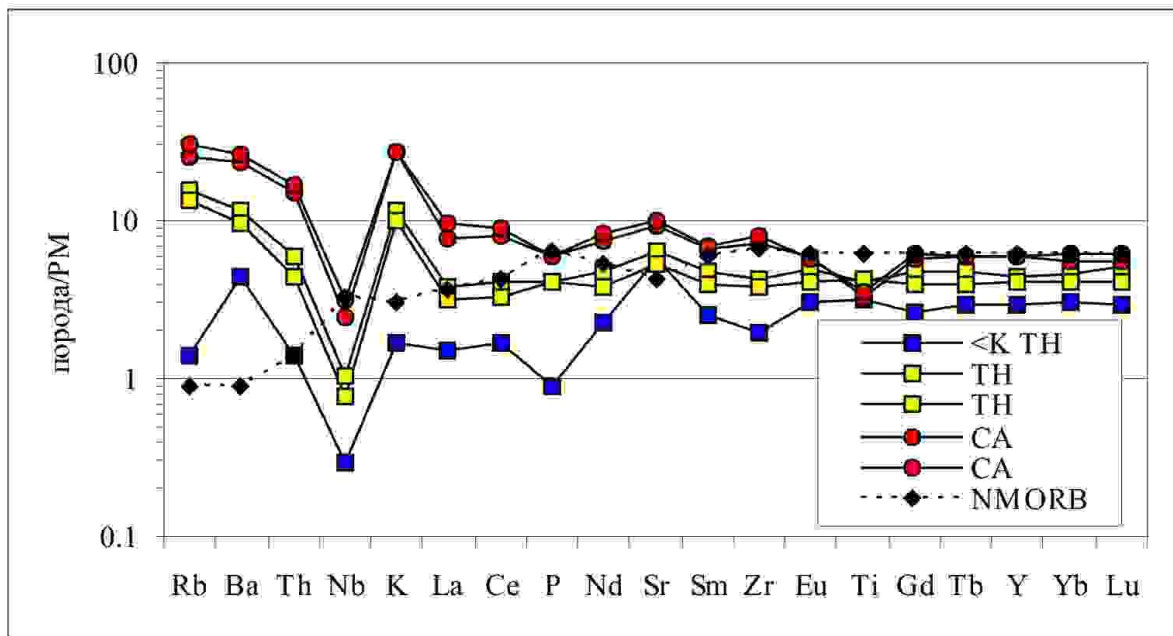
Источники субдукционных магм

- Мантийный клин – инертные редкие элементы (HFSE, HREE)
- Субдукционный компонент:
- Флюид – сильно неконсервативные редкие элементы (LILE, Sr)
- Расплав – умеренно неконсервативные редкие элементы (Th, LREE)

