

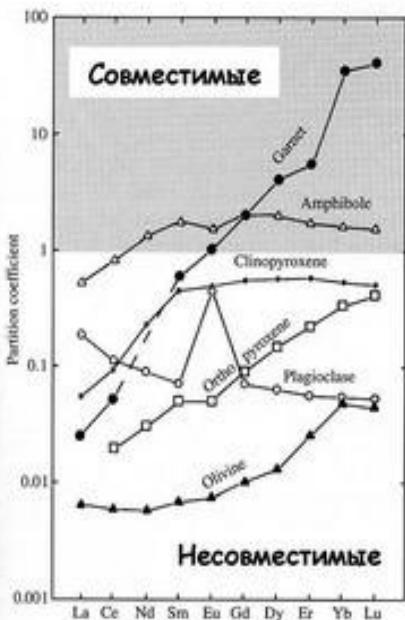
Геохимия природных процессов

Мономинеральный баланс рубидия в гранодиорите Шахтаминского комплекса в Восточном Забайкалье

Минералы	Содержание минерала в породе, %	Содержание Rb в минерале, г/т	Кол-во Rb, приходящееся на минерал, г/т	% Rb, приходящий на минерал	Общее содержание Rb в породе, г/т
Плагиоклаз	38,6	55	DD	DD	
К-На полевой шпат	29,4	362	DD	DD	
Кварц	21,6	-	-	-	
Биотит	5,3	695	DD	DD	
Роговая обманка	5,1	36	DD	DD	
Сумма	100,0		DD		198

Rb не образует собственных минералов. Аналог калия.

Баланс зависит от содержания К в минерале и/или от содержания в породе



КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Р.З.Э. МЕЖДУ МИНЕРАЛАМИ И БАЗАЛЬТОВЫМ РАСПЛАВОМ

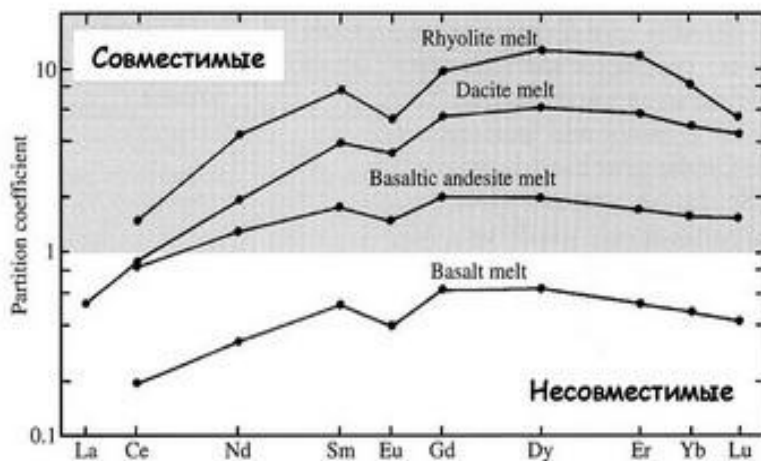
В случае оливина, плагиоклаза и пироксенов Р.З.Э. проявляют свойства несовместимых элементов, однако для амфиболов и граната коэффициенты распределения тяжелых редких земель оказываются выше единицы.

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛ - РАСПЛАВ В БАЗАЛЬТОВОЙ СИСТЕМЕ

	Olivine	Opx	Cpx	Garnet	Plag	Amph	Magnetite
Rb	0.010	0.022	0.031	0.042	0.071	0.29	
Sr	0.014	0.040	0.060	0.012	1.830	0.46	
Ba	0.010	0.013	0.026	0.023	0.23	0.42	
Ni	14	5	7	0.955	0.01	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	0.01	2.00	7.4
La	0.007	0.03	0.056	0.001	0.148	0.544	2
Ce	0.006	0.02	0.092	0.007	0.082	0.843	2
Nd	0.006	0.03	0.230	0.026	0.055	1.340	2
Sm	0.007	0.05	0.445	0.102	0.039	1.804	1
Eu	0.007	0.05	0.474	0.243	0.1/1.5*	1.557	1
Dy	0.013	0.15	0.582	1.940	0.023	2.024	1
Er	0.026	0.23	0.583	4.700	0.020	1.740	1.5
Yb	0.049	0.34	0.542	8.167	0.023	1.642	1.4
Lu	0.045	0.42	0.506	6.950	0.019	1.563	

Data from Rollinson (1993) *Eu²⁺/Eu³⁺ /values are estimated

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Р.З.Э. МЕЖДУ АМФИБОЛОМ И РАСПЛАВАМИ РАЗНОГО СОСТАВА



ПРАВИЛА ГОЛЬДШМИДА

1. Два иона одной валентности и близкого радиуса легко образуют взаимные твердые растворы (Fe-Mg или Mg-Ni в оливинах).
2. В таких растворах обычно ион меньшего размера характеризуется более высоким значением D (например, Ni в оливинах - см. таблицу).
3. Если же два иона близкого радиуса имеют разную валентность, то более высокозарядный катион в большей степени концентрируется в кристалле (например, Li и Mn в оливине или K и Ba в плагиоклазе).

Совместимость зависит от минерала и типа расплава

Table 9-1. Partition Coefficients (C_S/C_L) for Some Commonly Used Trace Elements in Basaltic and Andesitic Rocks

	Olivine	Opx	Cpx	Garnet	Plag	Amph	Magnetite
Rb	0.010	0.022	0.031	0.042	0.071	0.29	
Sr	0.014	0.040	0.060	0.012	1.830	0.46	
Ba	0.010	0.013	0.026	0.023	0.23	0.42	
Ni	14	5	7	0.955	0.01	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	0.01	2.00	7.4
La	0.007	0.03	0.056	0.001	0.148	0.544	2
Ce	0.006	0.02	0.092	0.007	0.082	0.843	2
Nd	0.006	0.03	0.230	0.026	0.055	1.340	2
Sm	0.007	0.05	0.445	0.102	0.039	1.804	1
Eu	0.007	0.05	0.474	0.243	0.1/1.5*	1.557	1
Dy	0.013	0.15	0.582	1.940	0.023	2.024	1
Er	0.026	0.23	0.583	4.700	0.020	1.740	1.5
Yb	0.049	0.34	0.542	6.167	0.023	1.642	1.4
Lu	0.045	0.42	0.506	6.950	0.019	1.563	

Data from Rollinson (1993).

* $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ *Italics* are estimated

Расчет геохимического состава расплава по составу минерала.

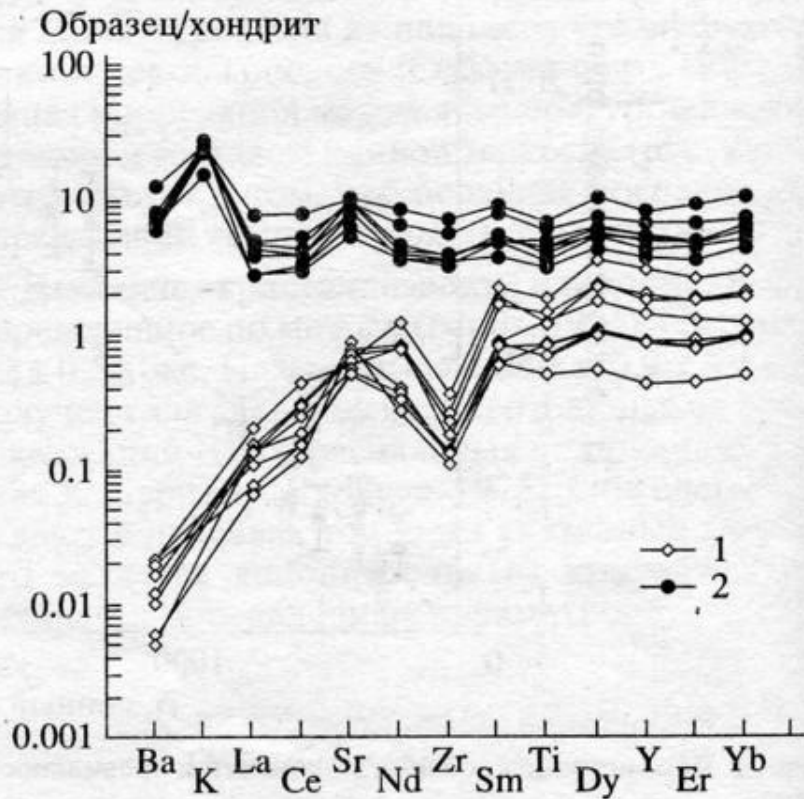


Рис. 4. Нормализованные содержания несовместимых элементов в клинопироксенах (1) и расплавных включениях (2).

Содержания элементов, нормированные к хондриту по (Anders, Greves, 1989).

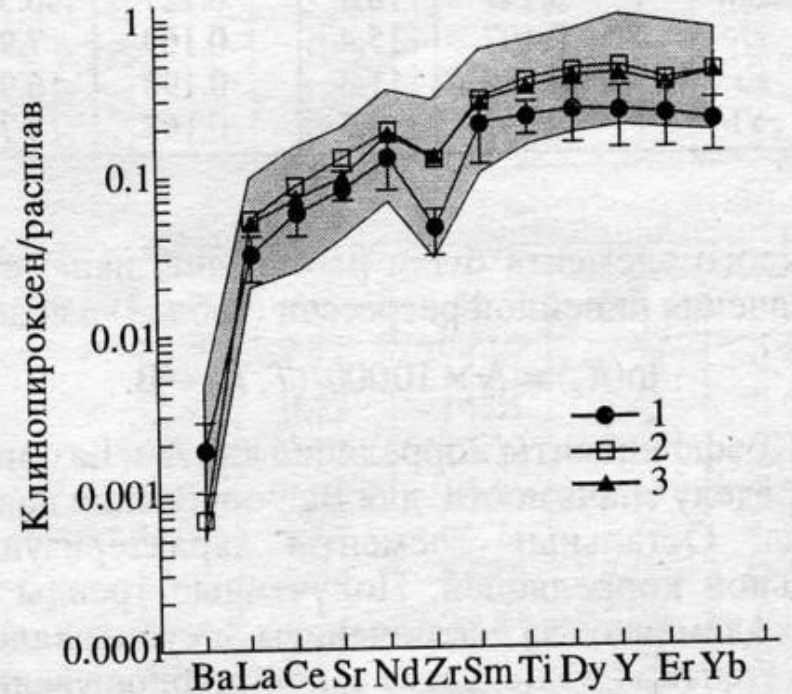


Рис. 5. Средние коэффициенты распределения между клинопироксеном и расплавом.

1 – данные настоящей работы; 2 – по данным из работы (Hart, Dunn, 1993); 3 – по данным из работы (Johnson, 1994). Полем показан интервал коэффициентов распределения для клинопироксена, рекомендованный в работе (Green, 1994).

Зависимость коэффициентов распределения рубидия для щелочного полевого шпата от

- содержания калия в нём и
- содержания рубидия в составе породы (типа породы)

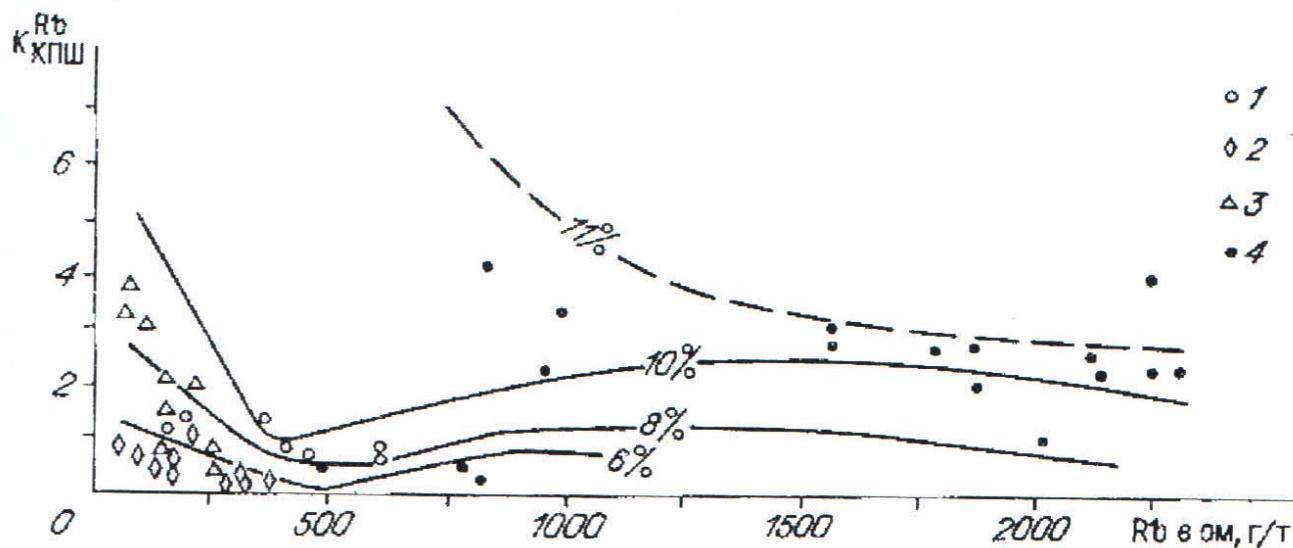


Рис. 4.4. Зависимость коэффициентов распределения рубидия для щелочного полевого шпата от содержания калия (изоконцентра-ты) в нем и содержания рубидия в основной массе породы [Антипин и др., 1984]: 1 – дациты, 2 – трахиты, 3 – комендиты, 4 – онгониты

Факторы, определяющие геохимическую специфику магматических пород

- Геохимические особенности магматических пород в значительной степени зависят от химического состава и минералогии родоначальных пород или расплавов.
- Содержание главных и редких элементов определяется типом и степенью плавления, хотя состав магмы может существенно изменяться по мере продвижения к поверхности.

- Наиболее важной характеристикой источника магм является соотношение радиогенных изотопов, так как оно не изменяется в процессе плавления и последующих процессов в магматической камере.
- Важным является изучение мантии: океанические базальты мантийного происхождения являются ключевым объектом.
- P-T-условия и степень плавления определяют состав мантийных выплавок.

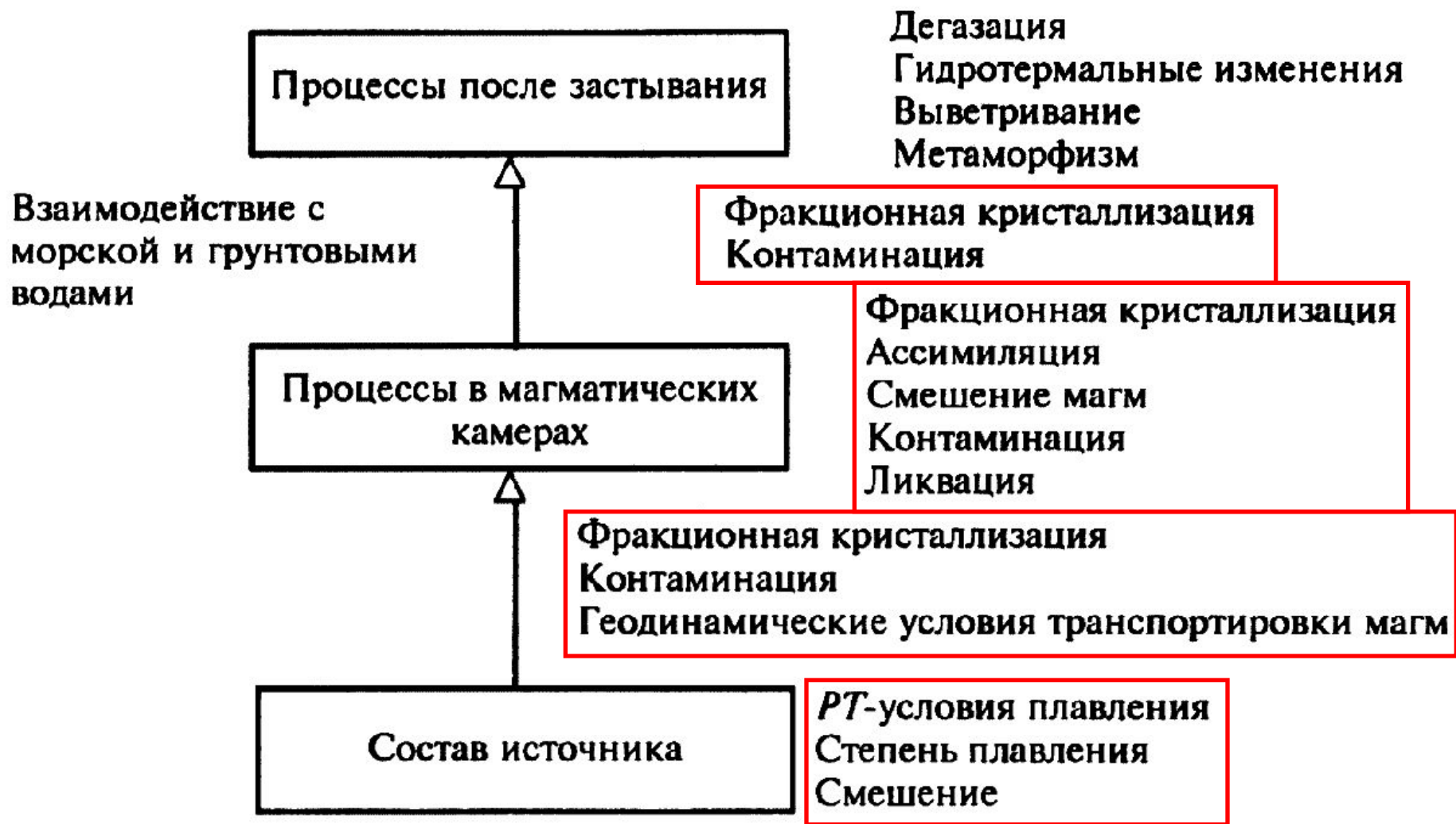


Рис. 1.10. Диаграмма, иллюстрирующая главные процессы, контролирующие химический состав магматических пород

Главная проблема геохимии магматических пород
(магматической петрологии) –
процесс формирования земной коры и
взаимосвязь с процессами, происходящими в мантии

Вопросы, возникающие при изучении участков земной коры:

1. **Когда** породы возникли и когда они были добавлены к земной коре?
2. **Как** они произошли: как добавка глубинного вещества из мантии или переработка более древней земной коры?
3. **Что** (какое вещество) было добавлено к земной коре?

