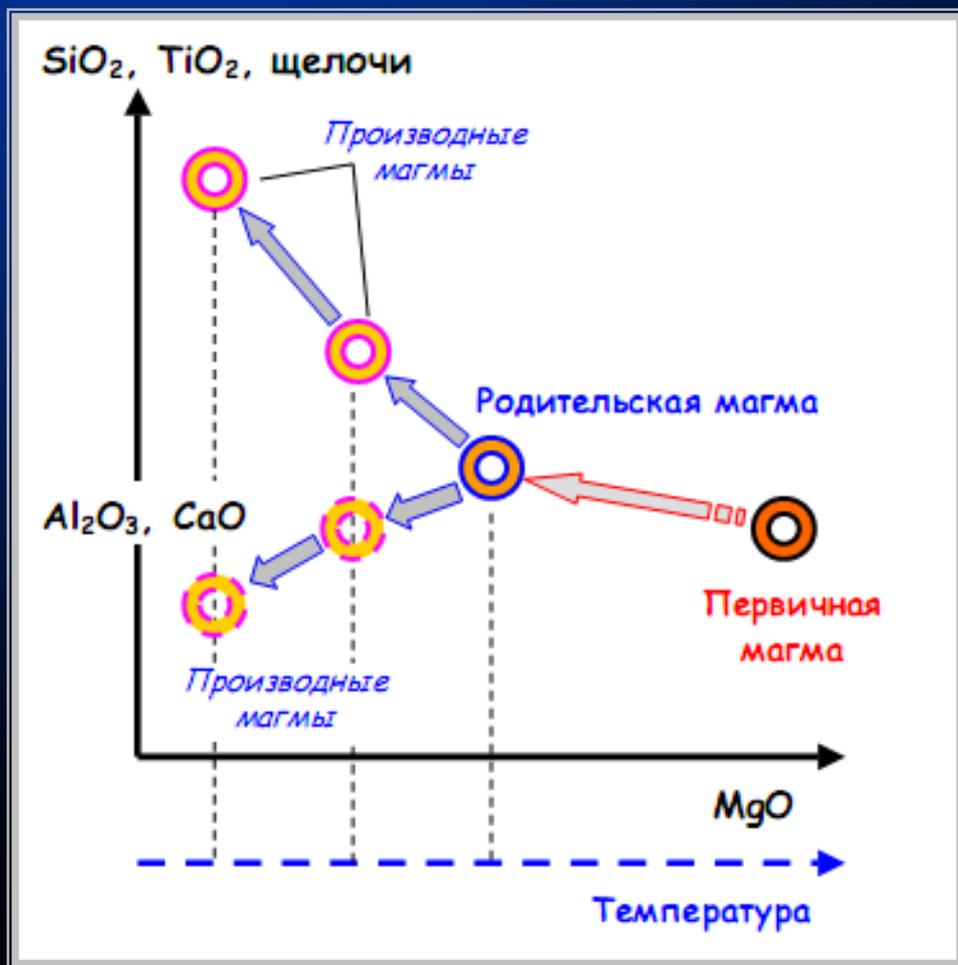


Лекция № 10:

**ПЕРВИЧНЫЕ МАГМЫ И ПРОЦЕССЫ
МАНТИЙНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

Генетические соотношения "первичной", "родительской" и "производных" магм



Расплавы, формирующиеся непосредственно в зоне плавления мантийного вещества, называются **первичной (primary) магмой**.

По современным представлениям, **первичные магмы - это продукт смешения разнообразных порций расплава**, отделяющихся от мантийного субстрата в некотором диапазоне температур и степени плавления исходного вещества.

Магнезиальность первичных (примитивных) магм

$$mg\# = MgO / (MgO + FeO_{tot})$$

или с учетом разной степени окисления железа

$$mg\# = MgO / (MgO + Fe^{2+}O) = MgO / (MgO + fFeO_{tot}),$$

$$\text{где } f = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Fe^{3+}) < 1$$

Для большинства мантийных расплавов (первичных магм)

$$mg\# = 0.68 - 0.80$$

Магнезиальность первичного (мантийного) оливина и значение коэффициента сокристаллизации K_D

Для большинства мантийных оливинов (отвечающих первичным магмам)

$$mg\# = 0.88 - 0.92$$

$$K_D = (FeO/MgO)_{ol} / (FeO/MgO)_L$$



$$(FeO/MgO)_L = (FeO/MgO)_{ol} / K_D$$

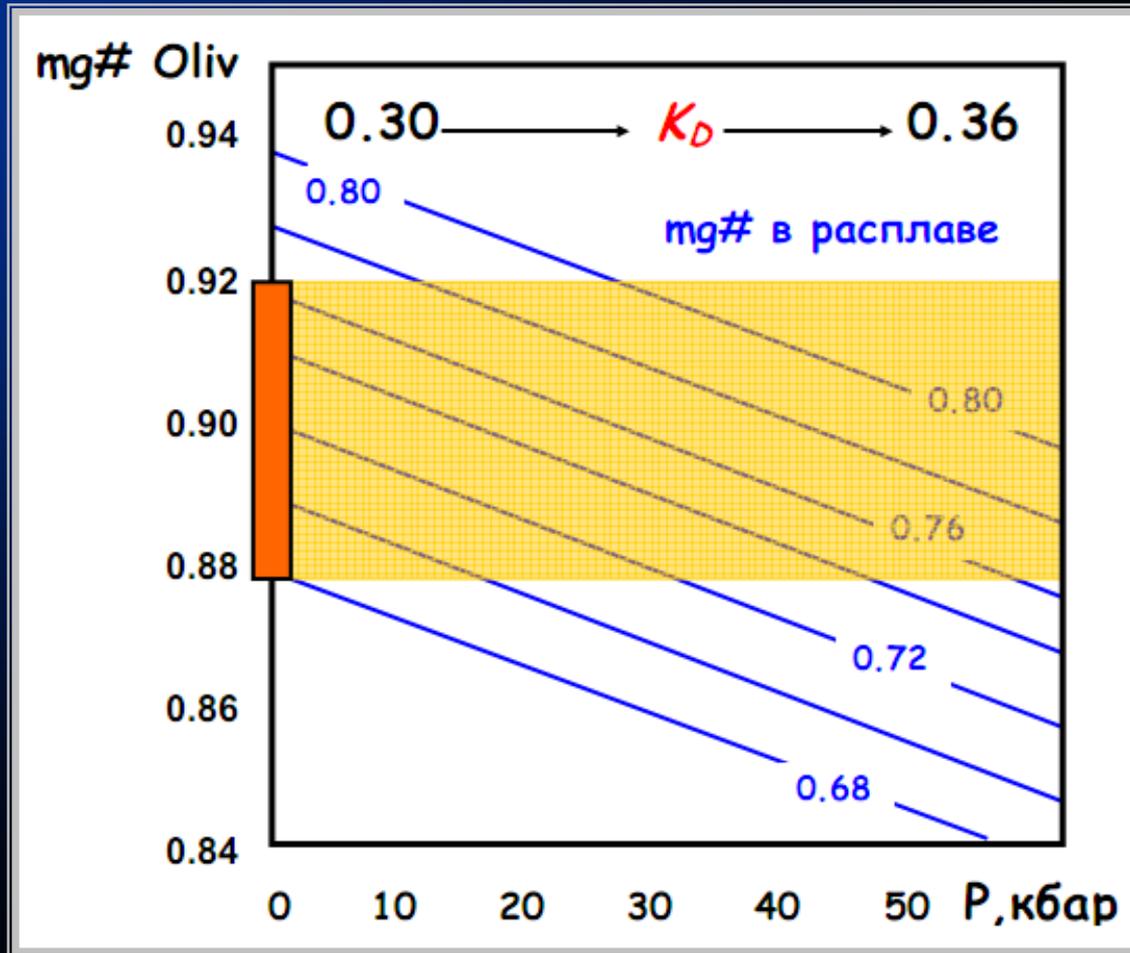


$$mg\# = 1 / [1 + (FeO/MgO)_L]$$

Как правило

$$K_D = 0.30 - 0.33$$

Зависимость K_D и магнезиальности первичных расплавов от давления



При увеличении давления K_D растет. Это приводит к тому, что Ol одного и того же состава становится равновесен с расплавами все более высокой магнезиальности.