Причины Nb (Ta) минимума в субдукционных вулканитах

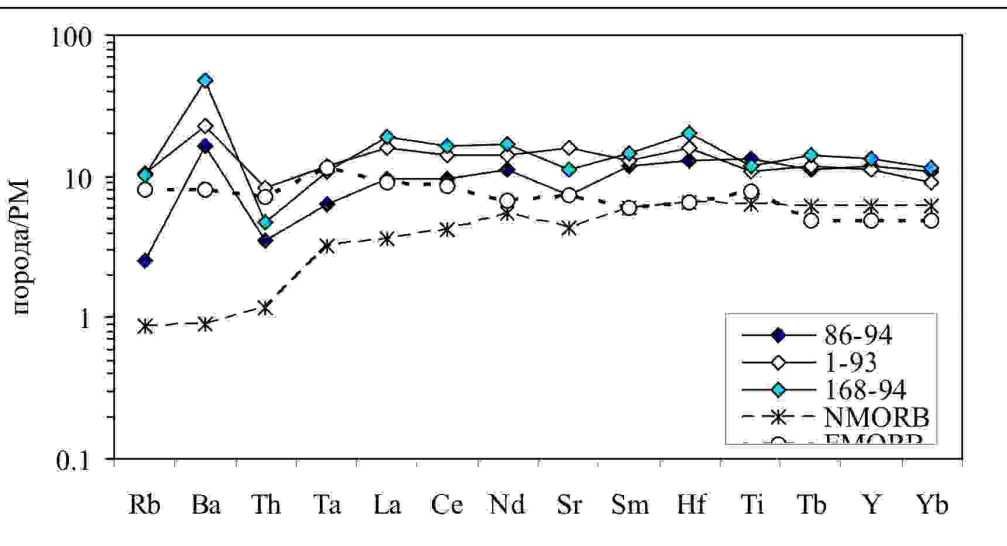
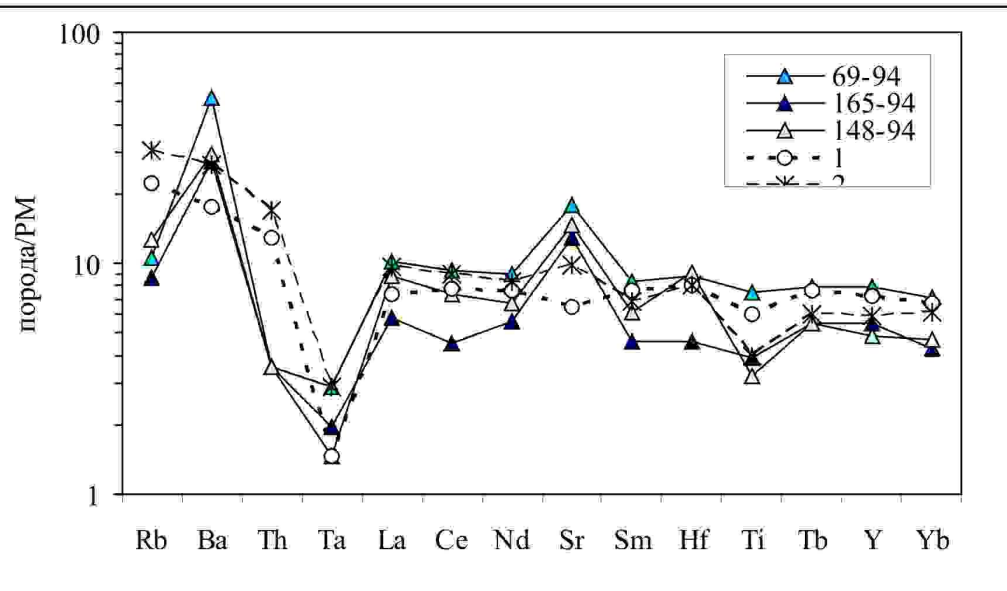
Для объяснения Nb минимума рассматривается:

1. фракционирование богатых Ti водосодержащих силикатов, таких как флогопит или роговая обманка,
2. наличие титановых фаз (рутил, сфен) в мантийном клине,
3. относительная немобильность Nb (Ta) в сравнение с РЗЭ и другими элементами в водном флюиде,
4. унаследование низких Nb/Th (Ta/Th) от субдуцированных осадков,
5. присутствие рутила в рестите от плавления субдуцированного материала.



Фракционирование Nb от других высоко несовместимых элементов - результат плавления субдуцированных эклогитовой фации базальтов или осадков при наличии рутила среди реститовых фаз. **Общий низкий уровень концентраций Nb - большая степень деплетированности их мантийного источника и более высокая степень плавления в сравнение с MORB.**