Для ответа требуется комплексное исследование: **картирование, изучение петрографии, геохимии пород и изотопное датирование**

Эволюция магматического очага – результат **разделения вещества по фазовому принципу**

При фазовых переходах наблюдаются различные явления **дифференциации вещества** (миграции химических элементов).

- **Плавление** (полное или частичное) – зарождение очага;
- **Кристаллизационная** и гравитационная **дифференциация** при понижении T ;
- Взаимодействие с вмещающими породами (**ассимиляция**) и другими магмами (**смещение магм, гибридизм**). **Контаминация** - изменение первоначального химического или минер. состава в результате взаимодействия с посторонним источником вещества. Возможна до появления фазового перехода.
- **Ликвация** – распад магмы на несмешивающиеся жидкости.
- **Эманационное фракционирование** элементов в газовых фазах.
- Особая роль геотектонической обстановки, способствующей перемещению магмы и отделению продуктов кристаллизации от минералообразующей среды - **фильтр-прессинг**.

Эманационное фракционирование – в результате вскипания из-за сброса давления при тектонических подвижках появляются наряду с ж. и тв. фазами **газы**.

Здесь важная роль парциального давления отдельных летучих компонентов в магмах: H_2O , CO_2 , HCl , SO_3 , B_2O_3 , P_2O_5 , HF .

Эти элементы понижают температуру плавления магмы прямо пропорционально растворимости их в расплаве, а растворимость их растёт в ряду: HCl , SO_3 , P_2O_5 , HF , H_2O .

Менее растворим HCl , а более H_2O .

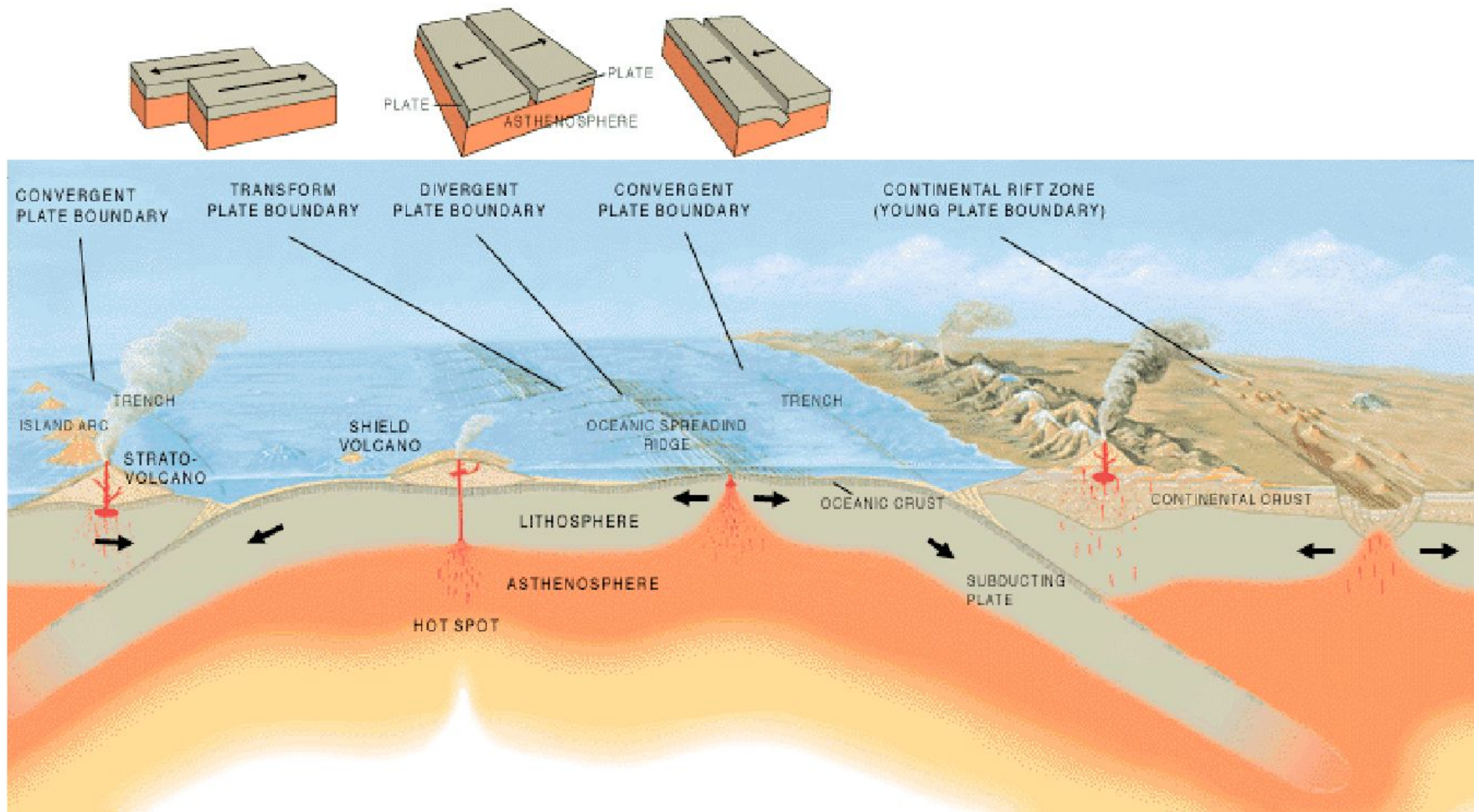
При вскипании доля отделившегося от расплава компонента переходит во флюидную фазу. При этом более кислотные компоненты менее растворимы, а более щелочные остаются в расплаве и накапливаются в более поздних продуктах кристаллизации. Это важно для моделирования поведения рудных элементов.

При перепаде давлений появляется возможность более активного движения расплава по отношению к твёрдому веществу – явление **фильтр-прессинг** – отделение расплава от тв. фаз в результате тектонических движений.

Каждая последующая фаза является продуктом образования предыдущей.

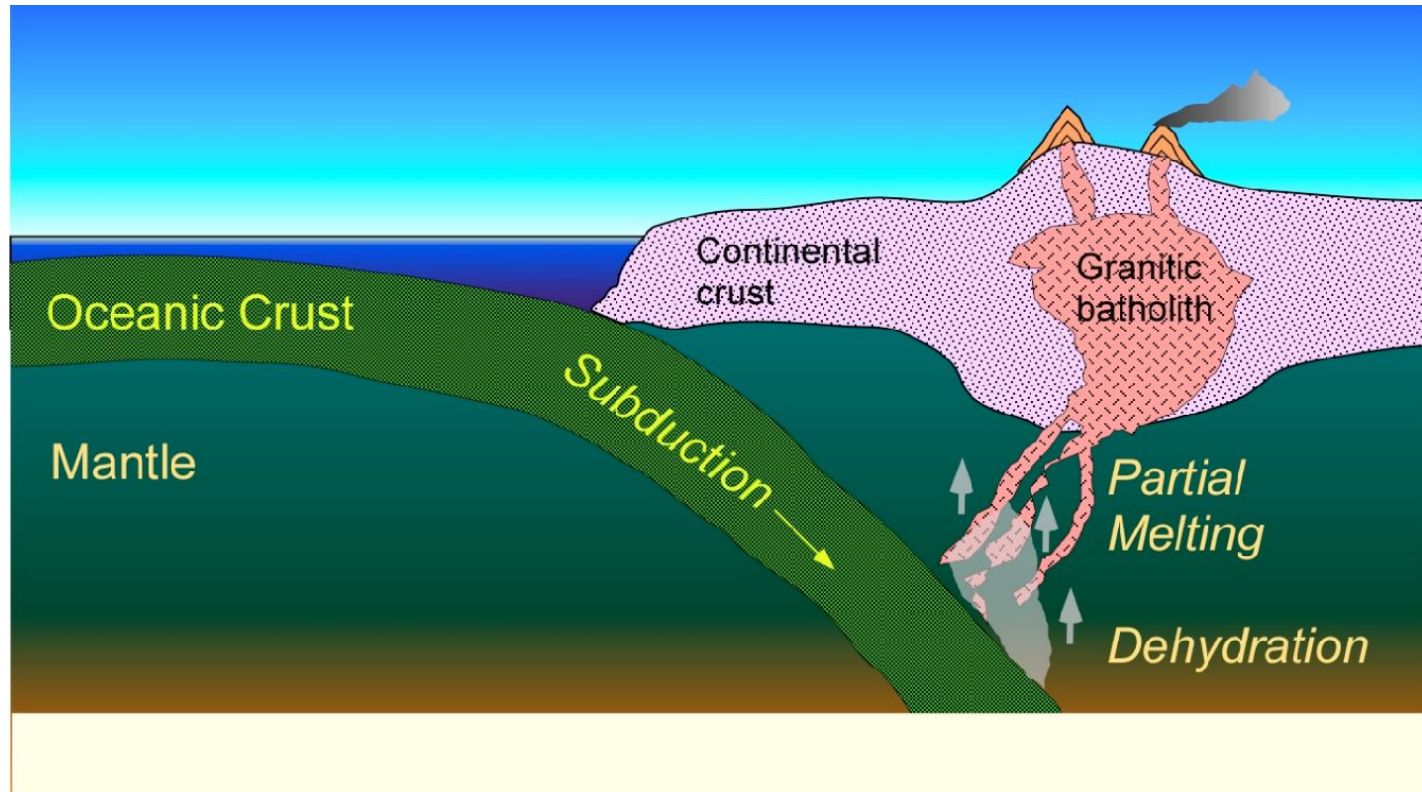
В ходе кристаллизации остаётся всё больше летучих и следовательно всё более подвижные магмы, хотя и более кислые.

Формирование коры при плавлении



Океаническая кора – чаще всего результат декомпрессионного (сброс давления) плавления мантийных пород. Образуется в СОХ и поглощается в зонах субдукции.
Convergent – сходящийся. *Divergent* - расходящийся

Формирование континентальной коры при плавлении



Континентальная кора – результат гидридного плавления мантийных пород



Карбонатитовый вулкан Олдоинье, Танзания

- **Частичное плавление:**

- - равновесное (расплав постоянно реагирует с реститом до момента удаления выплавленной порции магмы).

Постоянный контакт расплава с реститом обеспечивает равновесность этих двух фаз.

- - фракционное или релеевское (выплавленные небольшие количества расплава мгновенно удаляются из зоны магмагенерации). *Равновесие достигается только между расплавом и поверхностями зерен минералов в источнике плавления.*

• Фракционная кристаллизация:

- - равновесная (полное равновесие между всеми твердыми фазами и расплавом в течение кристаллизации).
- - релеевское фракционирование (описывается законом Релея). Крайний случай извлечения кристаллов из расплава сразу после их образования. *В процессе содержание несовместимых эл-в в минерале уменьшается относительно расплава, а совместимых – растет.*
- - in situ (остаточный расплав отделяется от кристаллической «каши» в зоне солидификации на стенах камеры и возвращается в камеру).

Изменение химического состава фаз при кристаллизации

Выпадение твёрдых фаз (минералов) определяется **законом действующих масс растворимостью компонентов** (произведением растворимости) **концентрацией (активностью) компонентов** в системе **интенсивными параметрами системы** (Т и Р).

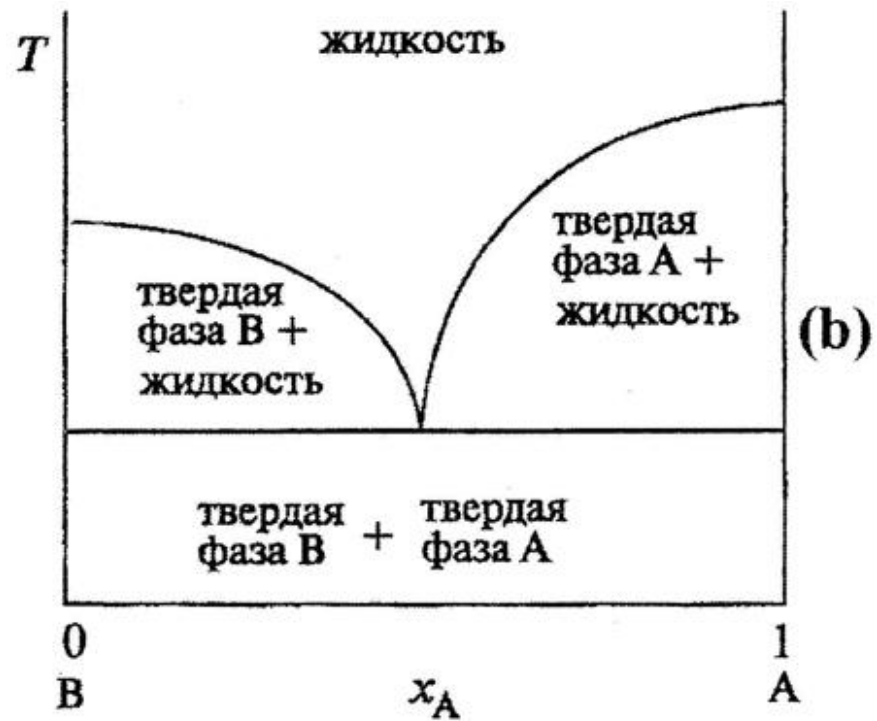
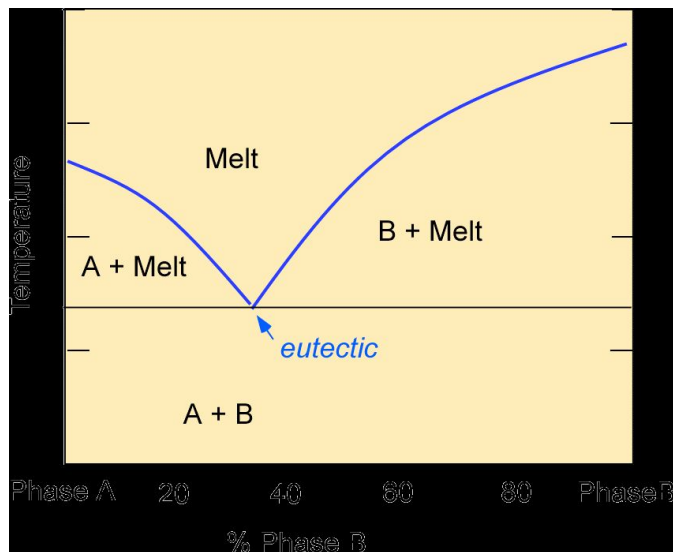
Главная движущая сила процесса – падение температуры.

Изменение химического состава фаз при кристаллизации расплавов можно проиллюстрировать на многомерных **диаграммах состояния физико-химических систем** (сухих или с летучими компонентами).

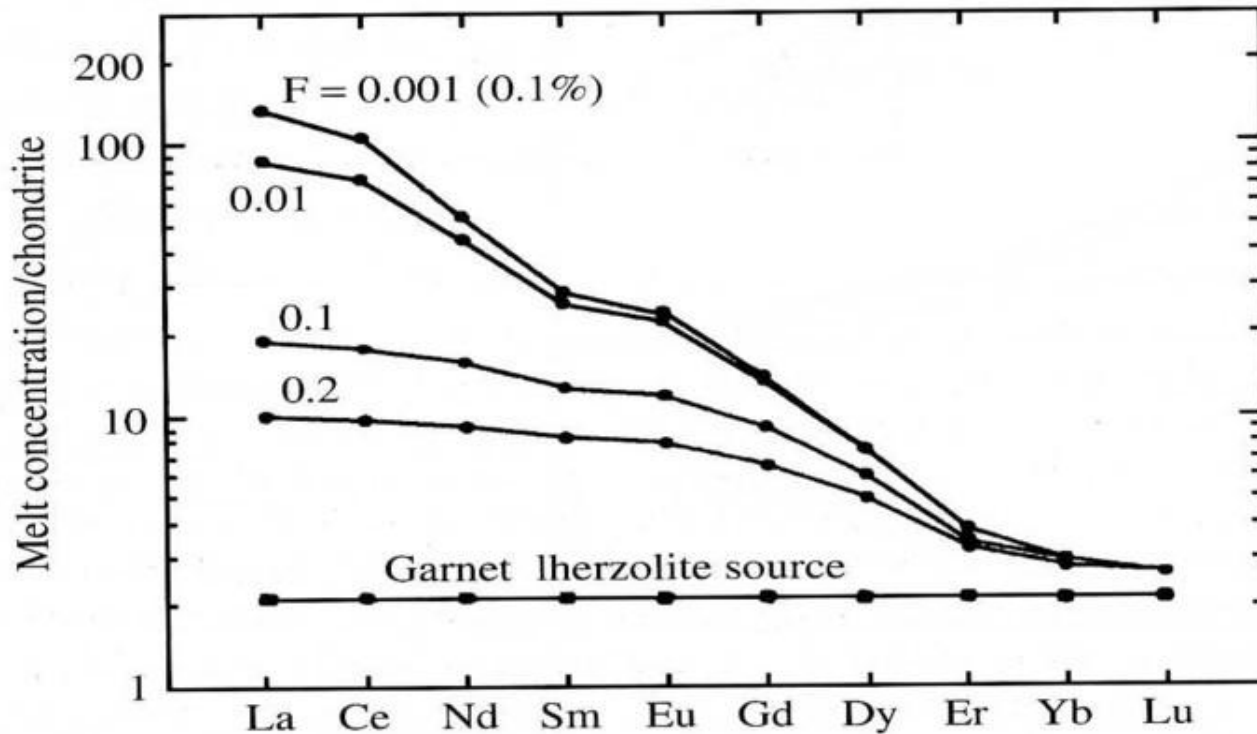
Диаграммы состояния

Диаграмма состояния с двойной эвтектикой (двухкомпонентная).