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СПЕЦИФИКУ ПЛАВЛЕНИЯ МАНТИЙНОГО ВЕЩЕСТВА

1. **Состав мантийного источника.**
2. **Режим плавления** (*изобарический или адиабатический*).
3. **Механизм плавления** (*равновесное или фракционное*).
4. **Глубина выплавления первичных магм.**

В широком смысле – *оценка термодинамических параметров, включая давление, температуру, содержания летучих и окислительно-восстановительные условия.*

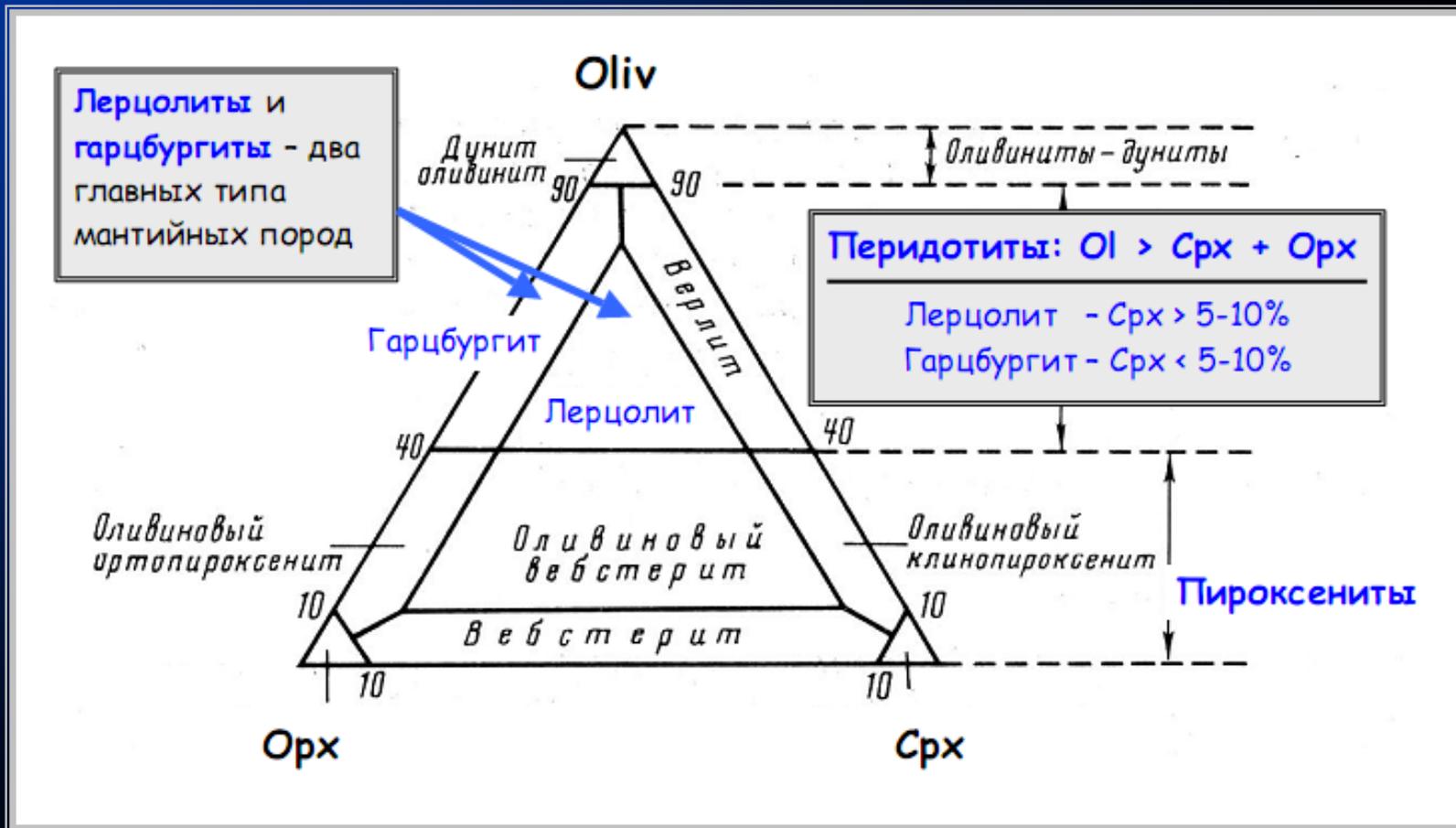
1. Возможный состав источника мантйных магм

- (1) это сам **базальт** или его интрузивный аналог – **габбро** (*на малых глубинах*),
- (2) глубинный аналог базальта – **эклогит**
(= *гранат-пироксеновая порода*),
- (3) некоторые **амфиболиты**,
- (4) **перидотиты** – ультраосновные породы, сложенные оливином, ортопироксеном и клинопироксеном.

1.1 Аргументы в пользу перидотитов как мантийного источника базальтовых магм

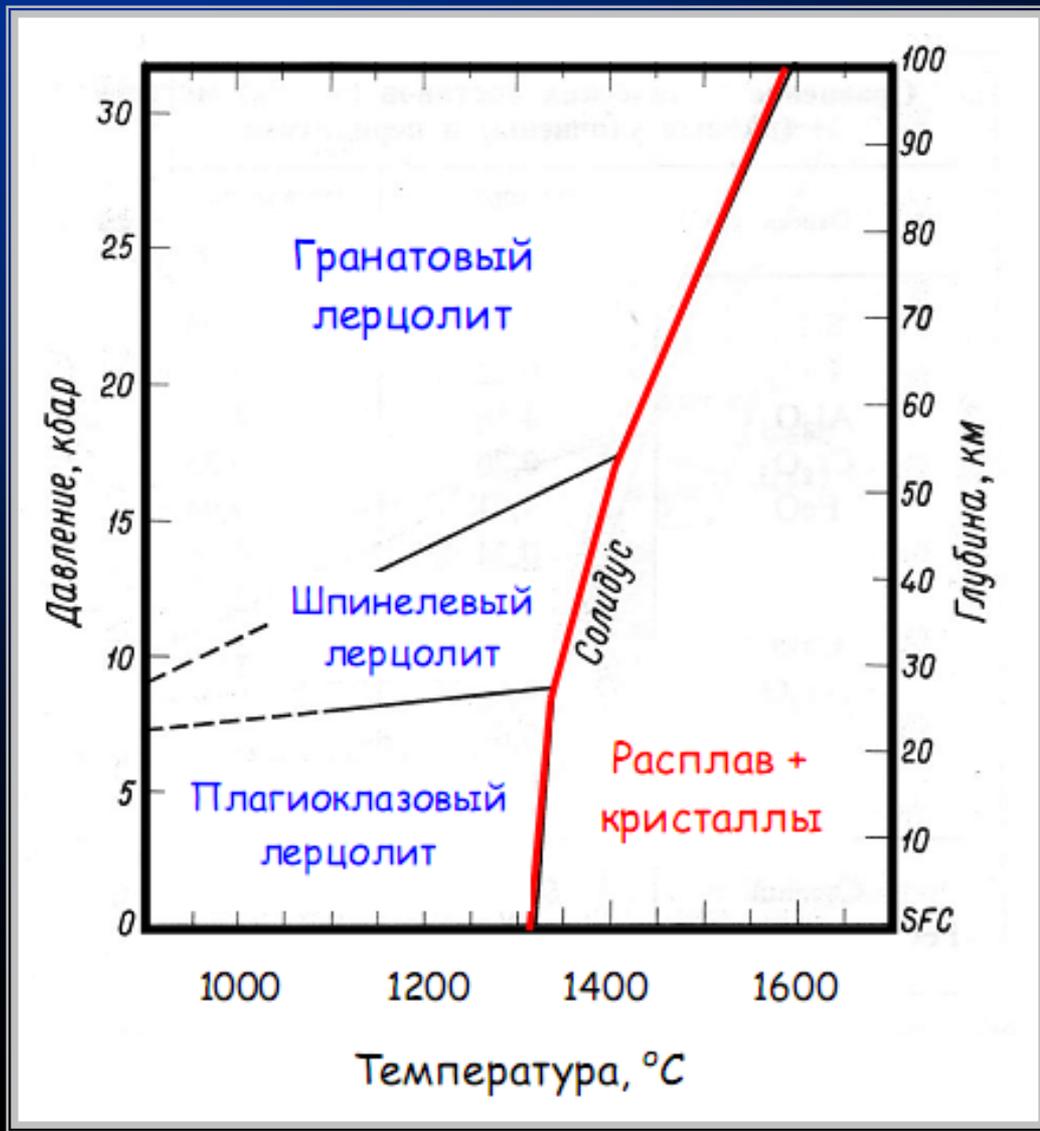
- **плотность этих пород** хорошо согласуется с сейсмическими данными по строению верхней мантии,
- **в избытке содержат высокомагнезиальный O_1** , который является важнейшим компонентом первичных магм,
- во многих вулканических центрах среди лав щелочных базальтов и кимберлитов обнаруживаются **ксенолиты или включения мантийных гипербазитов**,
- **исследования офиолитовых комплексов**, которые представляют гипербазитовые фрагменты океанической коры и верхней мантии