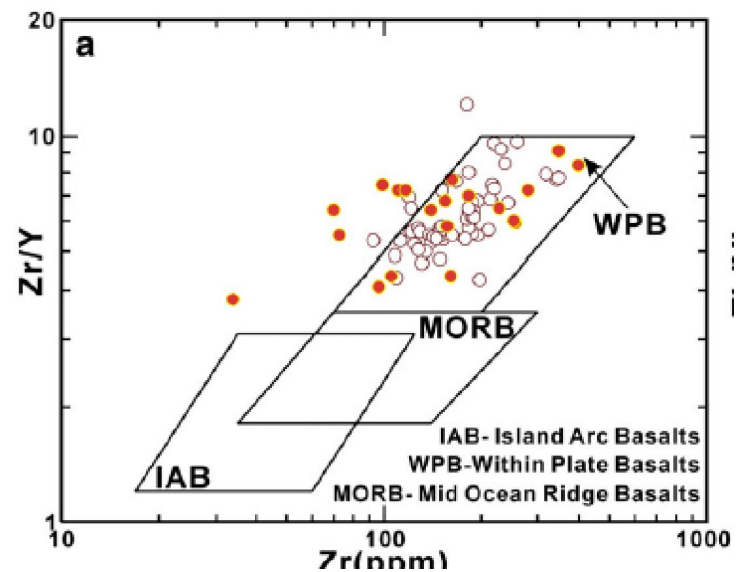
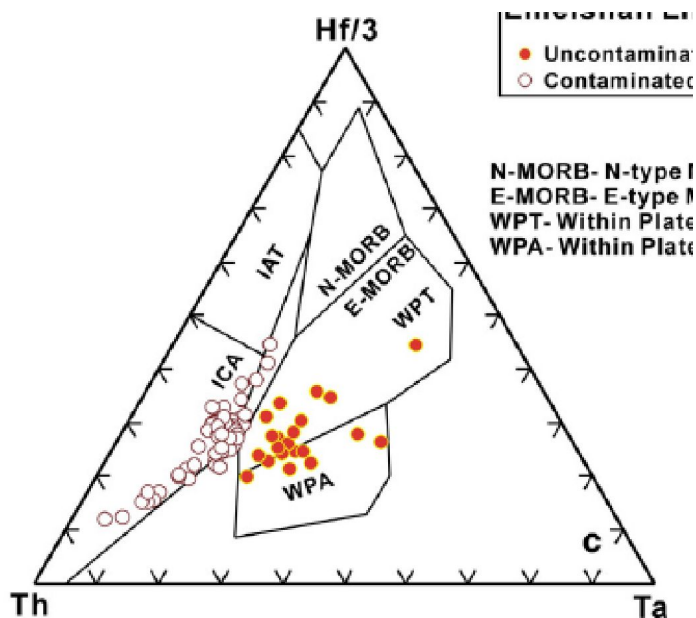
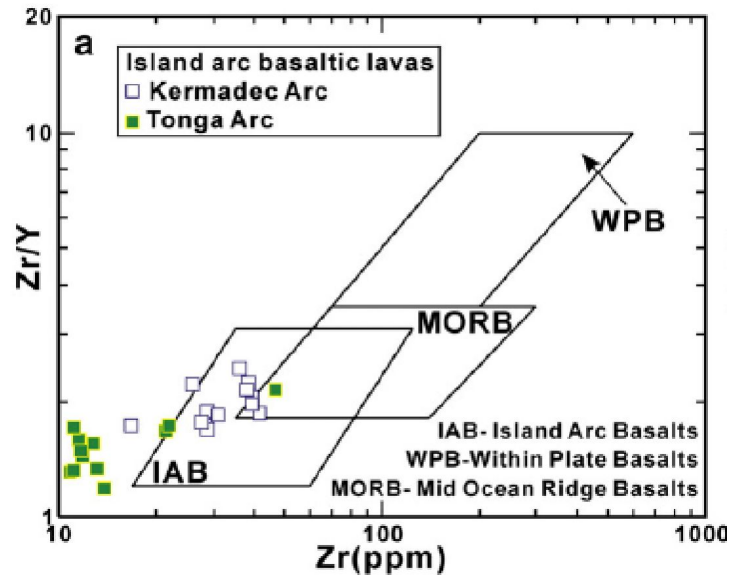
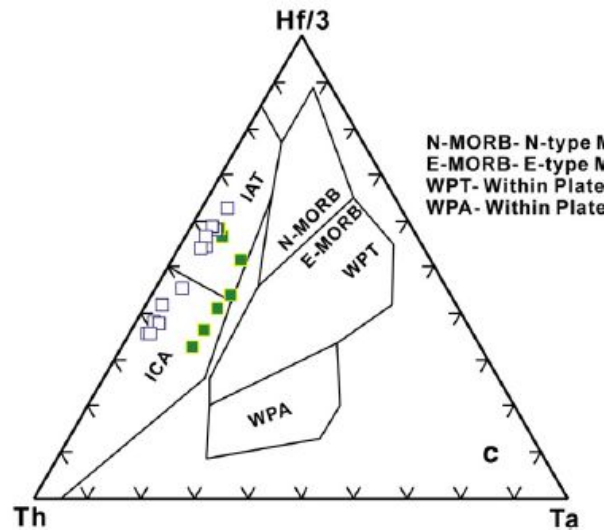
Базальты задуговых бассейнов