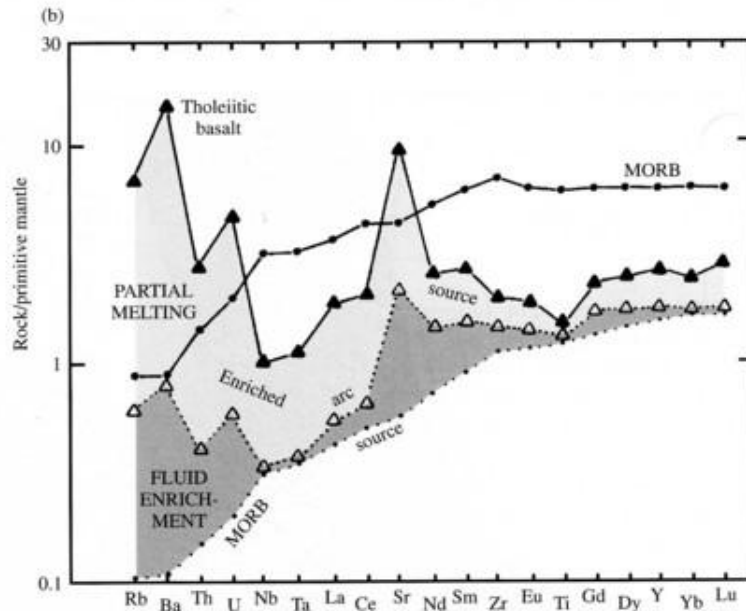
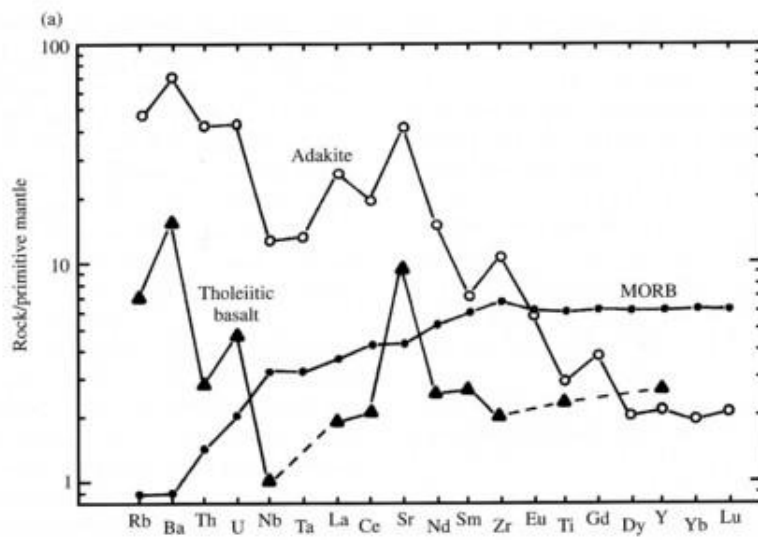
Эвтектика – наименьшая точка плавления для смеси любого состава.



Состав расплава при частичном плавлении Grt-лещолита



11.15 Chondrite-normalized diagram for rare earth elements in melts generated by varying degrees of partial melting of a garnet lherzolite source. (Data from Rollinson, 1993.)

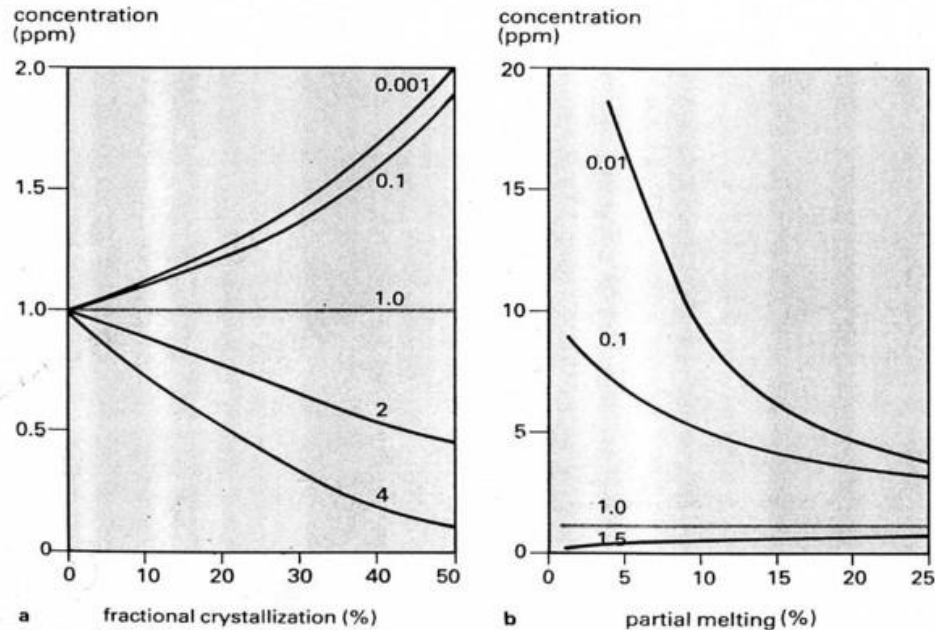


- Nb-Ta-Ti аномалия в островодужных базальтах может быть вызвана:**
1. Остаточной тугоплавкой фазой – рутилом.
 2. Фракционированием амфибола – роговой обманки.
 3. Низкой мобильностью HFS-элементов при транспортировке водным флюидом.

11.19 Trace-element arc signature in island arc rocks. (a) "Spiky" patterns for island-arc adakite and island-arc tholeiitic basalt compared with smooth pattern for mid-ocean ridge basalt (MORB). (Data from Drummond et al., 1996; Wilson, 1987; Sun and McDonough, 1989.) (b) Differential enrichment of a hypothetical MORB source (lowermost dotted line) by fluid solutions liberated from the subducted oceanic crust (dark shading) produces an enriched mantle peridotite arc source. Partial melts of this arc source (light shading) yield the island-arc tholeiitic basalt magma in (a). (Redrawn from Davidson, 1996.)

Г/х (математическое) моделирование процессов частичного плавления и фракционной кристаллизации

Используют коэффициенты распределения. Впервые предложено
Д.М. Шоу



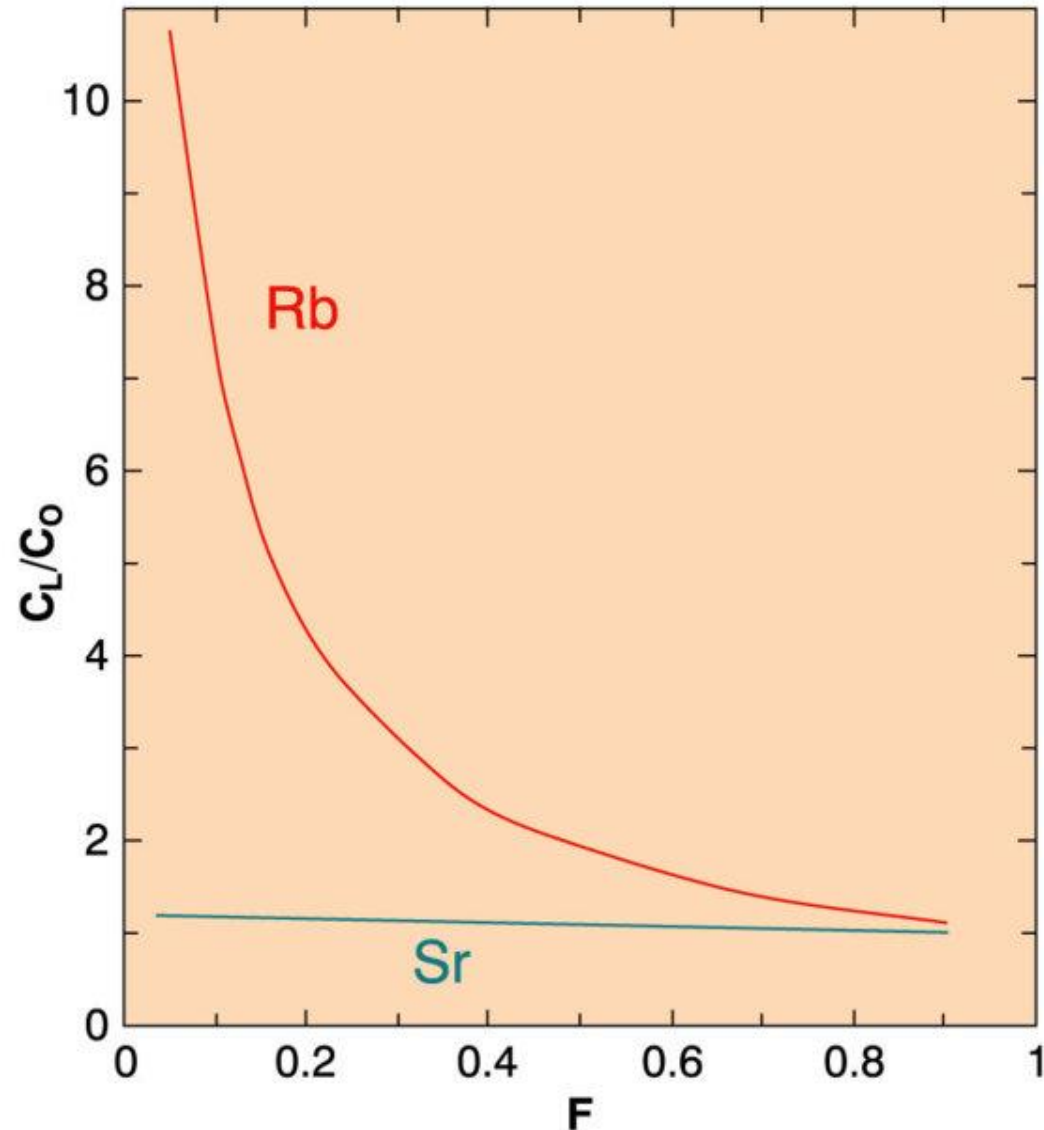
8.4: Calculated relative concentrations of trace elements in a liquid after different degrees of partial melting and fractional crystallization. The original solid and liquid respectively contained 1 ppm, and different curves reflect particular partition coefficients, K_D . For both partial melting and fractional crystallization, elements with small K_D are concentrated in the liquid, whereas those with large K_D (> 1) remain in the crystals and are thus depleted in the liquid.

Частичное плавление (batch melting)

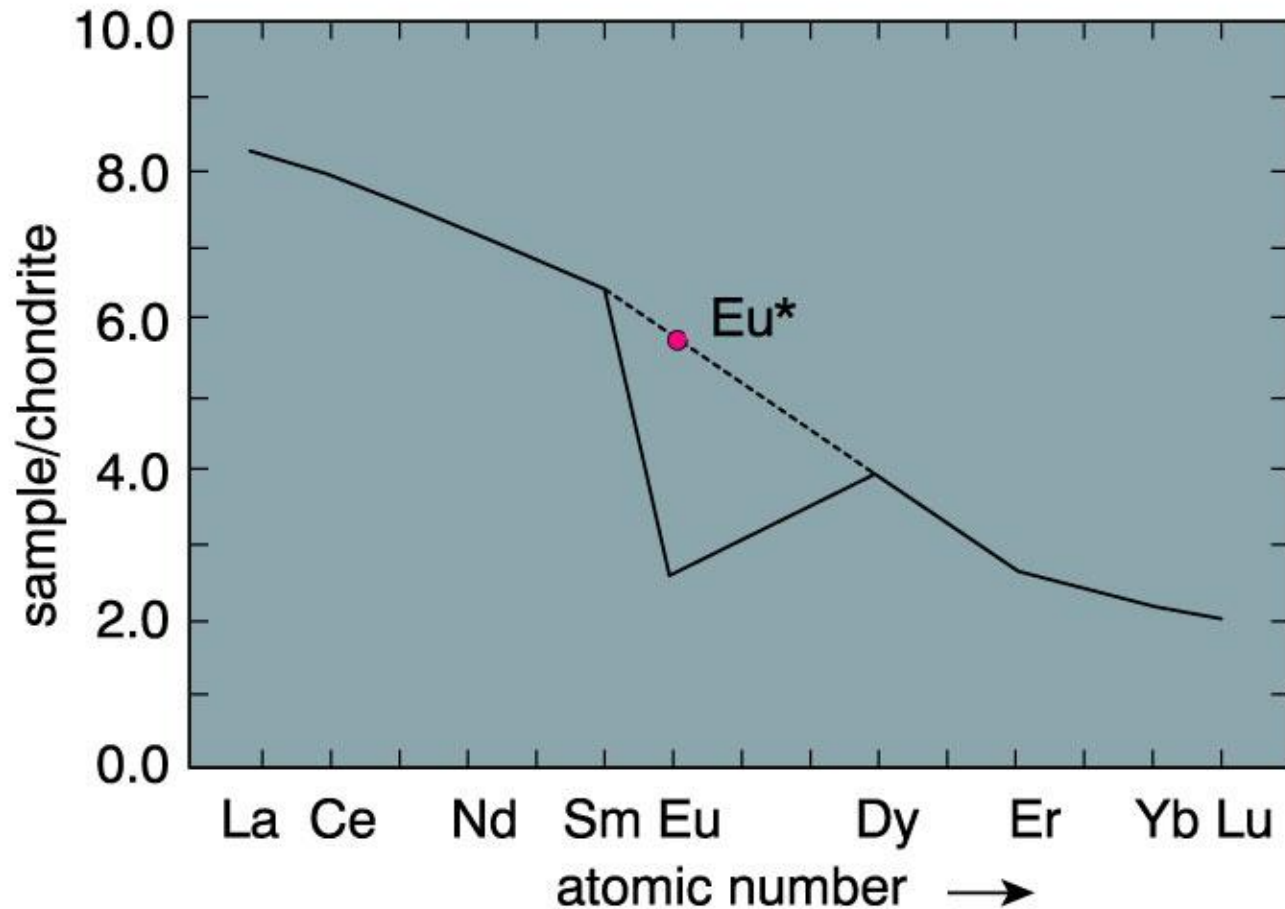
- Изменение содержания Rb и Sr в расплаве при прогрессивном частичном плавлении базальта

Table 9-3 . Batch Fractionation Model for Rb and Sr

F	$C_L/C_0 = 1/(D(1-F)+F)$		Rb/Sr
	D_{Rb} 0.045	D_{Sr} 0.848	
0.05	9.35	1.14	8.19
0.1	6.49	1.13	5.73
0.15	4.98	1.12	4.43
0.2	4.03	1.12	3.61
0.3	2.92	1.10	2.66
0.4	2.29	1.08	2.11
0.5	1.89	1.07	1.76
0.6	1.60	1.05	1.52
0.7	1.39	1.04	1.34
0.8	1.23	1.03	1.20
0.9	1.10	1.01	1.09



- Eu-аномалия, когда плагиоклаз
 - фракционирует при кристаллизации
 - или
 - является остаточной твердой фазой в источнике



Роль флюида

- **Флюидом называются летучие компоненты** Это первую очередь вода и углекислый газ. Реже роль могут играть кислород, водород, углеводороды, соединения галогенов и некоторые другие.
- В присутствии флюида область устойчивости многих фаз (особенно содержащих эти летучие компоненты) изменяется.
- В присутствии флюида плавление горных пород начинается при значительно более низких температурах.

Геохимическая роль флюидных компонентов в магматическом процессе

В течение всей геологической истории Земли происходила глобальная дегазация Земли и формировались магмообразующие флюидные системы, ответственные за выплавление маги различного состава.

Главный компонент – вода (+CO₂, CO, HCl, HF, H₂S, H₂).

Высокоактивная и высокорастворимая в расплавах (до 10 масс.% в гранитоидных расплавах).

Растворимость зависит от T и P.

Флюиды:

Меняют вязкость силикатного расплава (подвижность)

Изменяют его химический состав

Переносят и концентрируют рудное вещество

Содержание воды в магме

Растворимость воды в гранитной магме зависит от T и P .
По экспериментальным данным при 10 кбар может раствориться до 17% H_2O .