1.2 Схема классификации ультраосновных пород



Минеральный состав мантийных ксенолитов (или **"нодулей"**) включает полный ряд - от дунитов до перидотитов и пироксенитов. Но в этом ряду резко преобладают перидотиты, представленные **гарцбургитами** и **лерцолитами**.

1.3 Модальные разновидности и фазовые соотношения лерцолитов в зависимости от P-T условий



Плагинклав стабилен при давлениях **менее 8-10 кбар**.

В области более высоких параметров сменяется на шпинель. Диапазон устойчивости **шпинелида** простирается примерно от **10 до 15 кбар**, что отвечает глубинам **30-50 км**.

При **более высоких давлениях** устойчив **гранат**.

1.4 Понятия "рестита" и "фертильности" мантийных перидотитов

ИСХОДНЫЕ ЛЕРЦОЛИТЫ

Необедненный (*fertile*)



Плавление



Оpx Sp



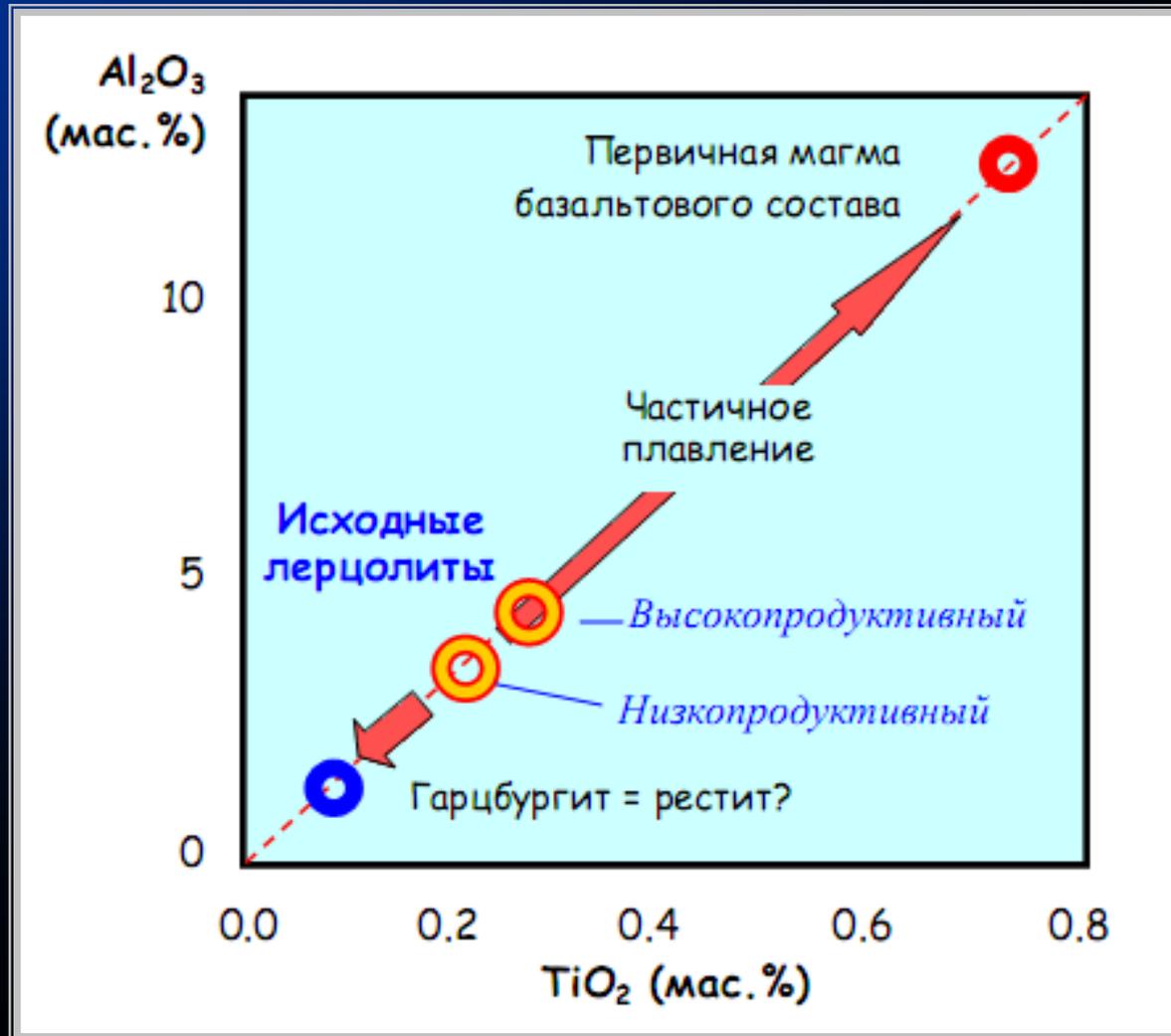
Обедненный (*unfertile*)



Плавление



1.5 Концентрационные соотношения для высоко- и низкопродуктивных лерцолитов



1.6 Составы мантийных минералов

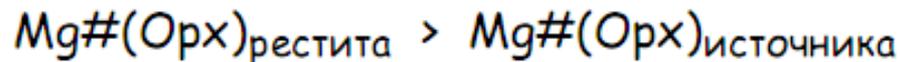
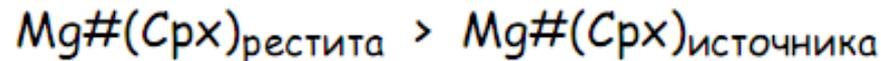
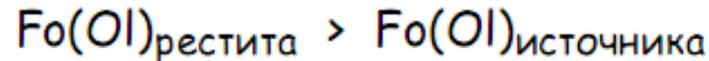
Состав минерала	Гарцбургит	Шпинеливые лерцолиты		
		Низкопродуктивные		Высокопродуктивные
Fo (Ol)	94-95	90	→	88-89
Mg# (Cpx)	~0.93	~0.91	→	~0.88
Mg# (Opx)	~0.92	~0.90	→	~0.89
Cr# (Sp)	~0.63		→	~0.30

* Cr# = Cr/(Cr+Al)

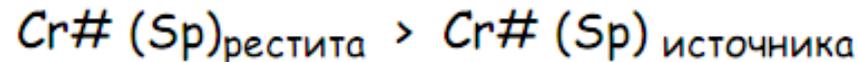
1.7 Составы мантийных минералов в зависимости от степени плавления источника

По мере увеличения степени плавления:

- (1) расплав обогащается MgO , а минералы рестита приобретают высокую магнезиальность. По этой причине:



- (2) расплав обедняется Al_2O_3 , а минералы рестита становятся богаче хромом. По этой причине всегда:

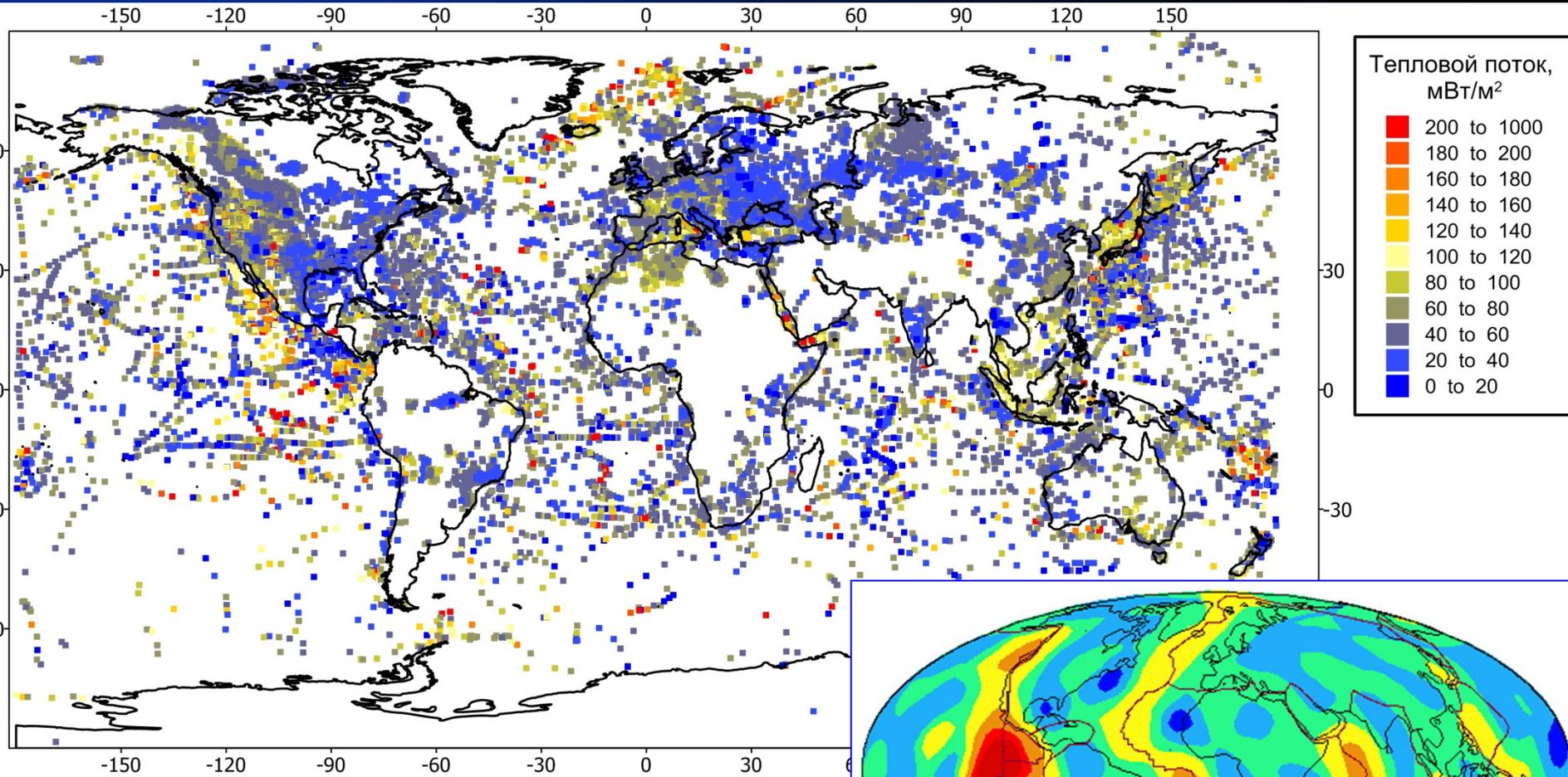


Гранаты в гранатовых лерцолитах обогащены Mg-пиропом и обеднены Ca-гроссуляром.

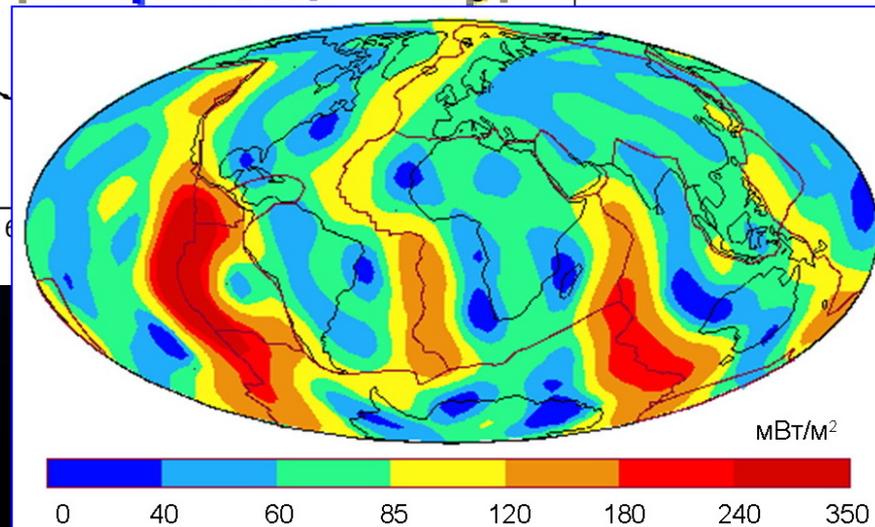
**2. Режимы выплавления первичных
мантейных магм:
*изобарический и декомпрессионный***

2.1. Основы геотермии

2.1.1 Измерения теплового потока на поверхности Земли

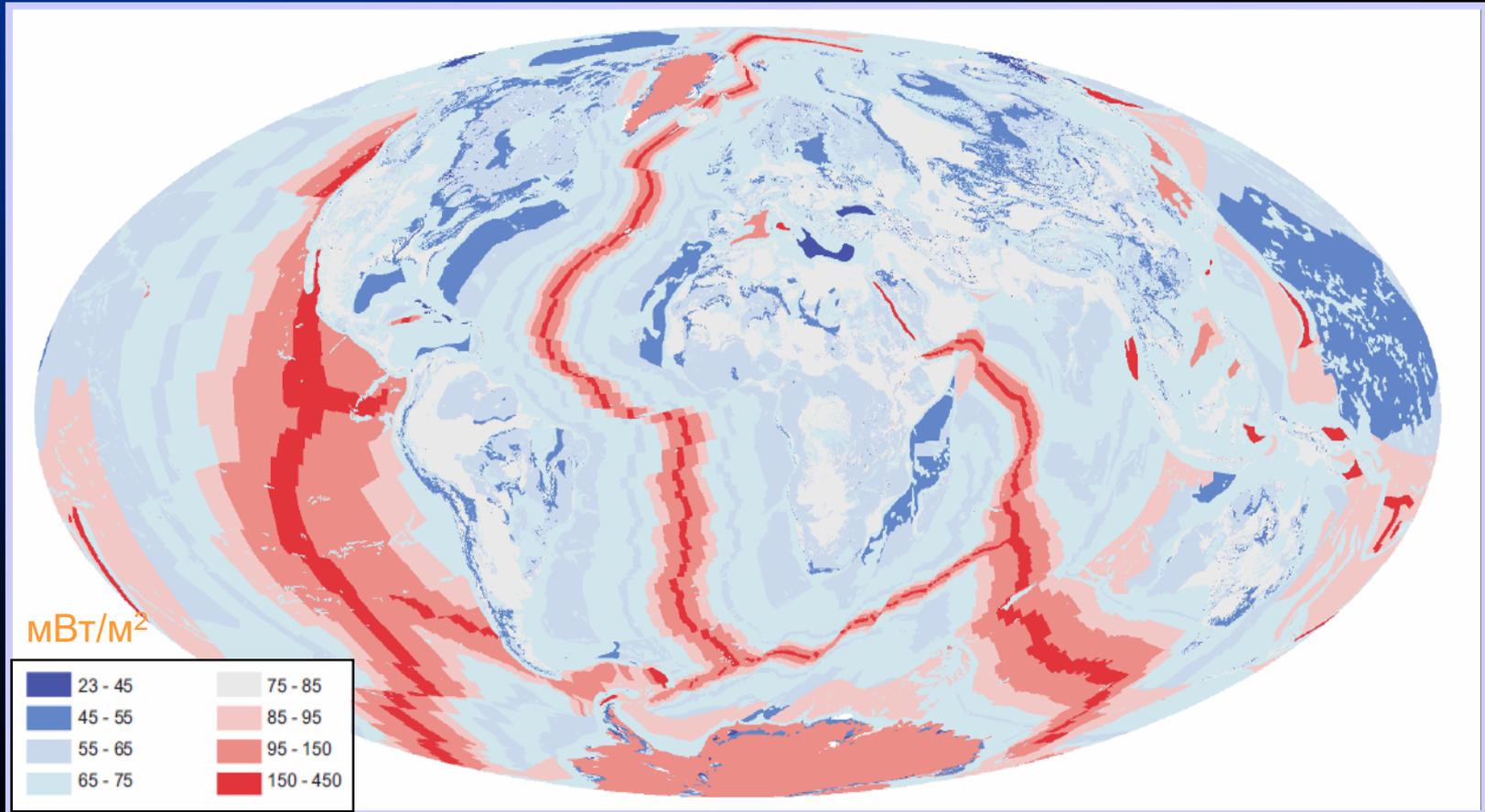


Разложение экспериментальных данных по тепловому потоку по 12 сферическим гармоникам