Базальты задуговых бассейнов обладают составами промежуточными между NMORB-подобными и островодужными толеитами, а также присутствуют и эти конечные члены. Высокое содержание H_2O подавляет фракционирование плагиоклаза, что приводит к увеличению содержания Al_2O_3 и сдерживает накопление Fe_2O_3 и TiO_2 . Соответственно, хотя Fe_2O_3 и TiO_2 относительно MgO образуют тренды очень похожие на MORB, тренды часто смешены к более низким содержанием Fe_2O_3 и TiO_2 , подобно островодужным базальтам.

Нет обеднения Nb/Ta, но есть обогащение LILE.

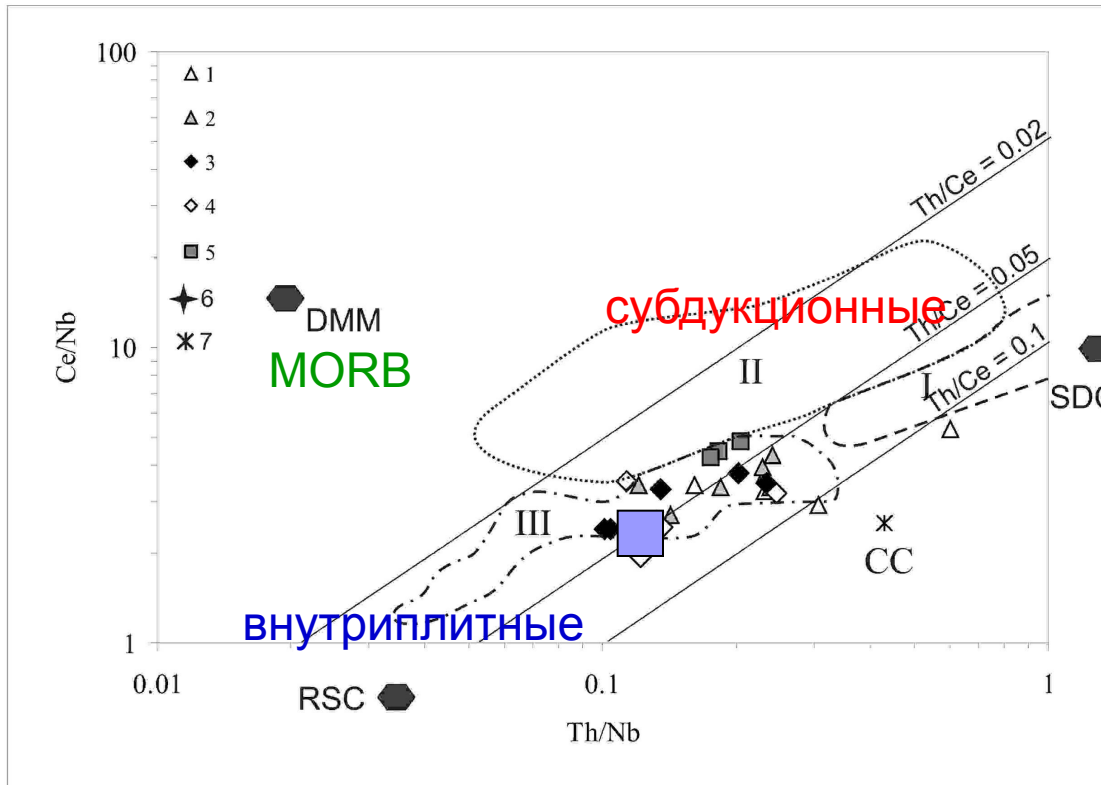
Базальты разных геодинамических обстановок