Кривая «гранитного минимума»

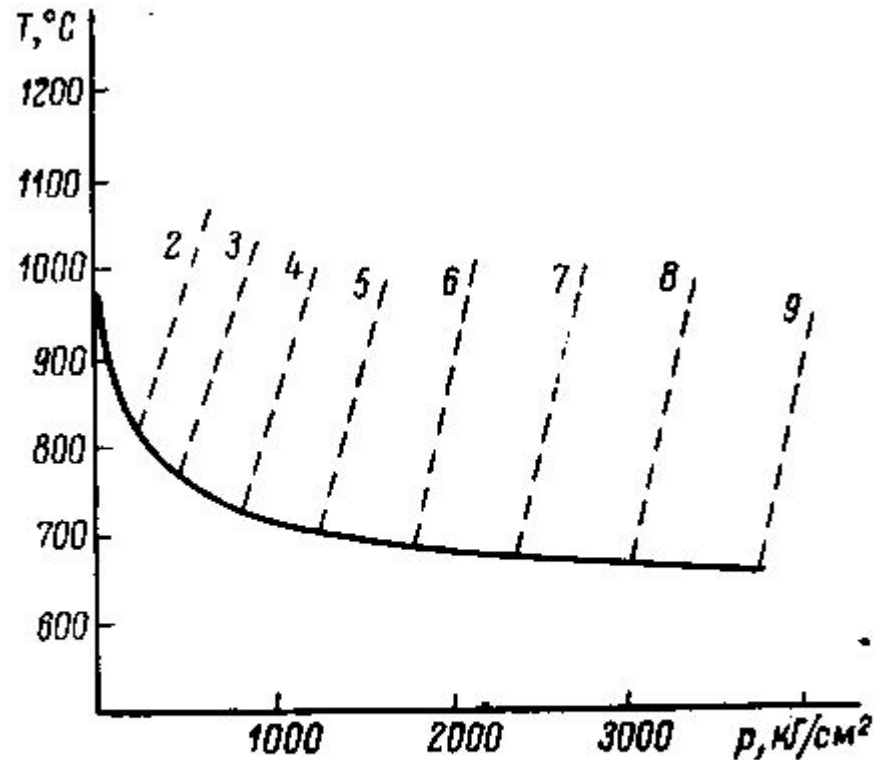


Рис. 86. Кривая «гранитного минимума» и содержание воды в координатах $T-p$ [Tuttle, Bowen, 1958].

2 — 9 процентное содержание воды.

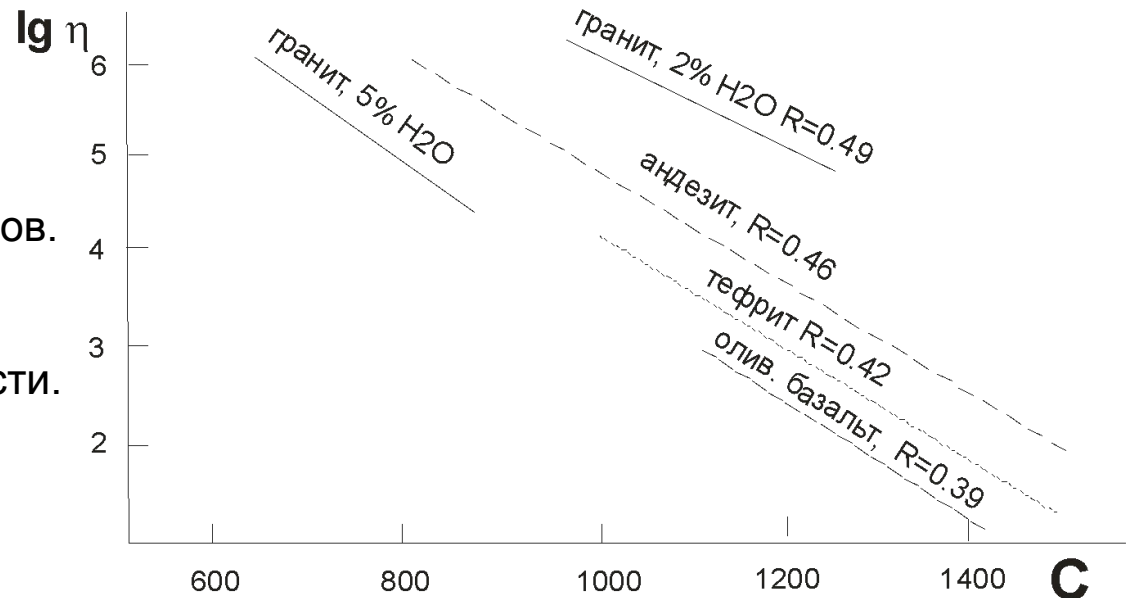
Физико-химическая природа силикатного расплава

Вязкость силикатного расплава увеличивается с уменьшением температуры и увеличением содержания SiO_2 .

При температуре выше температуры плавления наиболее тугоплавкого силиката (форстерита) расплав как однородная жидкость может сохраняться неограниченно долго.

Дифференциация вещества начинается **при фазовых переходах**: расплав – тв. Фаза; расплав – раствор – газовая фаза; несмесимость.

Миграция химических элементов активно начинается только в результате фазовых переходов. Тогда действуют факторы гравитационного разделения фаз (по плотности) и летучести. Это физико-химическая миграция.



Роль фтора

Накапливается в поздних дифференцированных расплавах
До определённых пределов хорошо растворяется в остаточных расплавах до 1,5 масс%. (Есть до 7-8 масс% - криолитсодержащие граниты плюмазитового геохимического типа.)

Понижает температуру кристаллизации магмы. Снижает температуру плавления кристаллических фаз – флюсовый компонент.

Есть несмесимость между силикатным и фторидным расплавами

Переносит редкие металлы

Роль хлора

Рано отделяется от расплава – ограниченная растворимость

Накапливается в водно-солевой фазе

Интенсивно мигрирует в виде NaCl – фоновый электролит

Роль CO₂

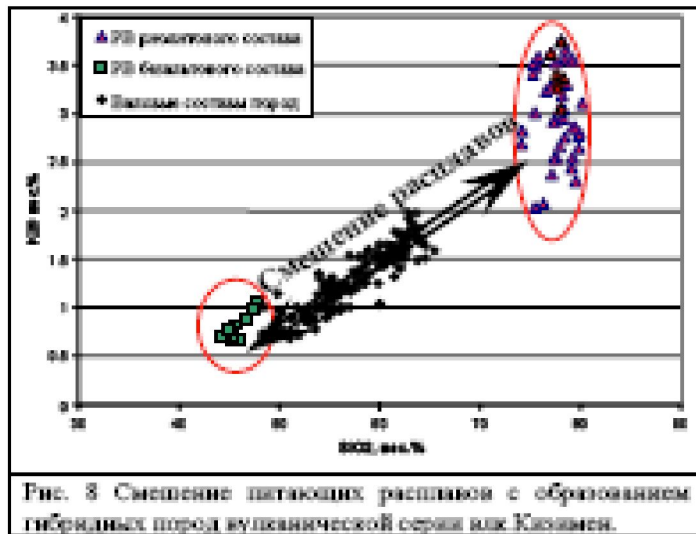
Сложная и неоднозначная роль

Растворимость в расплавах на порядок ниже воды

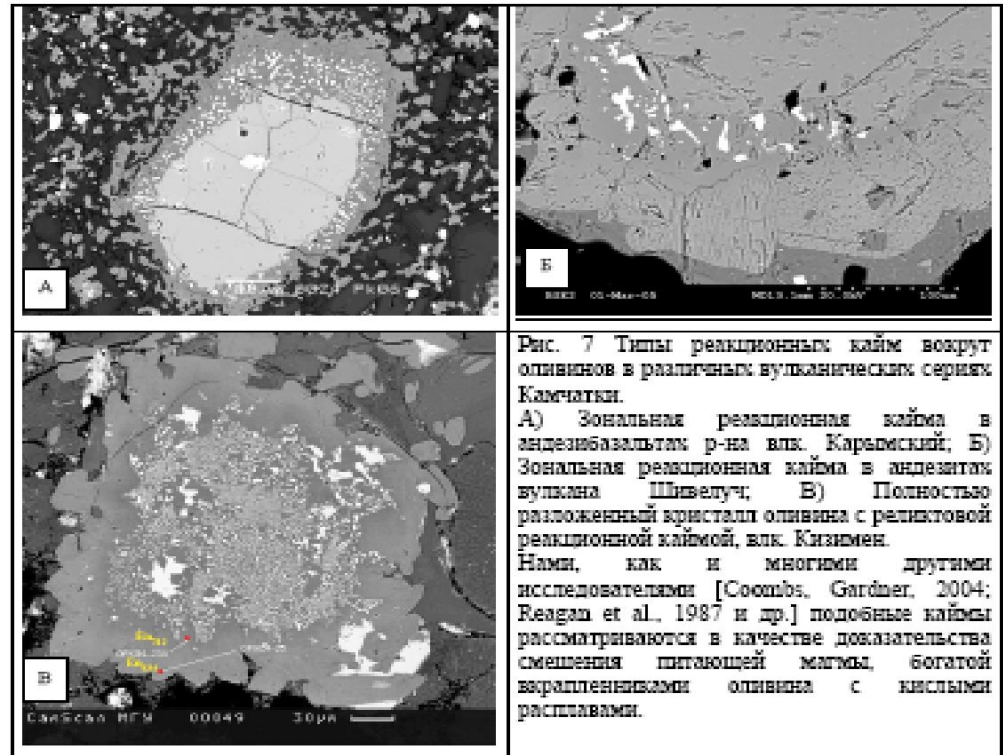
Находится во флюидной фазе

Химическая активность на магматическом этапе крайне ограничена

Смешение магм



Плечов, 2008



- Типы реакционных кайм вокруг оливинов в различных вулканических сериях Камчатки.
- Подобные каймы рассматриваются в качестве доказательства смешения питающей магмы, богатой вкрапленниками оливина с кислыми расплавами.

2 типа смешения магм

- Полное смешение до относительной однородности (mix – «миксинг»)
 - Механическое перемешивание с сохранением участков (зон) индивидуальных пород (расплавов)
- **МИНГЛИНГ** (mingle)



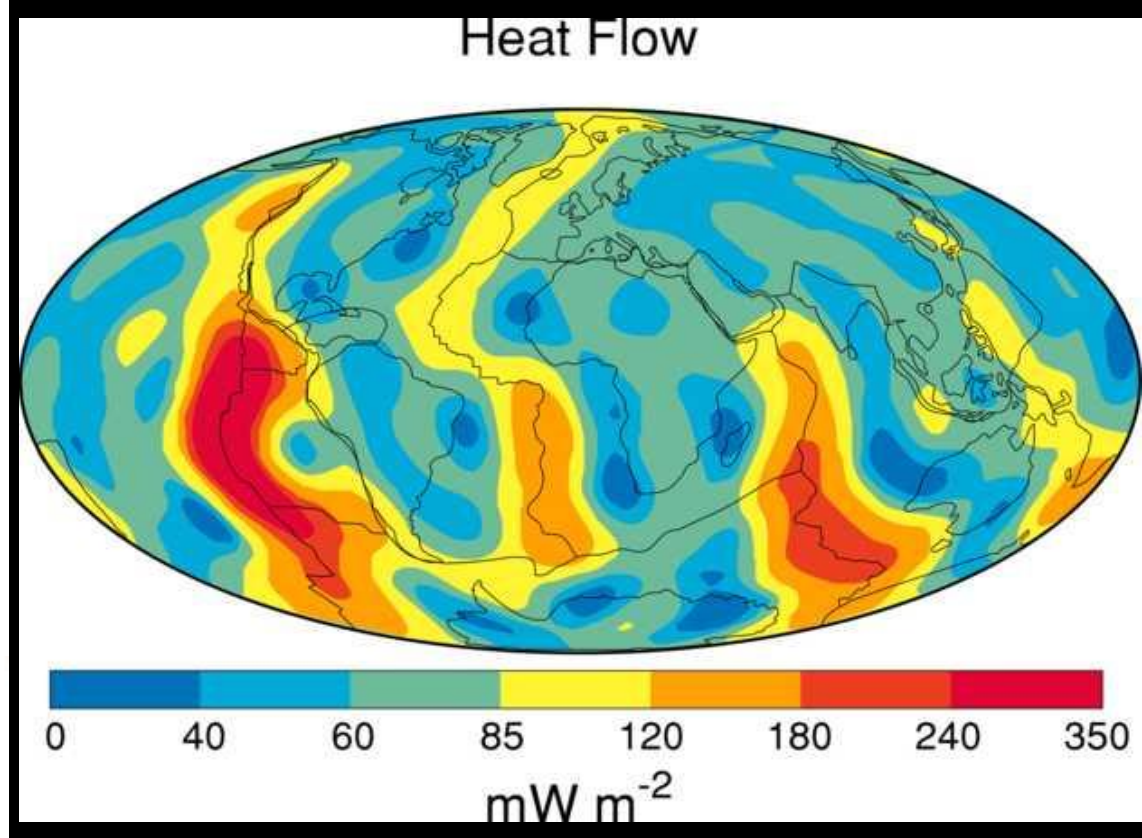
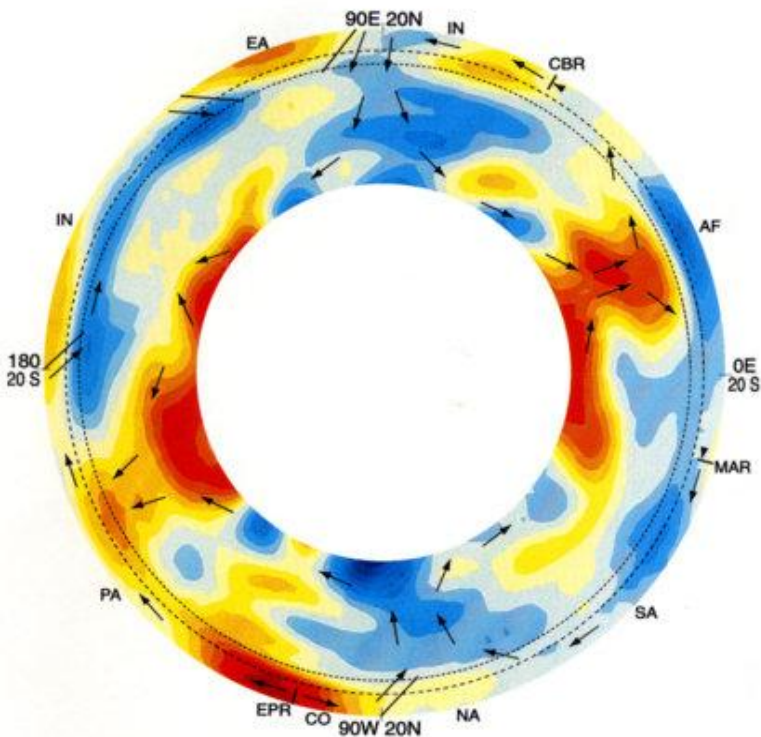
Элемент	Использование в качестве петрогенетического индикатора
Ni, Co, Cr	Высоко совместимые элементы. Ni, Cr входят в оливин, Cr – в шпинель и клинопироксен. Высокие концентрации говорят о мантийном источнике, ограниченном фракционировании.
V, Ti	Сильно фракционируют в Fe-Ti оксиды (ильменит или титаномагнетит). Если различается поведение, то Ti мог фракционировать в акцессорные фазы (сфен или рутил).
Zr, Hf	Высоко несовместимые элементы, не входят в главные силикаты. Высокие концентрации говорят об обогащенном источнике или длительной эволюции расплава.

Ba, Rb	Несовместимые элементы, замещают К в слюдах, калиевых полевых шпатах, роговых обманках. Rb хуже входит в рог.обманку. К/Ba отношение может различать эти фазы.
Sr	Замещает Са в плагиоклазе (но не в пироксене), также К в калиевом полевоом шпате. Совместимый элемент при низких Р (плагиоклаз стабилен и кристаллизуется первым).
REE	Характеристика источника и эволюции расплава. Гранат преимущественно концентрирует HREE. Сфен и плагиоклаз – LREE. Eu^{2+} преимуществ. входит в плагиоклаз.
Y	Обычно несовместимый элемент. Совместим для граната и амфибола. Сфен и апатит концентрируют Y.

Редкие элементы как индикаторы геодинамических обстановок формирования магматических комплексов

- Каждой геодинамической обстановке отвечает специфический тип рудообразования.

Геотермический градиент



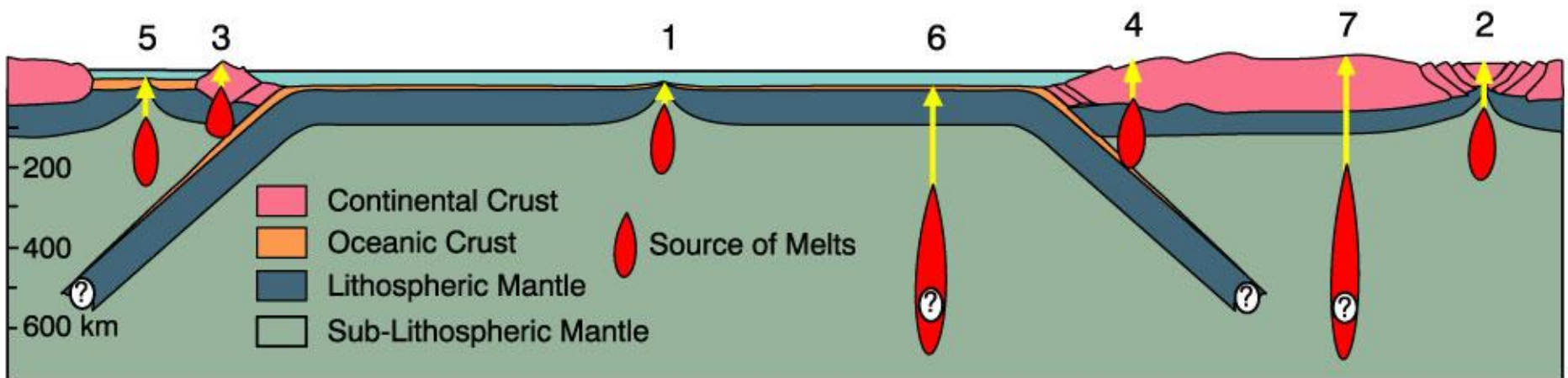
Pattern of global heat flux variations compiled from observations at over 20,000 sites and modeled on a spherical harmonic expansion to degree 12. From Pollack, Hurter and Johnson. (1993) *Rev. Geophys.* 31, 267-280.