2.1. Основы геотермии

2.1.2 Карта теплового потока с учетом геотектоники



2.1. Основы геотермии

2.1.3 Расчет континентальных геотерм по тепловым потокам

$$T = T_s + \frac{q_m z}{\lambda} + \frac{(q_s - q_m) h_r}{\lambda} \left(1 - e^{-z/h_r} \right)$$

где q_o - поток за счет теплопроводности,
 q_m - поток за счет массопереноса.

границные условия:

- на верхней границе температура $T(0)=T_s$
- на нижней границе тепловой поток из мантии $q=q_m$.

2.1. Основы геотермии

2.1.4 Расчет океанических геотерм по тепловым потокам

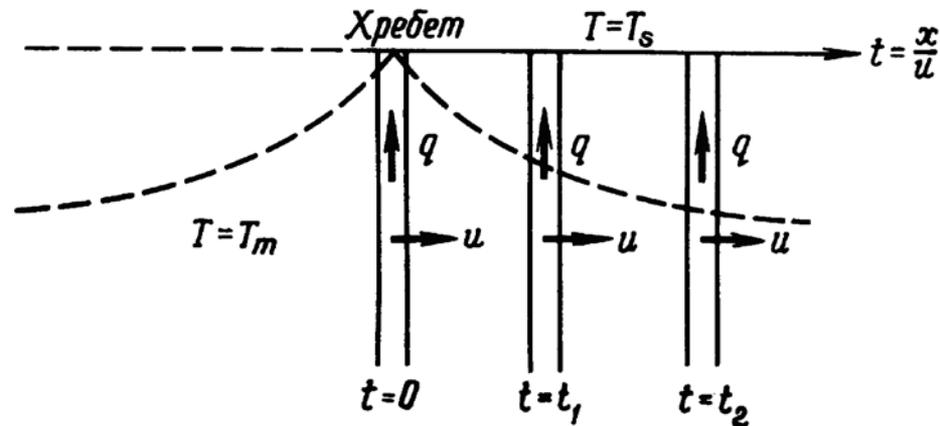
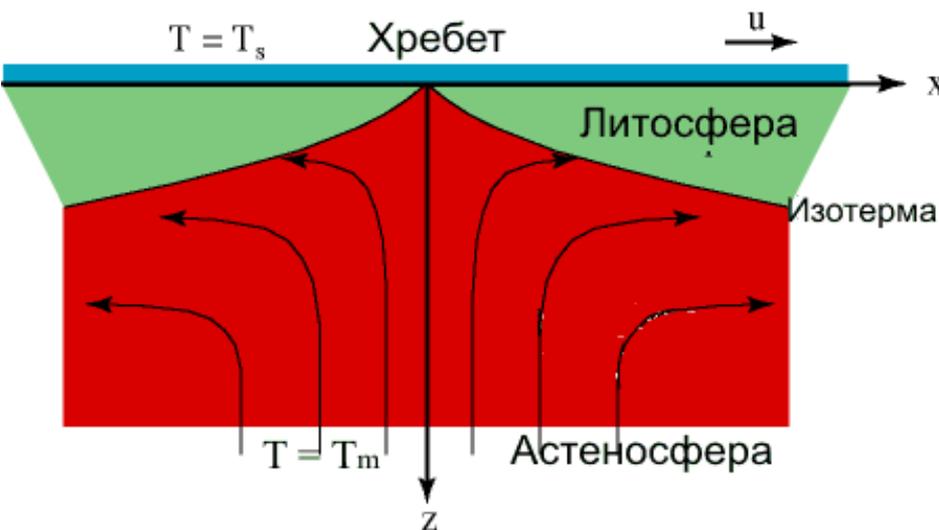
Модель остывания океанской литосферы можно свести к одномерной, т.к. $t = x/u$, где u - скорость раздвижения.

Уравнение теплопроводности:
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Начальное условие
$$T(0, z) = \begin{cases} T_s, & z = 0 \\ T_m, & z > 0 \end{cases}$$

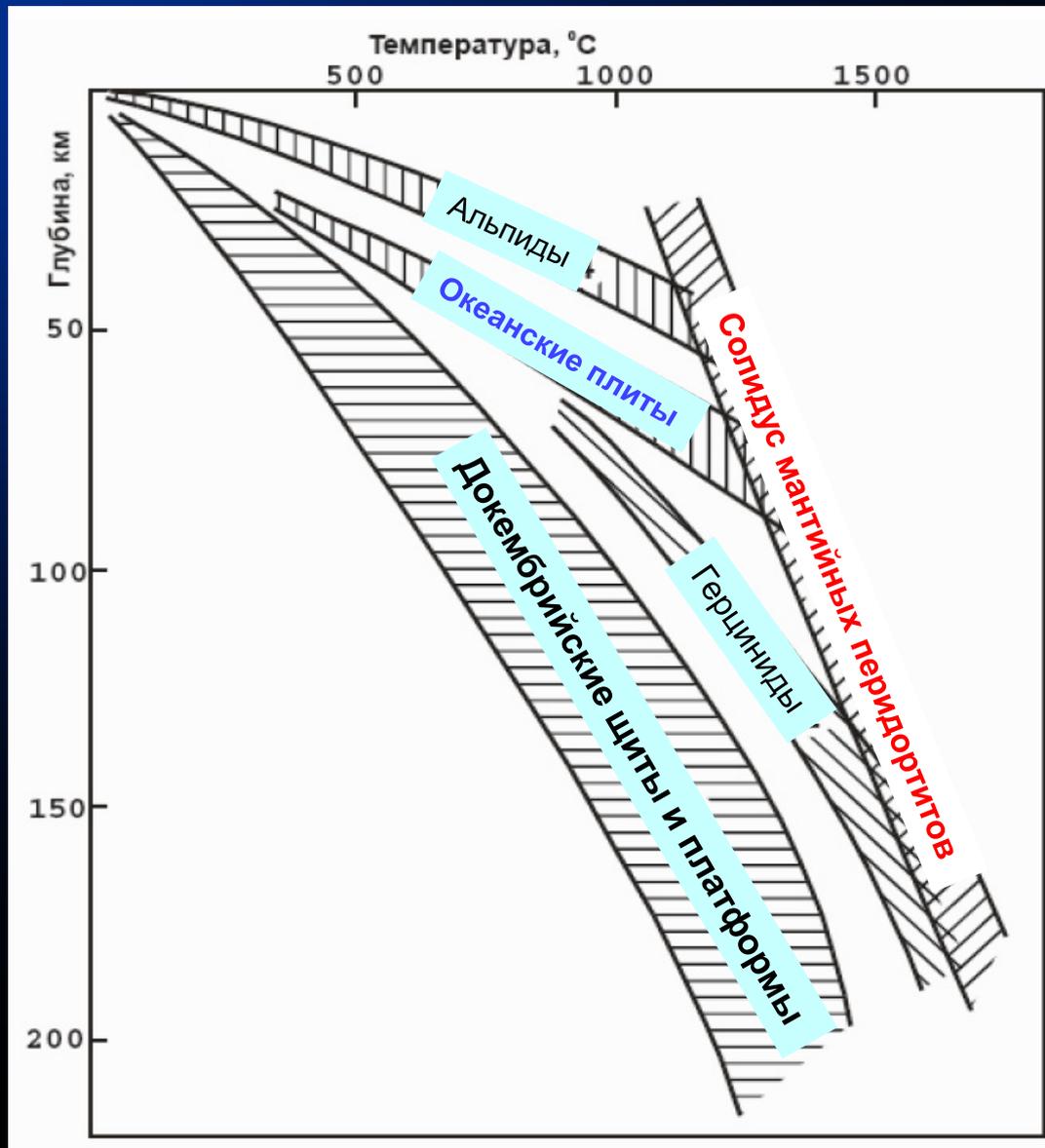
краевые условия:
$$T(0, t) = T_s, \quad T(L, t) = T_m,$$

где T_m - температура мантийного вещества, T_s - температура поверхности.