Индикаторные соотношения элементов в базальтах разных геодинамических обстановок

Обстановки	LILE	LREE/HREE	HFSE (Nb-Ta)
Срединговые хребты	обеднены	$(La/Yb)_n < 1$	Умеренно обогатчены $(Nb/La)_{PM} > 1$ $(Nb/Th)_{PM} < 1$
Внутриплитные	умеренно обогатчены	$(La/Yb)_n \gg 1$ $(La/Yb)_n \sim 1$	Обогатчены $(Nb/La)_{PM} > 1$ $(Nb/Th)_{PM} > 1$
Субдукционные	обогатчены	$(La/Yb)_n < 1$ $(La/Yb)_n > 1$	Обеднены $(Nb/La)_{PM} < 1$ $(Nb/Th)_{PM} < 1$

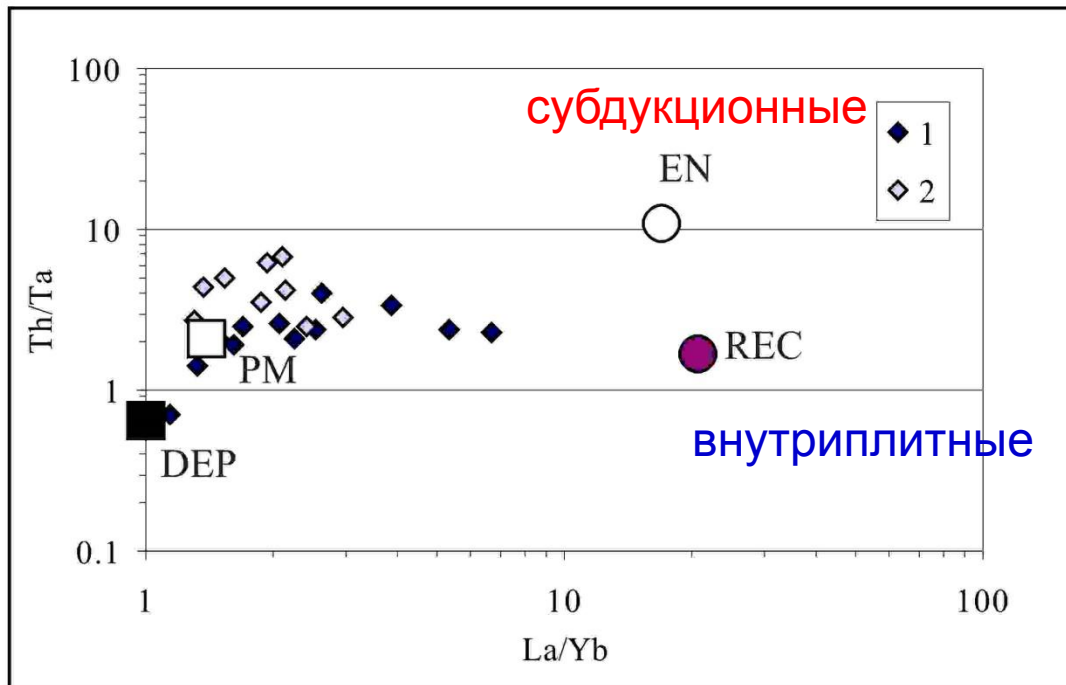
Базальты разных геодинамических обстановок – соотношение $Th - Nb - Ce (La)$



Предлагается выделить трех основных компонентов (Saunders et al., 1988):

- (1) деплетированной мантии MORB-типа (DMM) с высоким Ce/Nb и низким Th/Nb ;
- (2) реститового материала океанической коры (RSC), испытавшего дегидратацию и/или плавление при погружении в зоне субдукции, с низкими Ce/Nb и Th/Nb ;
- (3) субдукционного компонента (SDC), комплементарного RSC, с высокими Ce/Nb и Th/Nb