Cross-section of the mantle based on a seismic tomography model. Arrows represent plate motions and large-scale mantle flow and subduction zones represented by dipping line segments. EPR = East Pacific Rise, MAR = Mid-Atlantic Ridge, CBR = Carlsberg Ridge. Plates: EA = Eurasian, IN = Indian, PA = Pacific, NA = North American, SA = South American, AF = African, CO = Cocos. From Li and Romanowicz (1996). *J. Geophys. Research*, 101, 22,245-72.

Геодинамические обстановки

1. Mid-ocean Ridges
2. Intracontinental Rifts
3. Island Arcs
4. Active Continental Margins

5. Back-arc Basins
6. Ocean Island Basalts
7. Miscellaneous Intra-Continental Activity
 - kimberlites, carbonatites, anorthosites...



Список используемых сокращений

Аббревиатура	Расшифровка
MORB	Mid-Ocean Ridge Basalts – базальты срединно-океанических хребтов
OFB	Ocean Floor Basalts – базальты океанического дна
IAB	Island-Arc Basalts – островодужные базальты
IAT	Island-Arc Tholeiites – островодужные толеиты
VAB	Volcanic-Arc Basalts – базальты вулканических дуг
OIB	Ocean Island Basalts – базальты океанических островов
OIT	Ocean Island Tholeiites – толеиты океанических островов
OIA	Ocean Island Andesites – андезиты океанических островов
BABV	Back-Arc Basin Basalts – базальты задуговых бассейнов
WPT	Within-Plate Tholeiites – внутриплитные толеиты
WPB	Within-Plate Basalts – внутриплитные базальты
LKT	Low Potassium Tholeiites – низкокалиевые толеиты
CAB	Calc-Alkaline Basalts – известковощелочные базальты

DM – деплетированная мантия, обедненная несовместимыми элементами; EM – обогащенная мантия; HIMU – высокое содержание радиогенного свинца (высокое отношение U/Pb).

Explanation

WBP within-plate basalts
IAT island-arc tholeiites
CAB calc-alkaline basalts
MORB mid-ocean ridge basalts
OIT ocean island tholeiite
OIA ocean island alkaline basalt

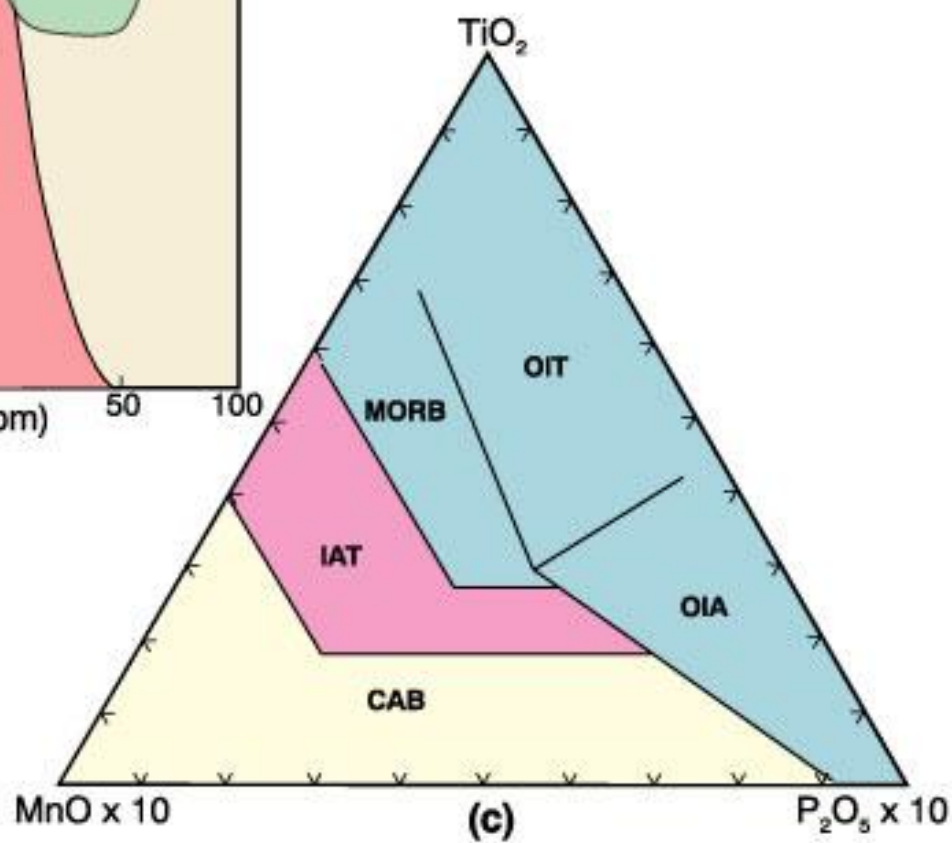
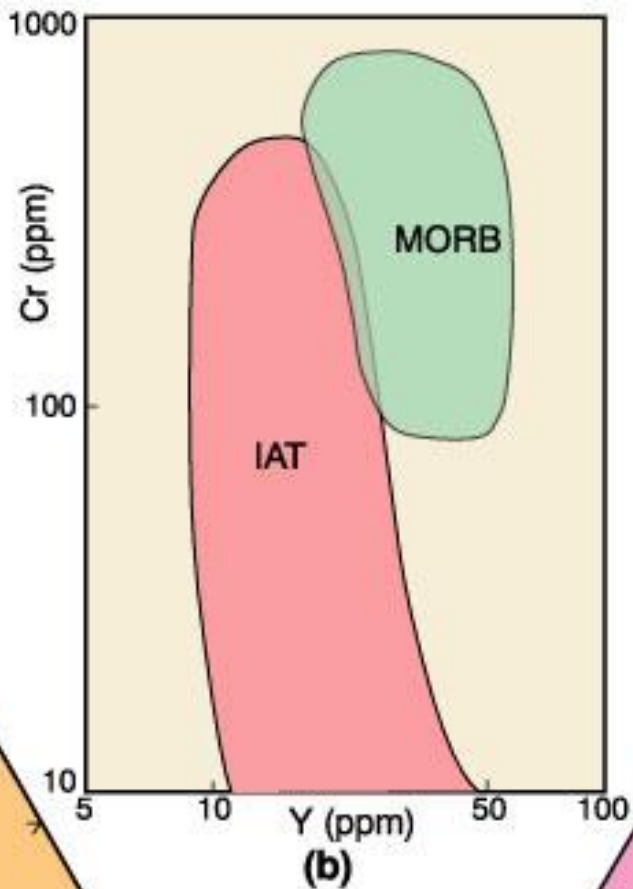
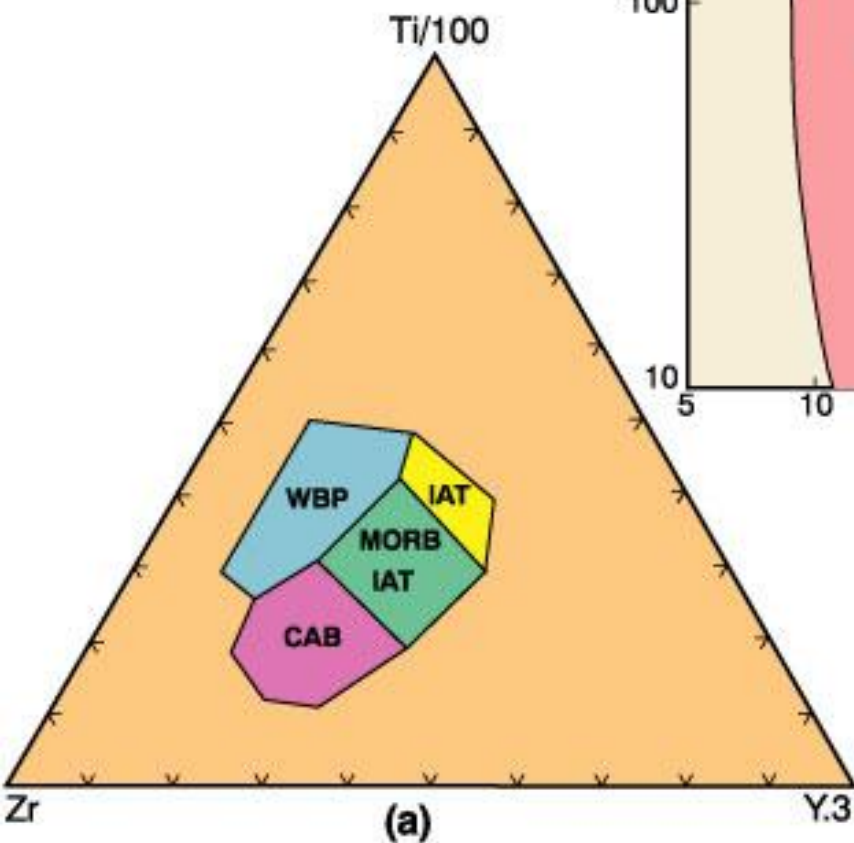


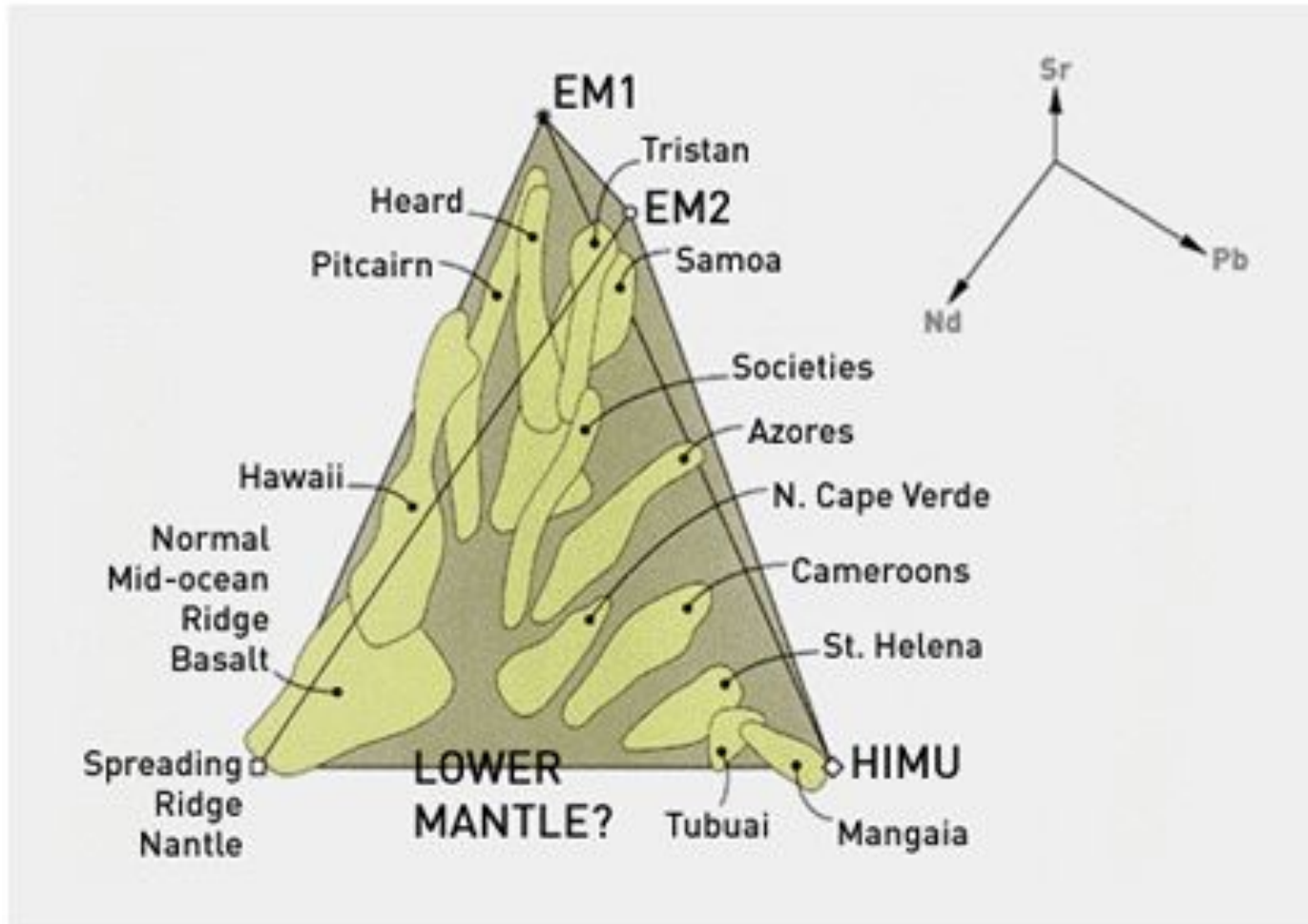


Рис. 5.30. Плато-тектоническая модель, объясняющая формирование обогащенных конечных компонентов (EM1, EM2 и HIMU) в мантии Земли. Компонент EM2 формируется при крутопадающей субдукции, тогда как компонент EM1 при пологопадающей (изменено после работы [234])



Рис. 5.31. Мантийный тетраэдр: конечные компоненты DMM, EM1, EM2 и HIMU расположены в его вершинах; тренды изотопных отношений стронция, неодима и свинца показывают основной вклад тех или иных изотопных отношений при выделении этих компонентов; относительное смещение составов многих базальтов различных океанических островов от линии смещения компонентов EM2 и HIMU может быть объяснено существованием некоего гипотетического компонента мантийных плюмов FOZO [152]

Магматический процесс. Источники вещества. Изотопная геология Sr, Nd и Pb.



DMM

FOZO

CLASSIFICATION PLOTS

Menu item	Module name	Scope ¹	Plot description	Details (reference)
AFM (Irvine + Baragar 1971)	AFM	G	(Na ₂ O+K ₂ O) – FeO _t – MgO ternary	AFM plot that serves to discriminate between calc-alkaline and tholeiitic subalkaline series (Irvine & Baragar, 1971).
SiO ₂ - FeO _t /MgO (Miyashiro 1974)	Miyashiro	G	SiO ₂ vs. FeO _t /MgO binary	Diagram of Miyashiro (1974) distinguishing between tholeiitic and calc-alkaline igneous rocks.
SiO ₂ - K ₂ O (Peccerillo + Taylor 1976)	PeceTaylor	G	SiO ₂ vs. K ₂ O binary	Diagram proposed by Peccerillo & Taylor (1976) to distinguish various series of tholeiitic, calc-alkaline and shoshonitic rocks.
Co – Th (Hastie et al. 2007)	Hastie	G	Co vs. Th	Replacement for the previous plot of Peccerillo & Taylor (1976) using less mobile elements, designed by Hastie <i>et al.</i> (2007).
A/CNK - A/NK (Shand 1943)	Shand	G	Al ₂ O ₃ /(CaO+Na ₂ O+K ₂ O) vs. Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O+K ₂ O) (mol. %)	Classic A/CNK vs A/NK plot of Shand (1943) discriminating metaluminous, peraluminous and peralkaline compositions.
TAS (Le Bas et al. 1986)	TAS	V	SiO ₂ vs. (Na ₂ O + K ₂ O) binary	The principal variation of the TAS diagram, as proposed by Le Bas <i>et al.</i> (1986) and codified by Le Maitre (1989). Dividing line between alkaline and subalkaline series is that of Irvine & Baragar (1971).
TAS (Cox et al. 1979)	CoxVolk CoxPlut	V P	SiO ₂ vs. (Na ₂ O + K ₂ O) binary	Variation of the TAS diagram proposed by Cox <i>et al.</i> (1979) and adopted by Wilson (1989) for plutonic rocks.
TAS (Middlemost 1994)	TASMiddlemostVolk TASMiddlemostPlut	V P	SiO ₂ vs. (Na ₂ O + K ₂ O) binary	Variation of the TAS diagram proposed by Middlemost (1994).
Jensen (1976)	Jensen	V	Al – (Fe ^t + Ti) – Mg ternary	Ternary plot of Jensen (1976).
R ₁ -R ₂ (De la Roche et al. 1980)	LarocheVolk LarochePlut	V P	R ₁ -R ₂ binary (in millications).	Multicationic classification plot of De La Roche <i>et al.</i> (1980) (R ₁ : 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti); R ₂ : 6Ca + 2Mg + Al).
Nb/Y - Zr/TiO ₂ (Winchester + Floyd 1977) Zr/TiO ₂ - SiO ₂ (Winchester + Floyd 1977)	WinFloyd1 WinFloyd2	V	log Nb/Y vs. log Zr/TiO ₂ log Zr/TiO ₂ vs. SiO ₂ binary	Diagrams proposed by Winchester & Floyd (1977) for classification of volcanic rocks using incompatible element ratios.
Nb/Y - Zr/Ti (modified by Pearce 1996)	Pearce1996	V	log Nb/Y vs. log Zr/Ti	The log Nb/Y vs. log Zr/TiO ₂ plot of Winchester & Floyd (1977) modified by Pearce (1996).
QAPF diagram (Streckeisen 1978)	QAPFVolk	V	QAPF – modal compositions	Modal QAPF diagram of Streckeisen (1978)
QAPF diagram (Streckeisen 1974)	QAPFPlut	P	QAPF – modal compositions	Modal QAPF diagram of Streckeisen (1974)

¹Scope: G: general diagram, V: designed for volcanic rocks, P: designed for plutonic rocks

CLASSIFICATION PLOTS (CONTD.)