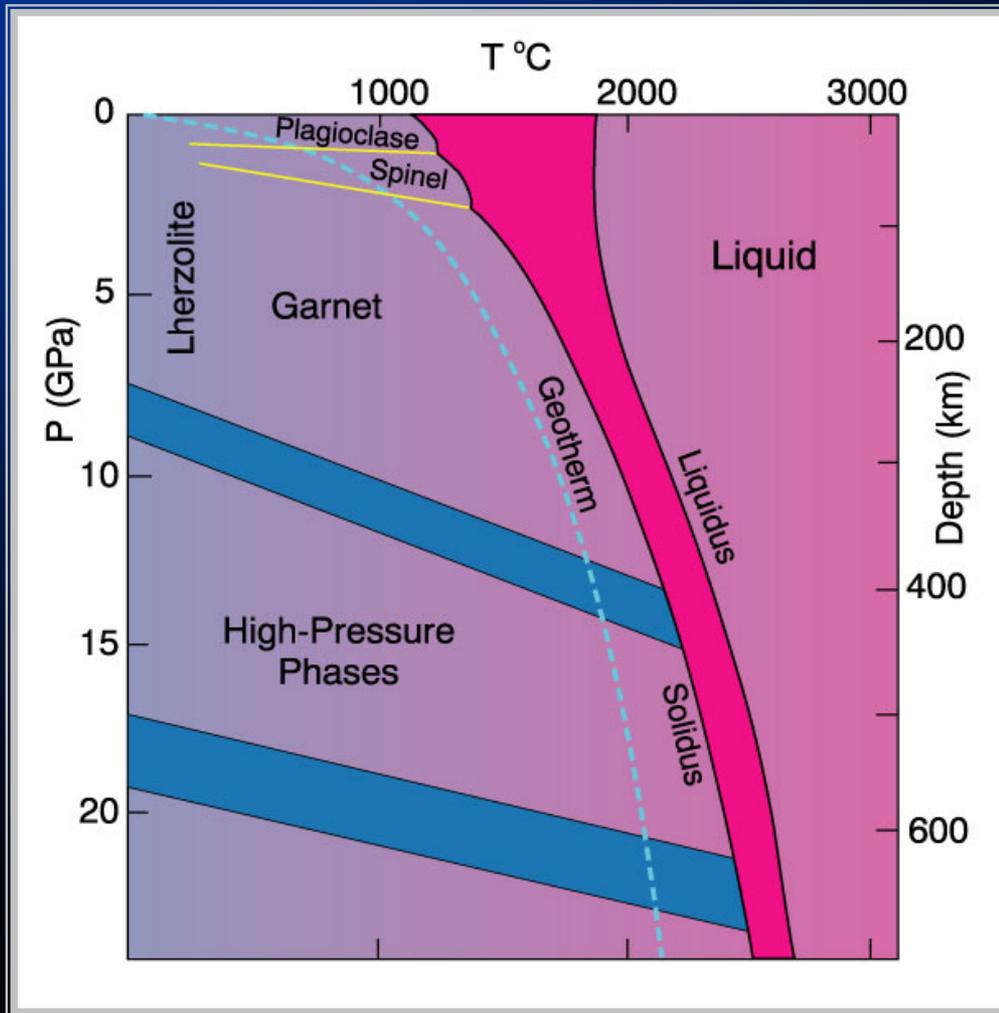
2.1. Основы геотермии

2.1.5 Геотермы для континентов и океанов



2.2 Изобарический режим плавления ($P=const$)

2.2.1 Фазовые отношения лерцолита при разных давлениях



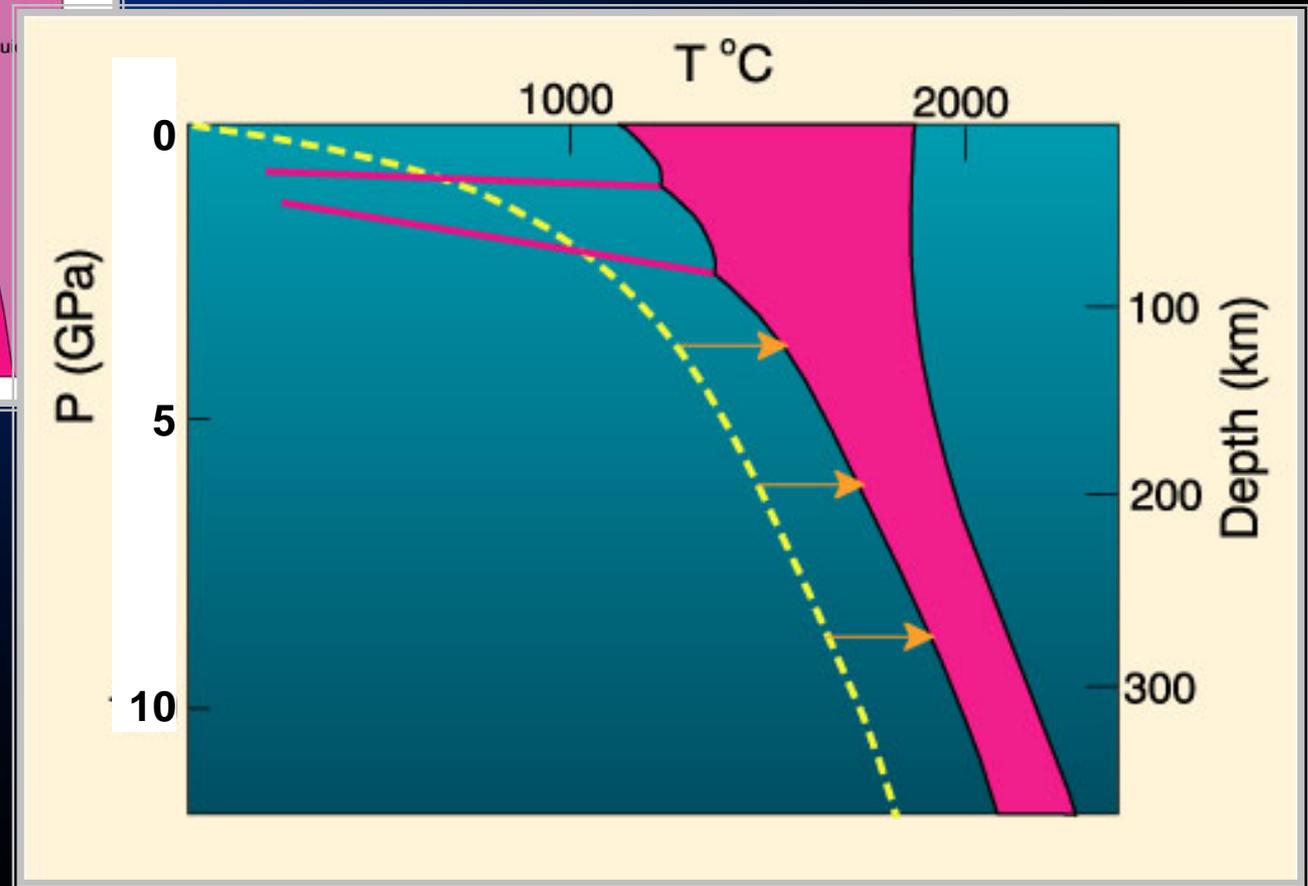
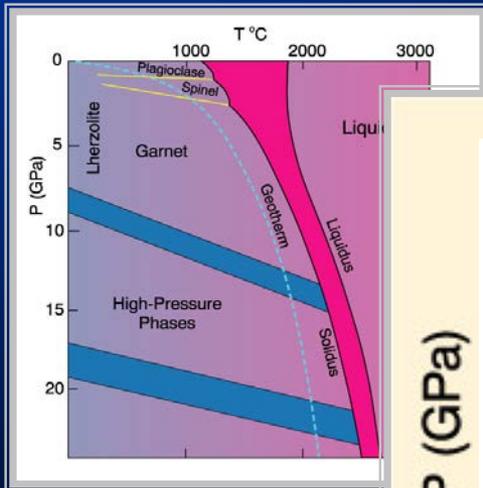
- **Плагиоклаз**
↳ shallow (< 50 km)
- **Шпинель**
↳ 50-80 km
- **Гранат**
↳ 80-400 km
- **Si → VI координация**
↳ > 400 km