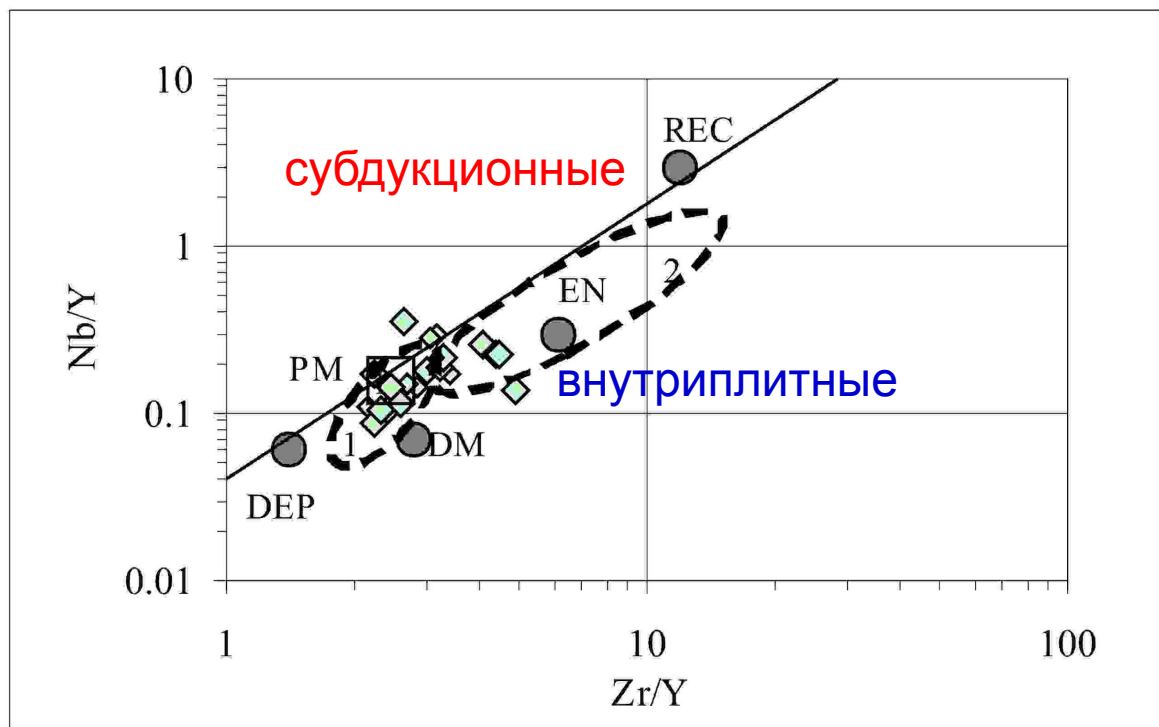
Базальты разных геодинамических обстановок – соотношение Th – Nb – Ce (La)



Компоненты:

деплетированный компонент (DEP) = (DMM) ,
рециклированный компонент слэба (REC) = (RSC),
обогащенный (EN) = (SDC)
(Condie et al., 2002)

Базальты разных геодинамических обстановок



Обосновано выделение четырех компонентов (Condie, 2005):
деплетированного (DM),
обогащенного (EN),
рециклированного (REC),
глубинного деплетированного (DEP)

Основные вопросы

- Две петрохимические серии субдукционных вулканитов
- Пониженное содержание TiO_2 в субдукционных вулканитах
- Распределение РЗЭ в зависимости от состава субдукционных вулканитов
- Обогащение LILE
- Обеднение Nb, Ta
- Мультиэлементные спектры субдукционных вулканитов
- Изотопный состав субдукционных вулканитов
- Источники субдукционных вулканитов: мантийный клин и субдукционный компонент
- Базальты задуговых обстановок
- Диаграммы для диагностики базальтов разных геодинамических обстановок