<i>Menu item</i>	<i>Module name</i>	<i>Scope¹</i>	<i>Plot description</i>	<i>Details (reference)</i>
Feldspar triangle (O'Connor 1965)	O'ConnorVolc O'ConnorPlut	V P	Ternary plot Ab-An-Or	Classification diagram after O'Connor (1965) for silica-rich rocks (quartz > 10%). It is based on CIPW-normative (volcanic, plutonic rocks) or modal (plutonic rocks) contents of albite, anorthite and K-feldspar.
P-Q (Debon + Le Fort 1983)	DebonPQ	P	P-Q binary (in millications)	Nomenclature diagram of Debon & Le Fort (1983). Its coordinates correspond to proportions of Kfs and Pl to Qtz (P: $K - (Na + Ca)$, Q: $Si/3 - (K + Na + 2Ca/3)$).
B-A (Debon + Le Fort 1983)	DebonBA	P	B-A binary (in millications)	The B-A diagram (Debon & Le Fort 1983) defines six sectors (I - VI), reflecting alumina balance of samples (B: $Fe + Mg + Ti$, A: $Al - (K + Na + 2Ca)$).
B-A (modified by Villaseca et al. 1998)	Villaseca	P	B-A binary (in millications)	The B-A diagram (Debon & Le Fort 1983) with fields of various types of peralkaline rocks as outlined by Villaseca <i>et al.</i> (1998)
Middlemost (1985)	MiddlemostPlut	P	SiO ₂ vs. (Na ₂ O + K ₂ O) binary	Classification diagram of Middlemost (1985) for plutonic rocks.

¹Scope: G: general diagram, V: volcanic rocks, P: plutonic rocks

GEOTECTONIC PLOTS (CONTD.)

<i>Menu item</i>	<i>Module name</i>	<i>Scope¹</i>	<i>Plot description</i>	<i>Details (reference)</i>
Meschede (1986) Zr/4-2Nb-Y	Meschede	B	Zr/4 - 2Nb - Y ternary	(Meschede, 1986)
Mullen (1983) 10MnO-TiO ₂ -10P ₂ O ₅	Mullen	B	10 MnO - TiO ₂ - 10 P ₂ O ₅	(Mullen, 1983)
Pearce + Cann (1973)	Pearce_and_Cann	B	Zr - Ti/100 - 3 Y ternary, Zr - Ti/100 - Sr/2 ternary, log Zr - log Ti binary	(Pearce & Cann, 1973)
Pearce + Norry (1979)	Pearce_and_Norry	B	log Zr vs. log Zr/Y	(Pearce & Norry, 1979)
Pearce et al. (1977) MgO-FeO-Al ₂ O ₃	Pearce_et_al_1977	B	MgO - FeO - Al ₂ O ₃ ternary	(Pearce et al., 1977)
Shervais (1982)	Shervais	B	log Ti/1000 vs. log V	(Shervais, 1982)
Wood (1980) Th-Hf/3-Ta Wood (1980) Th-Hf/3-Nb/16 Wood (1980) Th-Zr/117-Nb/16	Wood Wood2 Wood3	B	Th - Hf/3 - Ta Th - Hf/3 - Nb/16 Th - Zr/117 - Nb/16	(Wood, 1980)

¹Scope: Gr: granitoids, B: basaltoids.

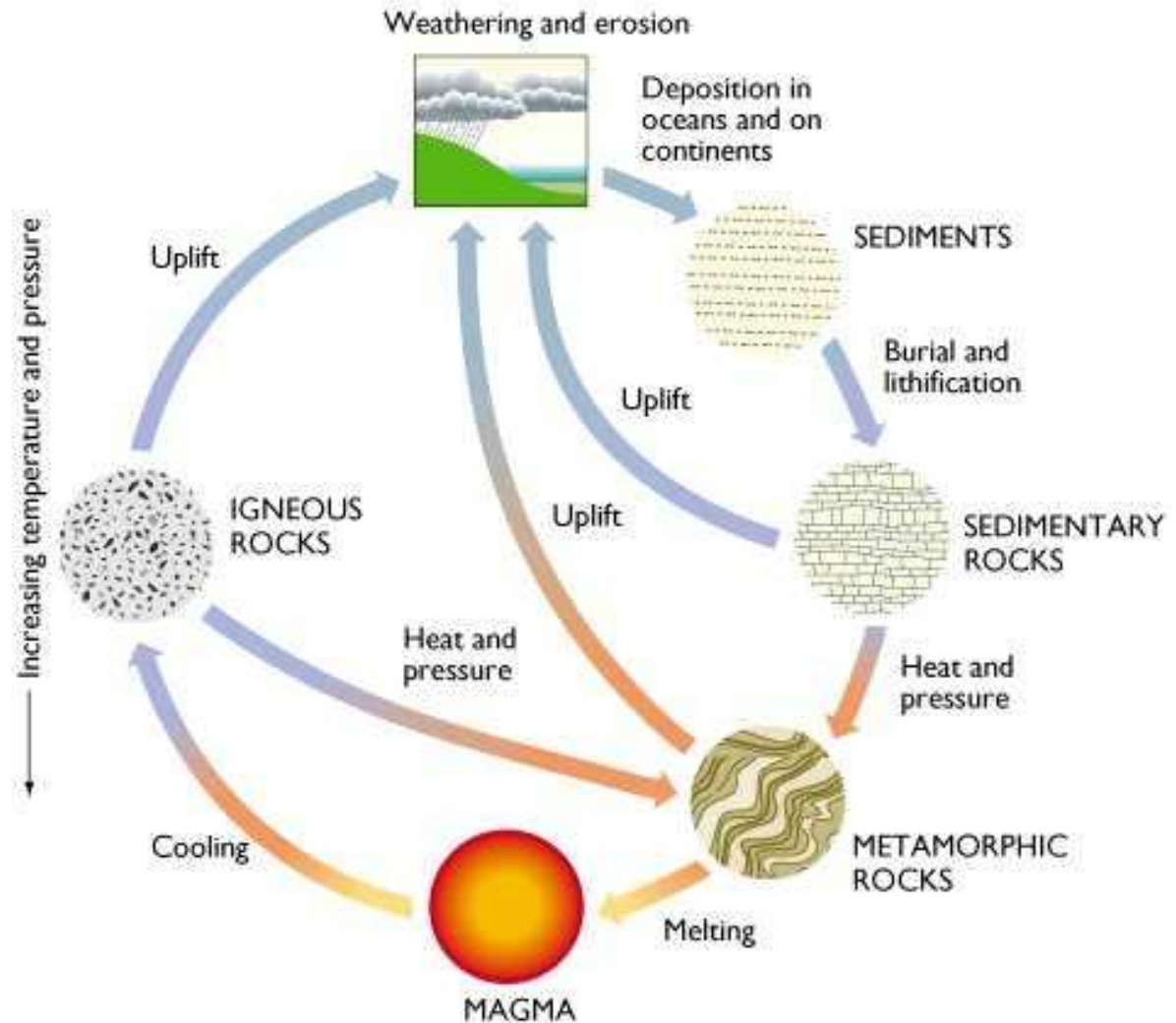
ГЕОХИМИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



Моделирование геохимических процессов (численное моделирование)

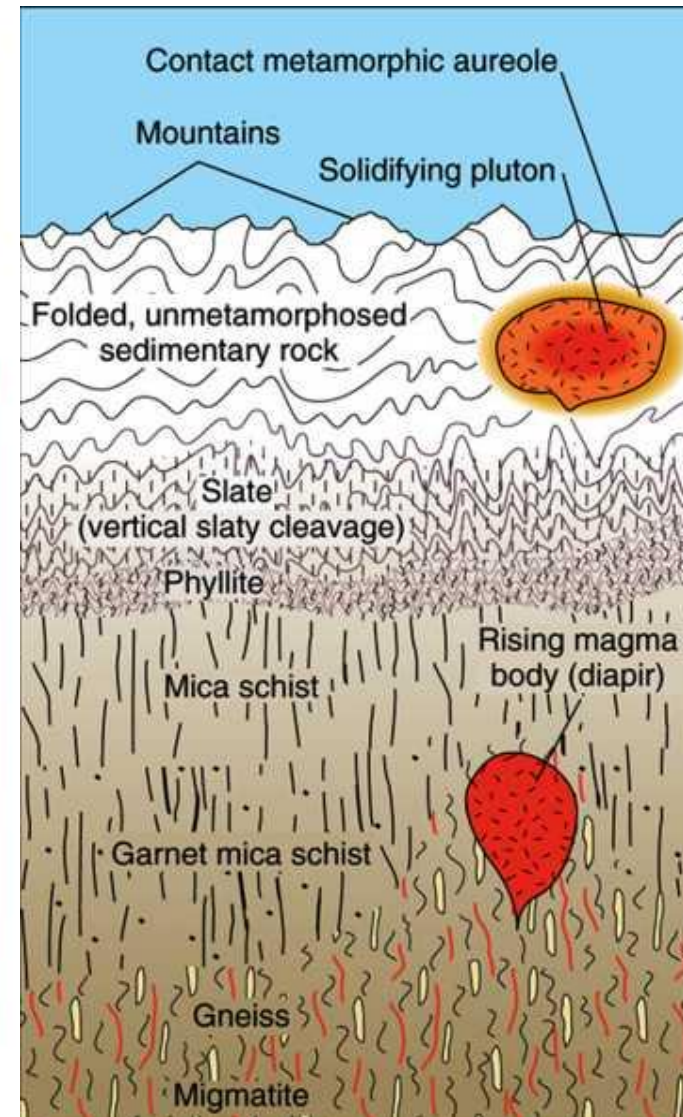
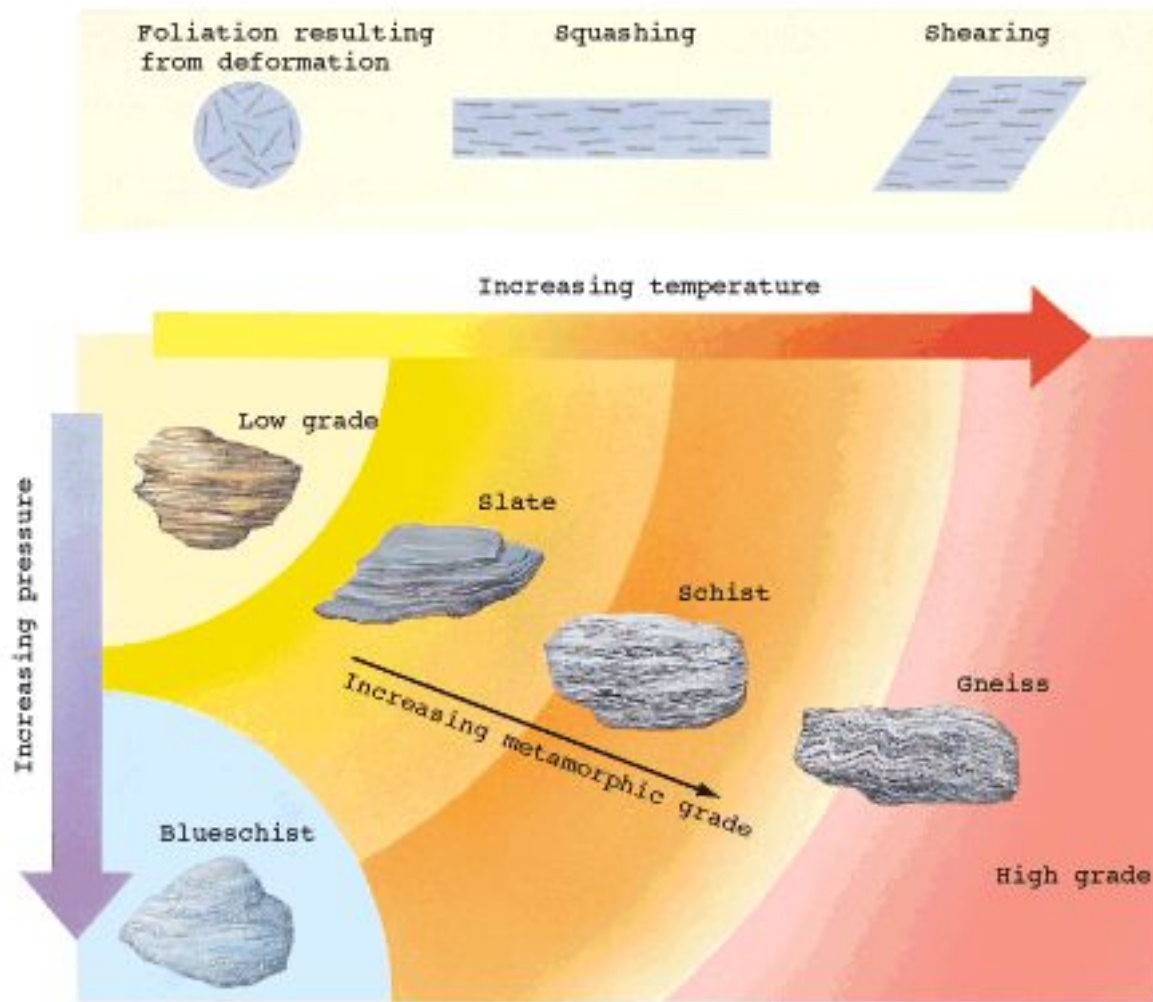
Место метаморфизма в геохимическом цикле

- **Метаморфизм** – изменения в породах с ростом (не только!!!) РТ-условий и/или воздействием флюида.

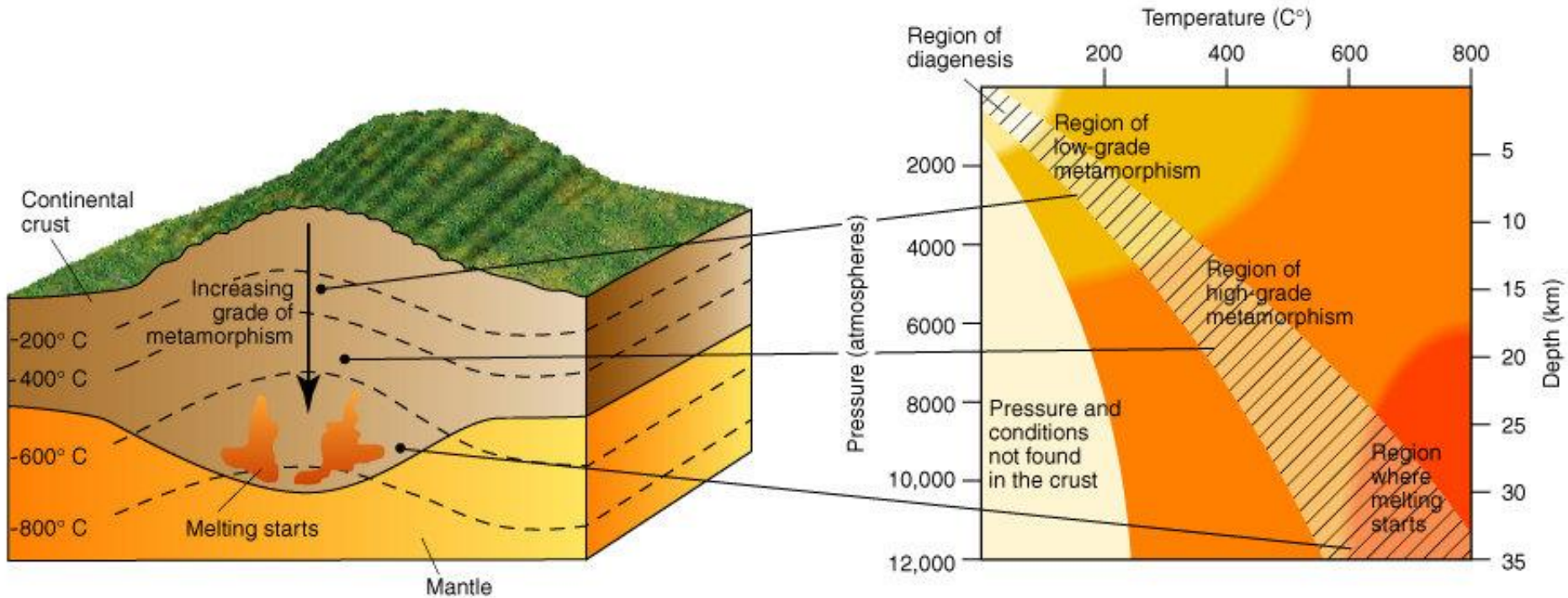


МЕТАМОРФИЗМ обычно приводит к изменениям в:

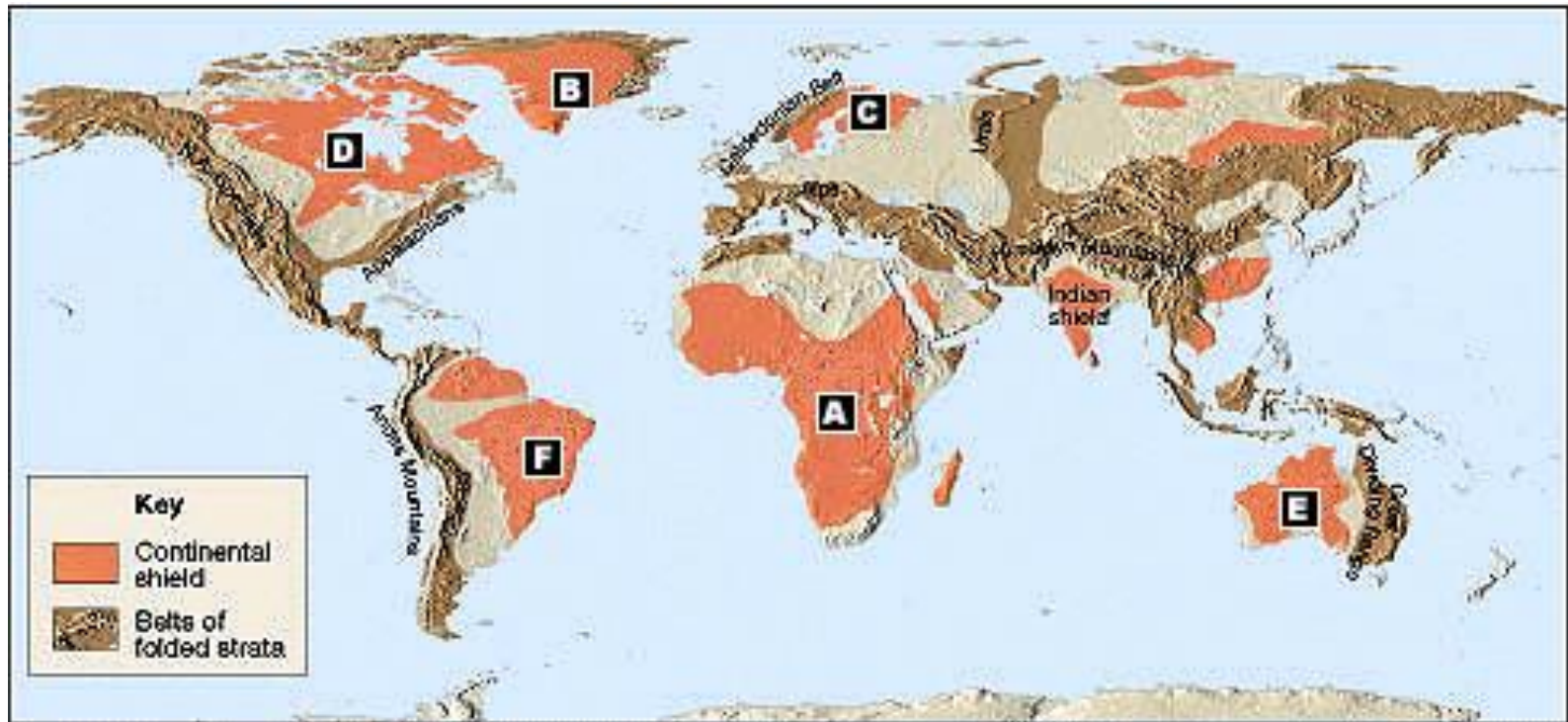
- **минералогии** ⇒ образование метаморфических минералов
- **текстуре** ⇒ образование метаморфической “ткани”



Метаморфизм - перекристаллизация в твердом состоянии



Значительная часть земной коры, более 70%,
затронута процессами метаморфизма

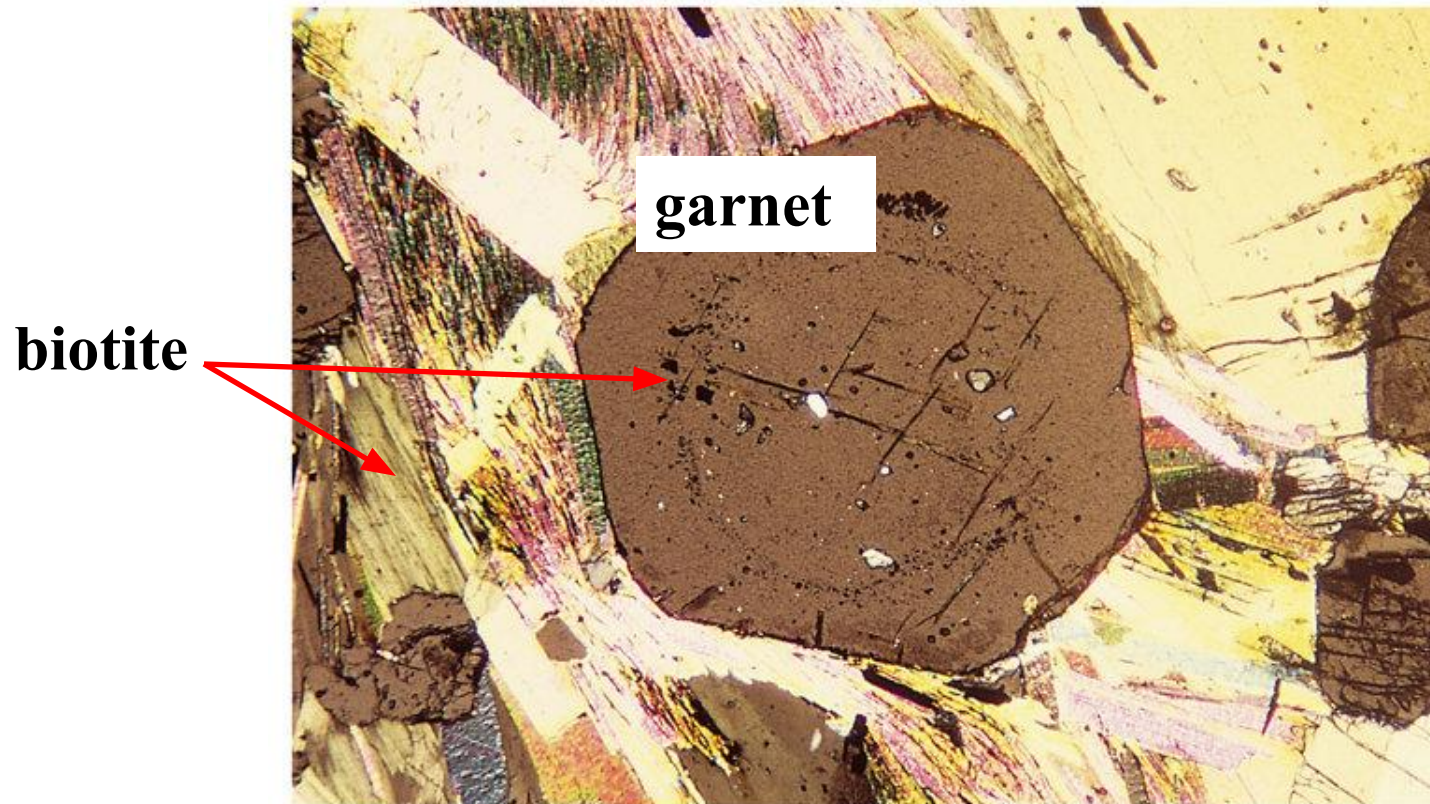


Составы минералов по главным элементам
лежат в основе реконструкции P-T-t трендов
метаморфизма и термобарометрии

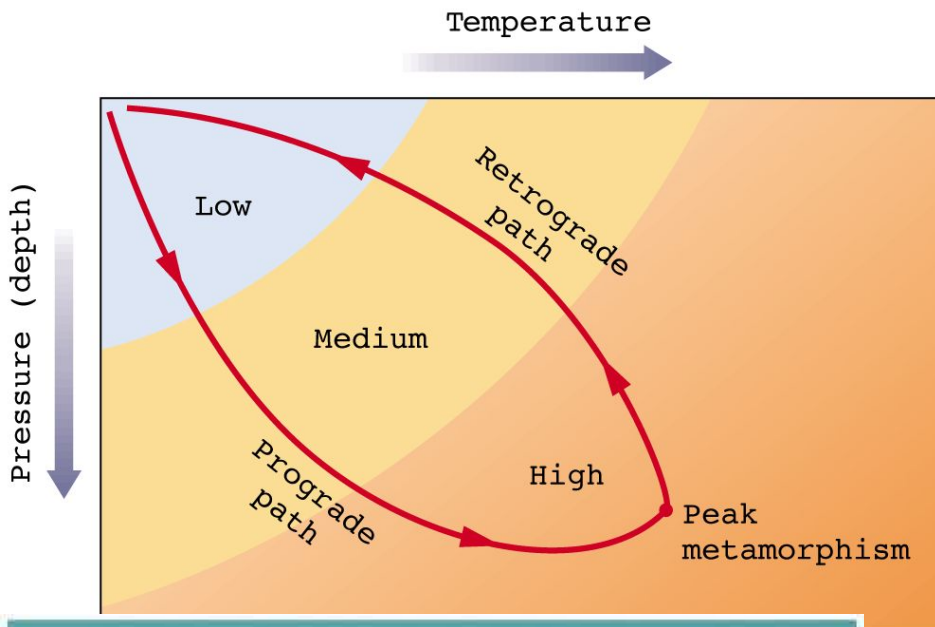
Геотермобарометрия

В основе определения P и T по составам сосуществующих породообразующих минералов (определенных с помощью микросонда)

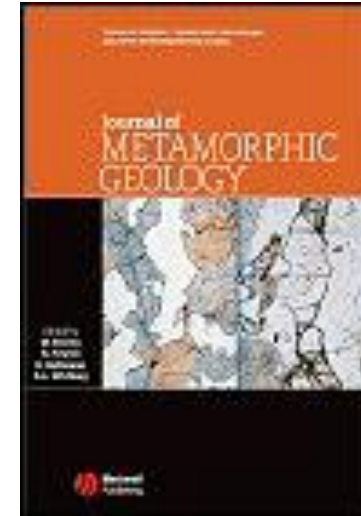
Пример: Гранат-биотитовый термометр



Метам. породы обычно отражают «пик» метаморфических условий



Метаморфическая петрология



Специфичные минералы для определения P-T-параметров \Rightarrow

“индекс-минералы” (например, гранат)

- **Метаморфизм** (греч. metamorphoómai - подвергаюсь превращению, преобразуюсь) - **процесс твердофазного минерального и структурного изменения горных пород под воздействием температуры и давления в присутствии флюида.**
- Выделяют *изохимический* метаморфизм — при котором химический состав породы меняется несущественно;
- *неизохимический метаморфизм* (метасоматизм) для которого характерно заметное изменение химического состава породы, в результате переноса компонентов флюидом.

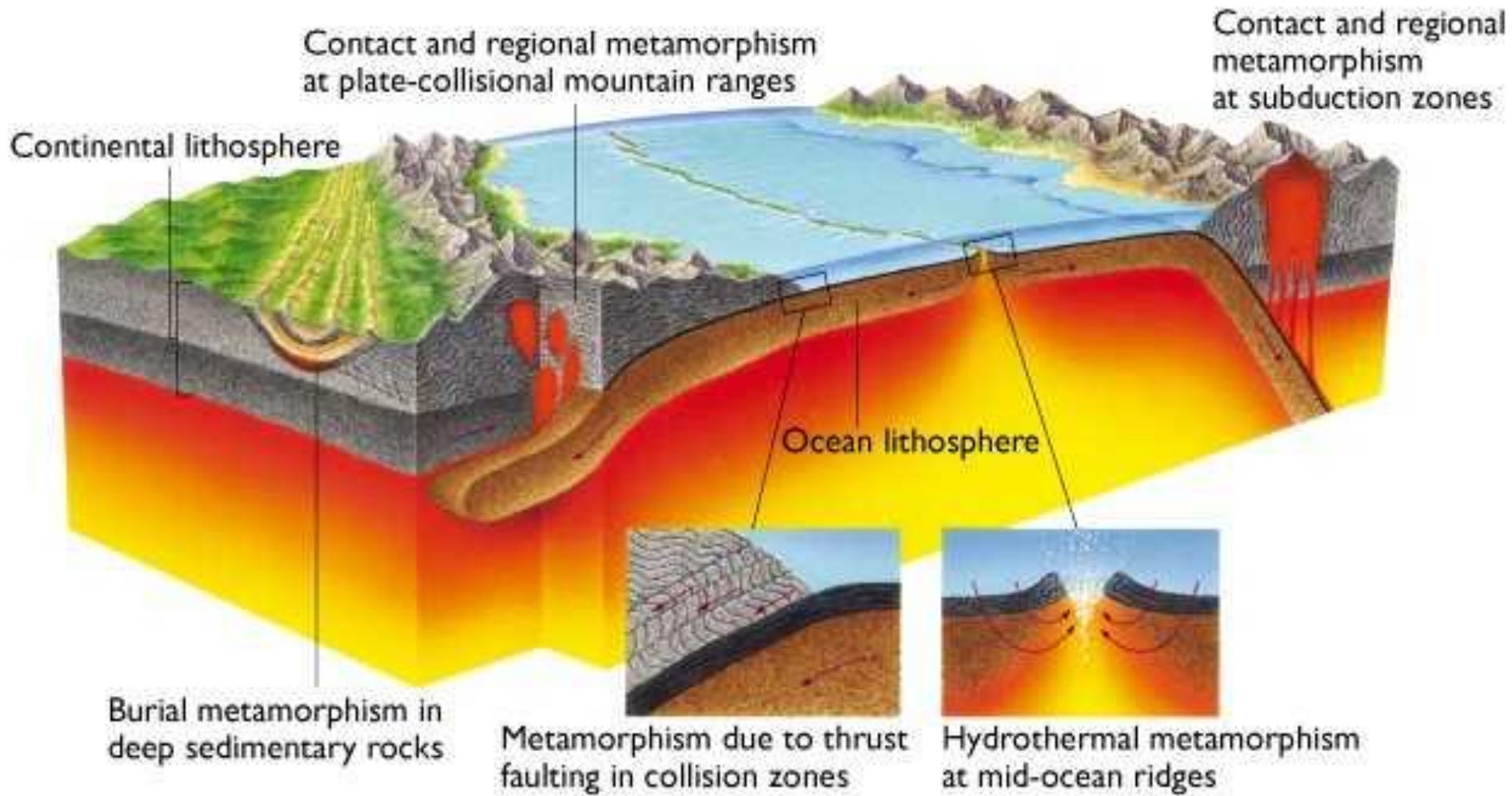
Характерный масштаб химической неоднородности горных пород и определение понятий метаморфизм и метасоматоз

Характерный масштаб химической неоднородности					
1 - 10 мм	1 - 10 см	10 - 100 см	1 - 10 м	10 - 100 м	>100 м
Неоднородности случайным образом распределены в объеме пород					
МЕТАМОРФИЗМ					МЕТАСОМАТОЗ
Неоднородности распределены в пространстве закономерно, являясь зонами метасоматической колонки					
МЕТАМОРФИЗМ				МЕТАСОМАТОЗ	

Основные факторы метаморфизма

- Основными факторами метаморфизма являются температура, давление и флюид.
- С ростом **температуры** происходят метаморфические реакции с разложением водосодерж. фаз (хлориты, слюды, амфиболы). Нижняя T граница – диагенез (100-150°C).
- С ростом **давления** происходят реакции с уменьшением объема фаз. При температурах более 600°C начинается частичное плавление некоторых пород, образуются расплавы, которые уходят на верхние горизонты, оставляя тугоплавкий остаток – рестит.

Типы метаморфизма

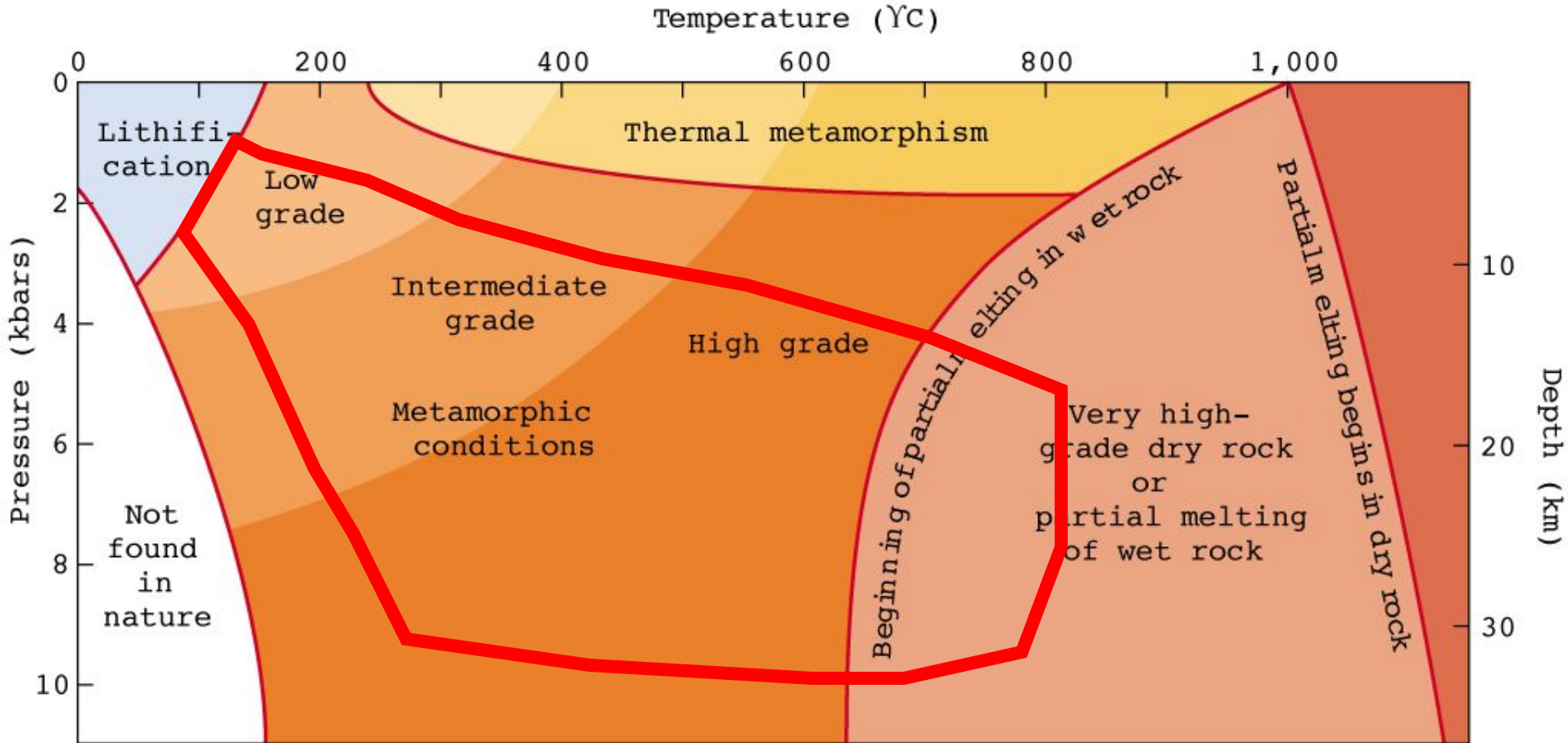


Два главных типа метам-ма в тектонически активных регионах:

(1) Контактный

(2) Региональный метаморфизм

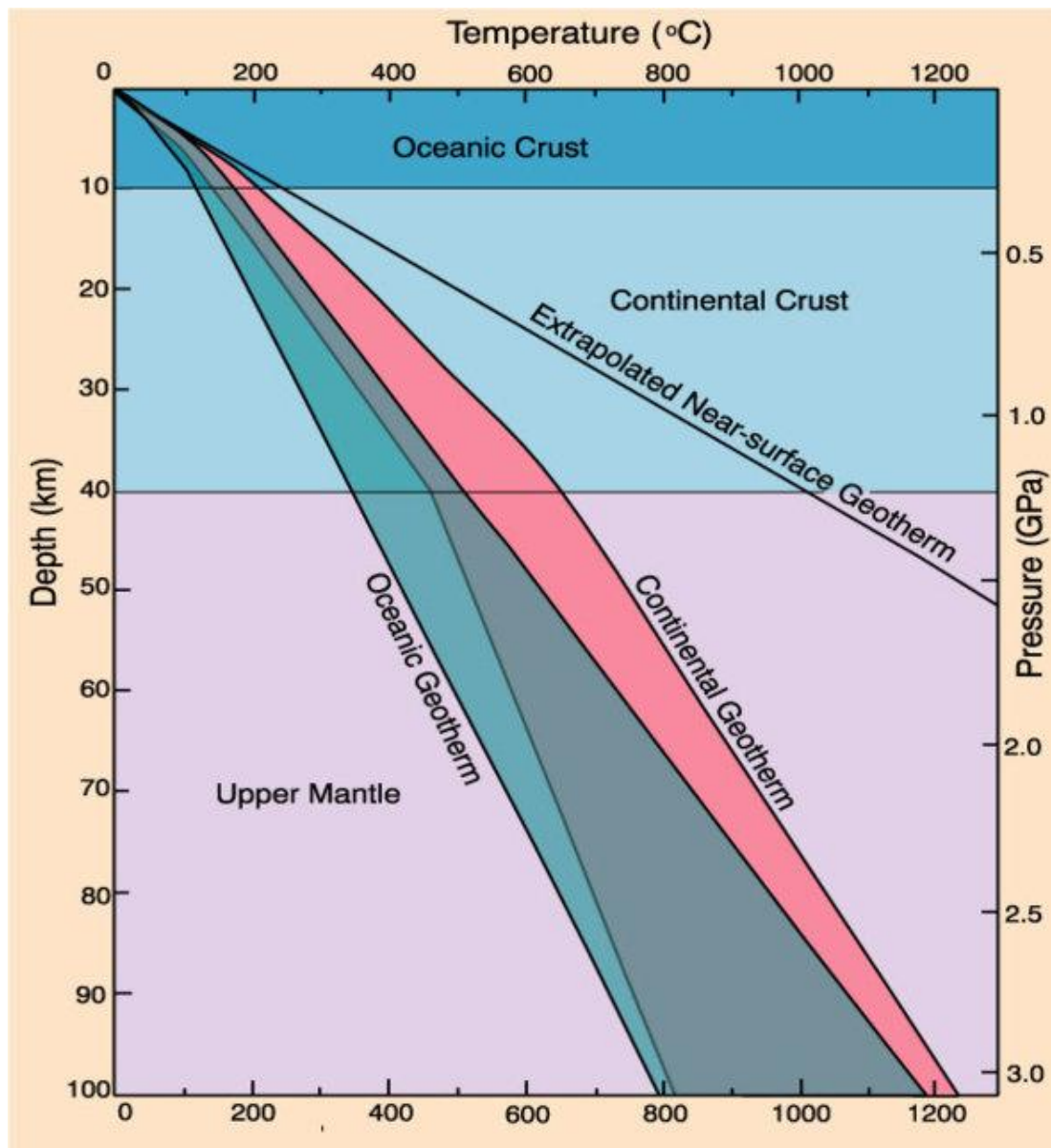
Regional Metamorphism



low to high P-T conditions

Геотермы – кривые изменения температуры с увеличением глубины

- Изограды – линии одинаковой ступени (температуры) метаморфизма
- Температура – наиболее важный фактор метаморфизма



Высоко- и низкоградиентные режимы

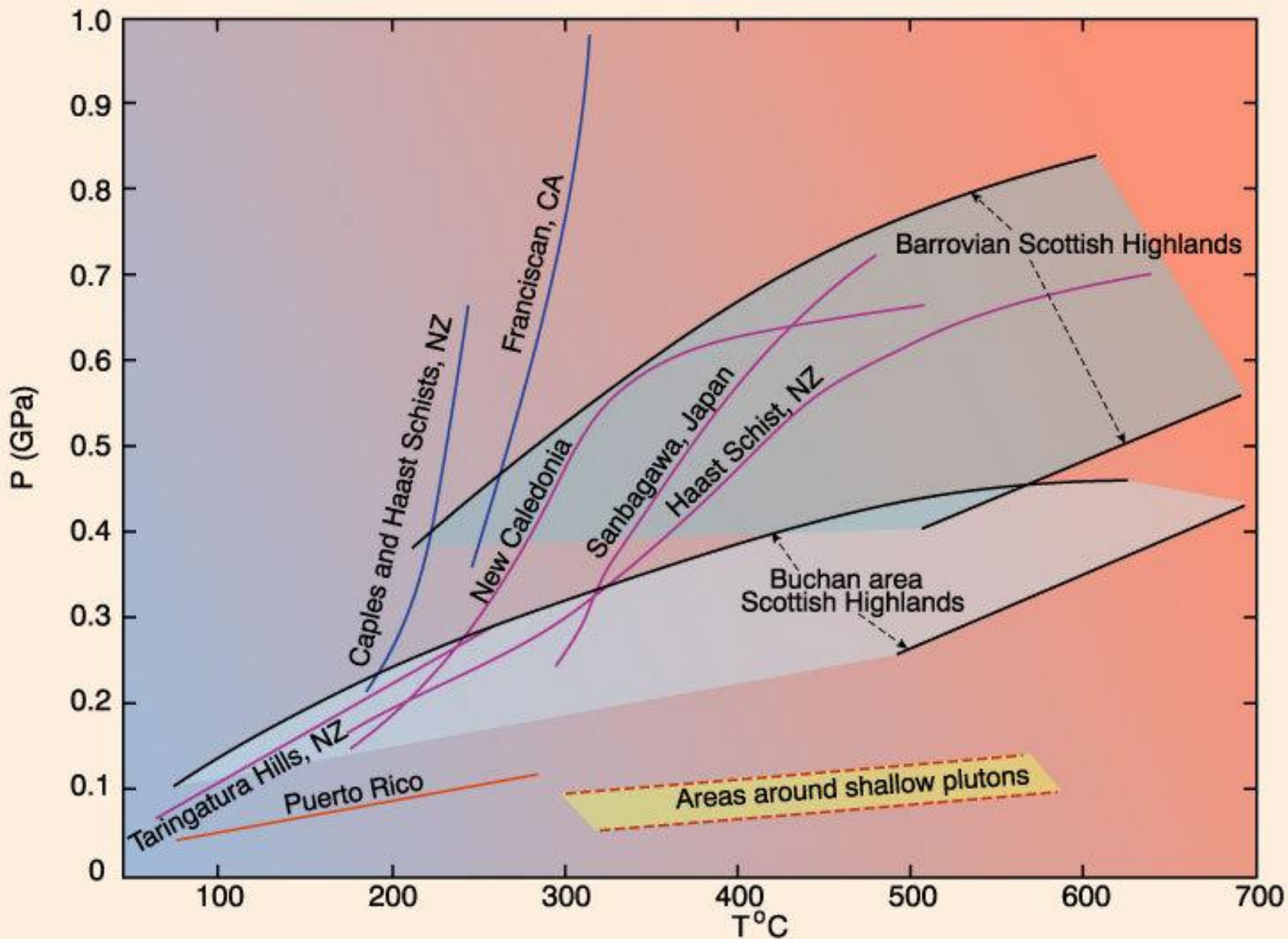


Table 7.1

Classification and Naming of Metamorphic Rocks (Based Primarily on Texture)

Nonfoliated

Name Based on Mineral Content of Rock

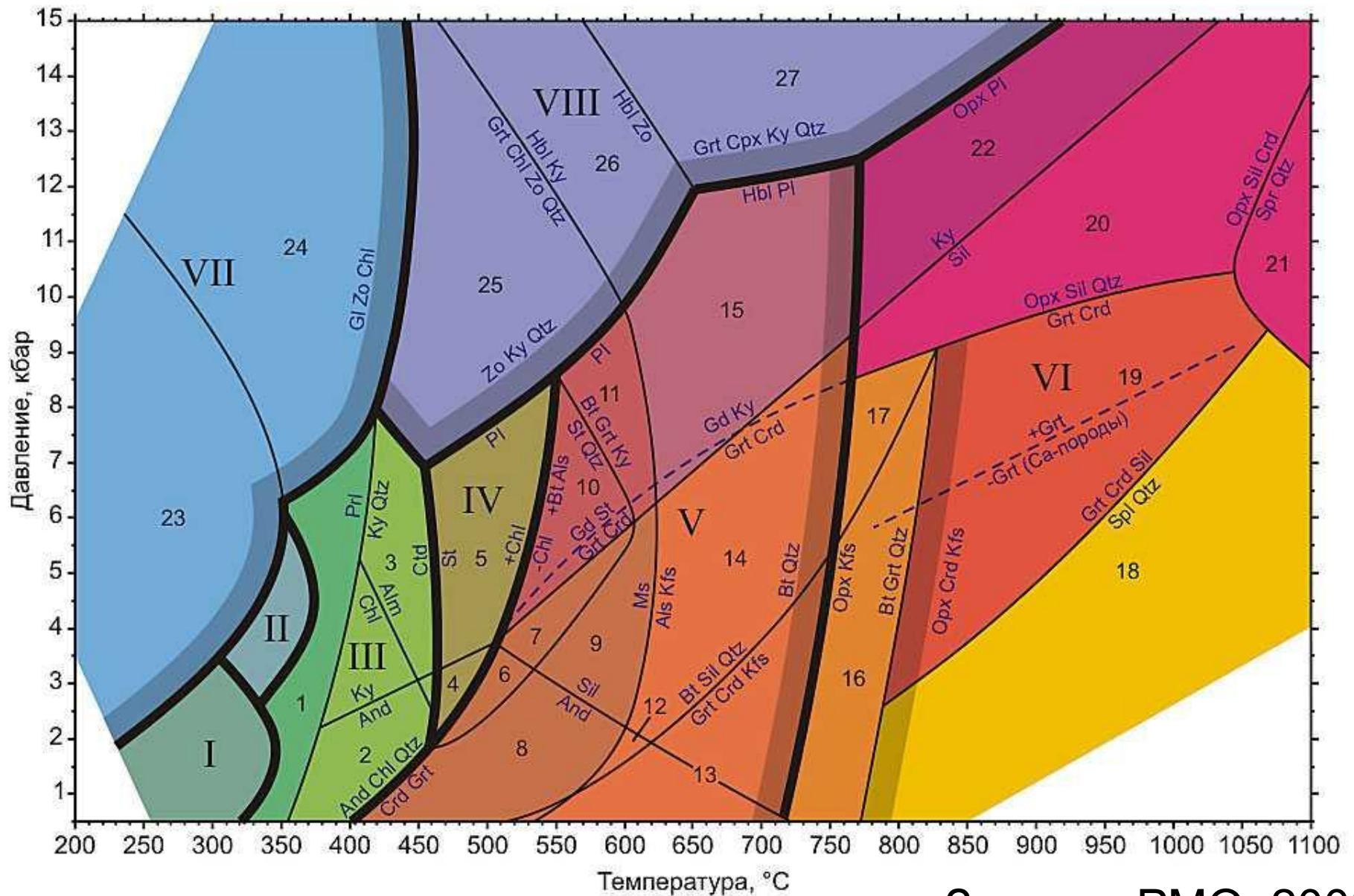
Usual Parent Rock	Rock Name	Predominant Minerals	Identifying Characteristics
Limestone Dolomite	Marble Dolomite marble	Calcite Dolomite	Coarse interlocking grains of calcite (or, less commonly, dolomite). Calcite (or dolomite) has rhombohedral cleavage; hardness intermediate between glass and fingernail. Calcite effervesces in weak acid.
Quartz sandstone	Quartzite	Quartz	Rock composed of interlocking small granules of quartz. Has a sugary appearance and vitreous luster; scratches glass.
Shale Basalt	Hornfels Hornfels	Fine-grained micas Fine-grained ferromagnesian minerals, plagioclase	A fine-grained, dark rock that generally will scratch glass. May have a few coarser minerals present.

Foliated

Name Based Principally on Kind of Foliation Regardless of Parent Rock. Adjectives Describe the Composition (e.g., biotite-garnet schist)

Texture	Rock Name	Typical Characteristic Minerals	Identifying Characteristics
Slaty	Slate	Clay and other sheet silicates	A very fine-grained rock with an earthy luster. Splits easily into thin, flat sheets.
Intermediate between slaty and schistose	Phyllite	Muscovite mica	Fine-grained rock with a silky luster. Generally splits along wavy surfaces.
Schistose	Schist	Biotite and muscovite, amphibole	Composed of visible platy or elongated minerals that show planar alignment. A wide variety of minerals can be found in various types of schist (e.g., garnet mica schist, hornblende schist, etc.).
Gneissic	Gneiss	Feldspar	Light and dark minerals are found in separate, parallel layers or lenses. Commonly, the dark layers include biotite and hornblende; the light-colored layers are composed of feldspars and quartz. The layers may be folded or appear contorted.

СХЕМА МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЦИЙ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД



I цеолитовая или пумпеллиит-пренитовая

II пумпеллиит-актинолитовая

III – зеленосланцевая

1 мусковит-стильпномелан-хлоритовая

2 мусковит-хлорит-биотитовая (\pm андалузит)

3 биотит-хлоритоид-гранатовая (\pm кианит)

IV – эпидот-амфиболитовая

4 ставролит-хлорит-андалузитовая

5 ставролит-хлорит-кианитовая

V – амфиболитовая

6 ставролит-андалузит-биотит-мусковитовая

7 ставролит-силлиманит-биотит-мусковитовая

8 биотит-андалузит-кордиерит-мусковитовая

9 биотит-силлиманит-гранат-мусковитовая

10 ставролит-кианит-биотит-мусковитовая

11 биотит-кианит-гранат-мусковитовая

12 биотит-андалузит-кордиерит-калишпатовая

13 биотит-кордиерит-гранат-калишпатовая

14 биотит-силлиманит-гранат-калишпатовая

15 биотит-кианит-гранат-калишпатовая

VI – гранулитовая

16 биотит-гиперстен-гранат-калишпатовая

17 биотит-силлиманит-кордиерит-калишпатовая

18 шпинель-кварцевая

19 гиперстен-кордиерит-гранат-калишпатовая

20 гиперстен-силлиманит-кварцевая

21 сапфирин-кварцевая

22 гиперстен-кианит-кварцевая

VII – глаукофансланцевая

23 глаукофан-цоизитовая


24 глаукофан-лавсонитовая

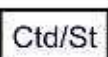
VIII – эклогитовая

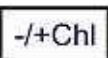
25 парагонит-цоизит-кианит-кварцевая

26 каринтин-кианит-цоизит-кварцевая

27 омфацит-кианит-гранат-кварцевая

 условия раннего метаморфизма

 Ctd/St исчезновение хлоритоида / появление ставролита:
серия сближенных линий минеральных реакций

 -/+Chl исчезновение / появление хлорита:
серия сближенных линий минеральных реакций

Хороший способ визуализировать частичное плавление – это представить холодную тарелку макарон и сыр в холодильнике. Ужин из макарон и сыра начинается с гибкой, но твердой лапши и жесткого, холодного сырного соуса. Если блюдо подогреть, сырный соус станет мягким и расплавленным, лапша испытывает то же самое. После того, как блюдо будет разогрето, если тарелку наклонят и вкусную закуску прижмут кухонной лопаткой, богатый, масляный сырный соус, очень отличающийся по составу от твердой лапши, не будет с ней смешиваться, а сформирует нечто вроде лужицы сырной магмы. Если блюдо остынет, минералы, когда-то бывшие макаронами и сыром, будут разделены процессом частичного плавления, который сформирует два новых минерала: «лапшит» и «сырит». Если рассматривать эту аналогию как описание частичного плавления силикатных пород, то РЗЭ всегда будут предпочитать перемещаться со сплавом, и всегда будут обогащаться в магме, которая движется отличной от своего первичного состава или остается как нерасплавленный минерал.