Запомним: 1 GPa = 10 кбар

2.2 Изобарический режим плавления

2.2.2 Сухие условия

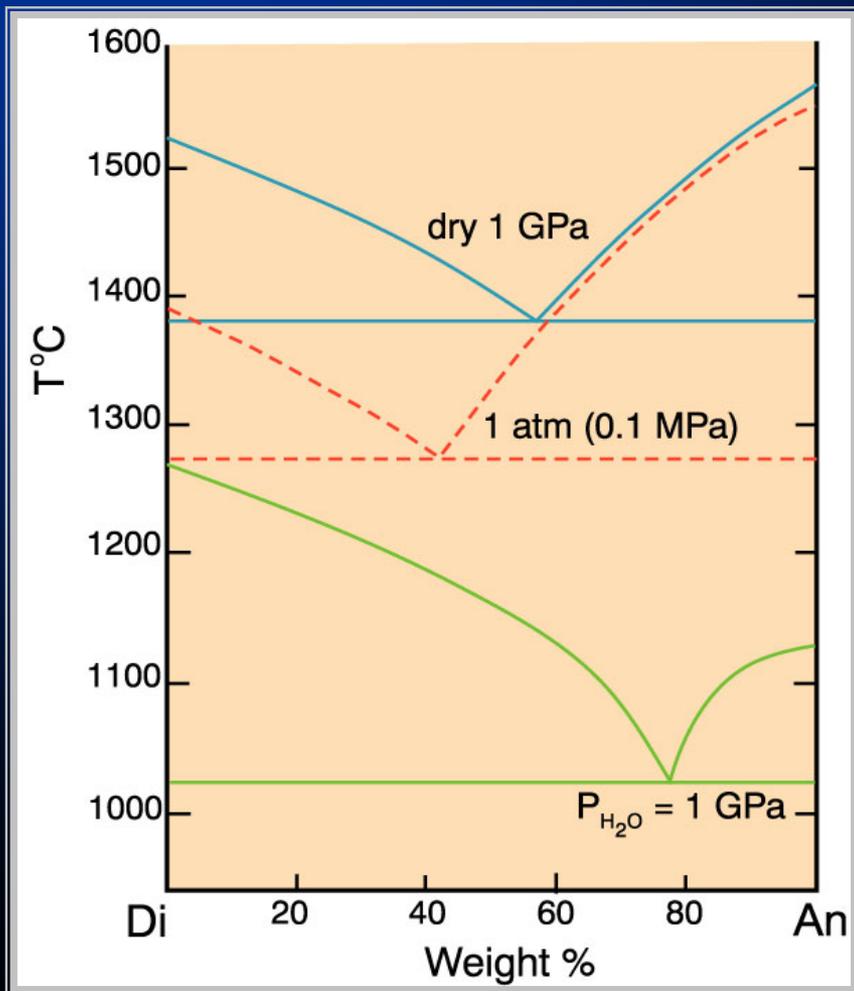
Главный фактор плавления – нагрев



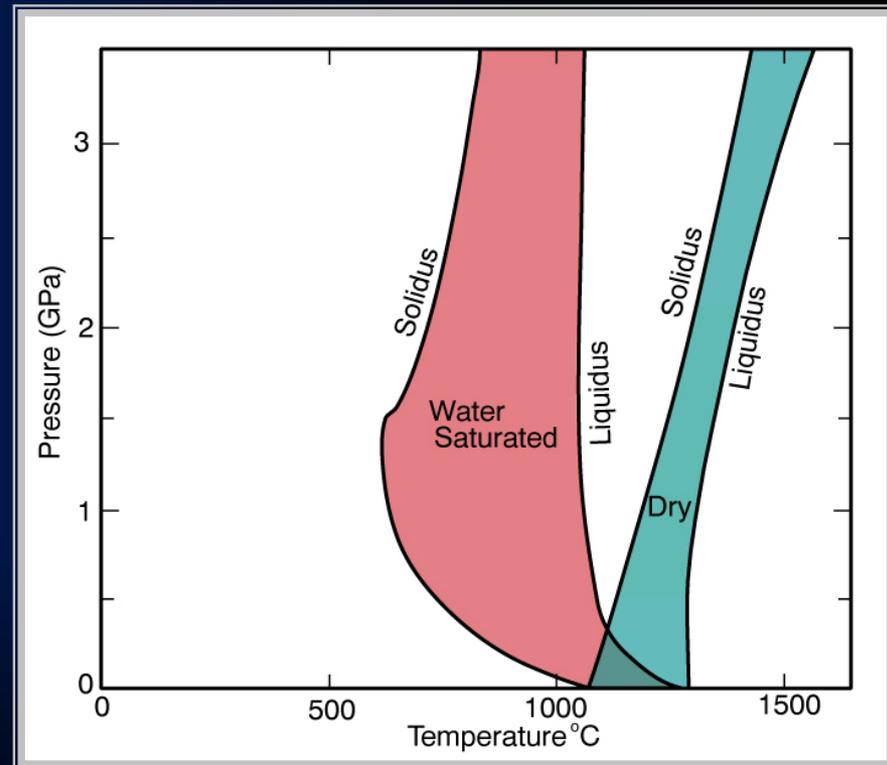
Другой важный фактор – летучие !

2.2 Изобарический режим плавления – влияние летучих

2.2.3 Влияние летучих (на примере системы Di-An и габбро)



The effect of H₂O on the diopside-anorthite liquidus. Dry and 1 atm from Figure 7-16, P_{H₂O} = P_{total} curve for 1 GPa from Yoder (1965). CIW Yb 64.

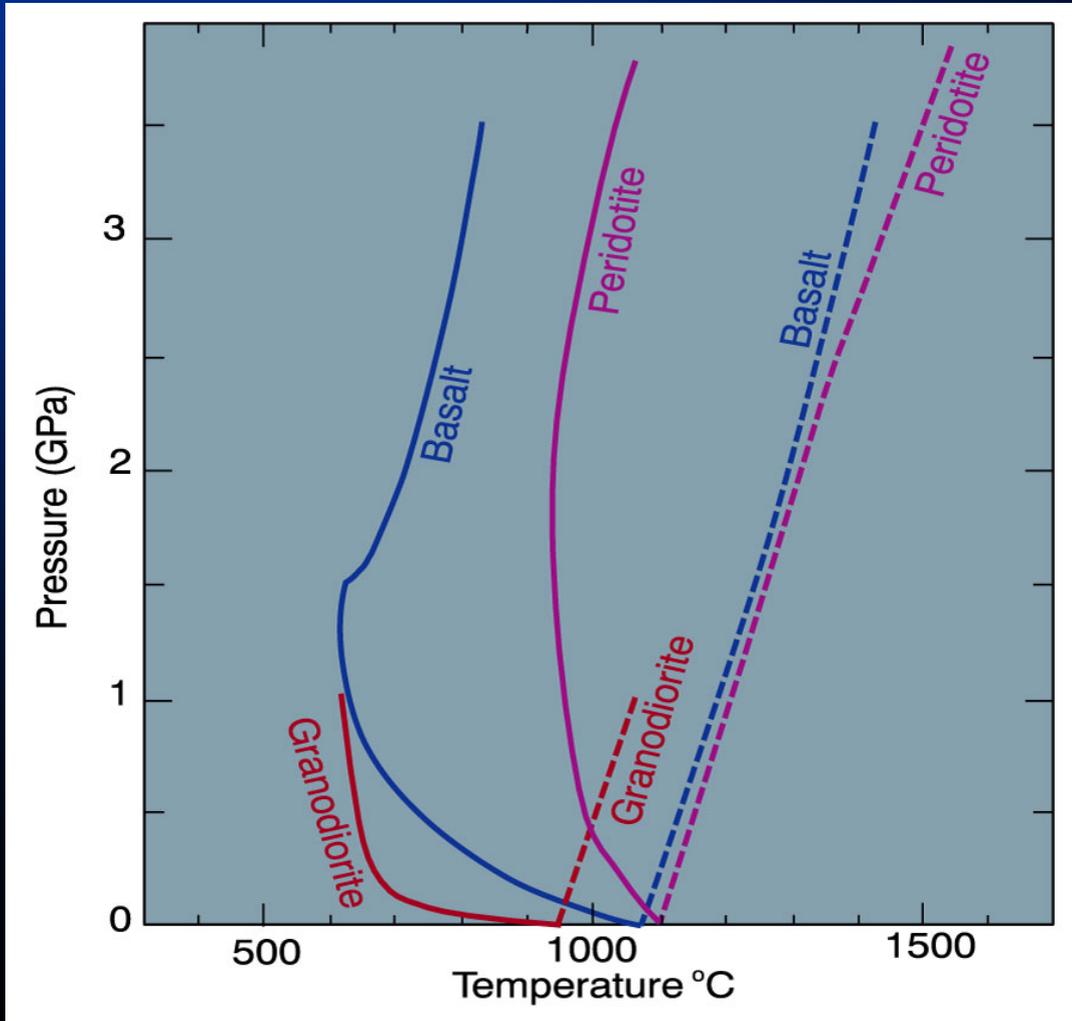


Экспериментально установленные интервалы плавления габбро в безводных (“dry”) и водонасыщенных (“water-saturated”) условиях.

По результатам Lambert and Wyllie (1972). J. Geol., 80, 693-708.

2.2 Изобарический режим плавления – влияние летучих

2.2.4 Солидусы мафит-ультрамафитовых пород



Чем более основная порода
- тем выше солидус!

Солидусы водонасыщенных и безводных систем для **гранодиорита** (Robertson and Wyllie, 1971), **габбро** (Lambert and Wyllie, 1972) и **перидотита** (H₂O-saturated: Kushiro *et al.*, 1968; dry: Ito and Kennedy, 1967).

2.3 Декомпрессионный режим плавления

2.3.1 Понятие адиабатических процессов

- В химической термодинамике **адиабатические условия подразумевают наличие изолированной системы**, которая не может обмениваться теплом с внешней средой
- При изменении внешних условий **в адиабатической системе (за счет внутреннего запаса тепла) может совершаться работа**, в том числе - процессы фазовых превращений
- Применительно к недрам Земли - **это изменение давления с глубиной!** Соответственно, различают адиабатическую компрессию и адиабатическую декомпрессию.

2.3 Декомпрессионный режим плавления

2.3.2. Адиабатические градиенты

Повышение давления (компрессия) за счет сжимаемости пород приводит к уменьшению их объема и небольшому повышению температуры

При понижении давления (декомпрессии) происходит расширение объема, но понижение температуры.

Пример – это знает каждый, кто ходил в горы. Поднимаешься в ясную погоду, а ощущение, что все прохладнее и прохладнее, хотя окружающие горы воздушные массы, как-будто, одни и те же.

*В первом приближении подобные адиабатические процессы можно отнести к **изоэнтропическим** (постоянство энтропии), что позволяет рассчитать так-называемый **адиабатический градиент**.*

2.3 Декомпрессионный режим плавления

2.3.3 Мантийная адиабата при подъеме ($P \rightarrow 0$)



$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_s = \frac{\alpha g T}{c_p}$$

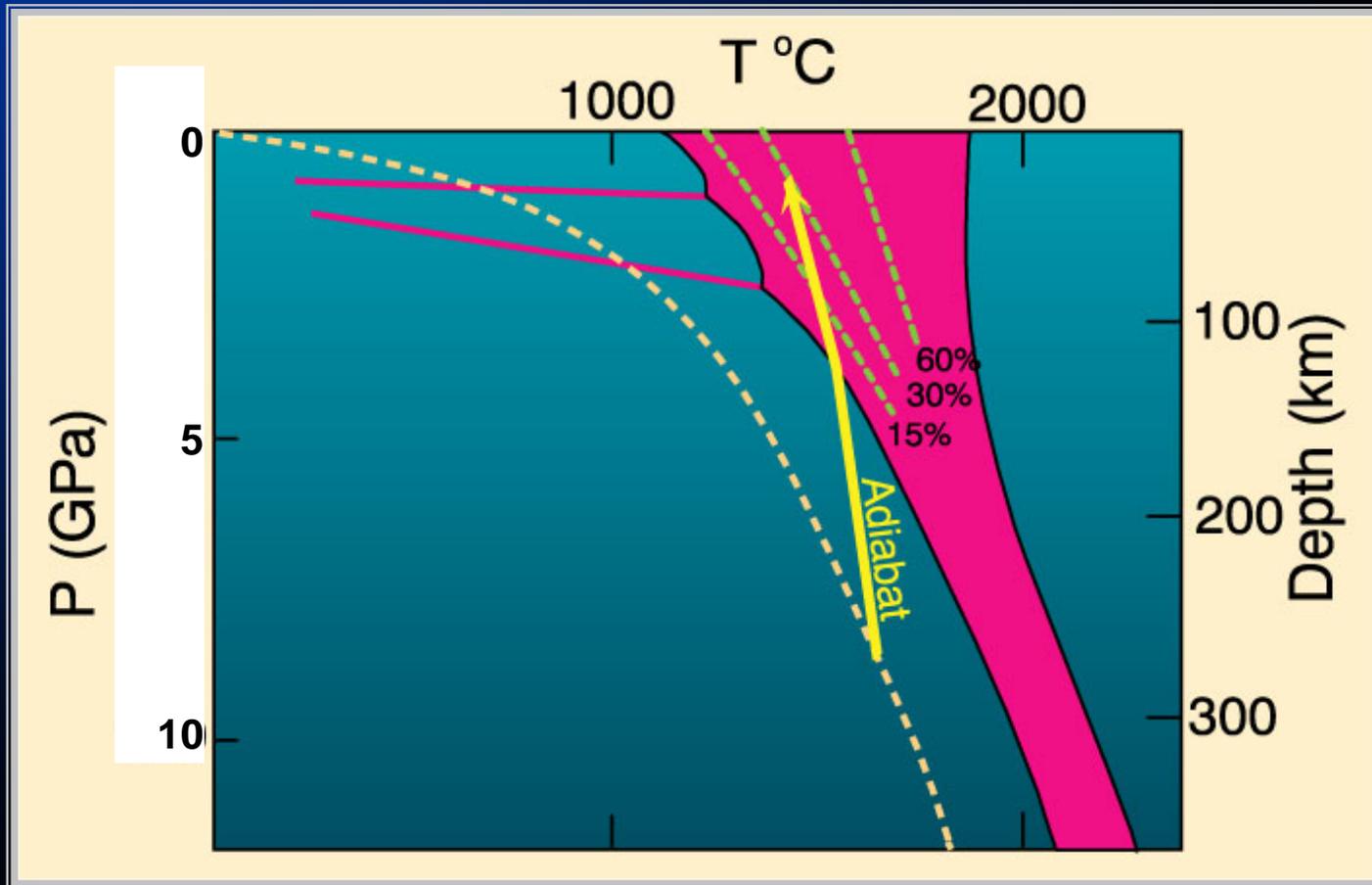
α – коэфф. термич. расширения, c_p – теплоемкость вещества, T – абсолютная температура

Адиабатический градиент – это скорость повышения температуры с глубиной – как результат сжимаемости пород под давлением вышележащих масс

Примерно $10^\circ\text{C}/\text{км}$ для твердого вещества и около $0.6^\circ\text{C}/\text{км}$ для расплава

2.3 Декомпрессионный режим плавления

2.3.4 Адиабатическое плавление при подъеме ($P \rightarrow 0$)



За счет декомпресии систему можно расплавить примерно на 30%

2.3 Декомпрессионный режим плавления

2.3.5 Потенциальная температура мантии и граница термальной литосферы

Океанские геотермы для литосферы разного

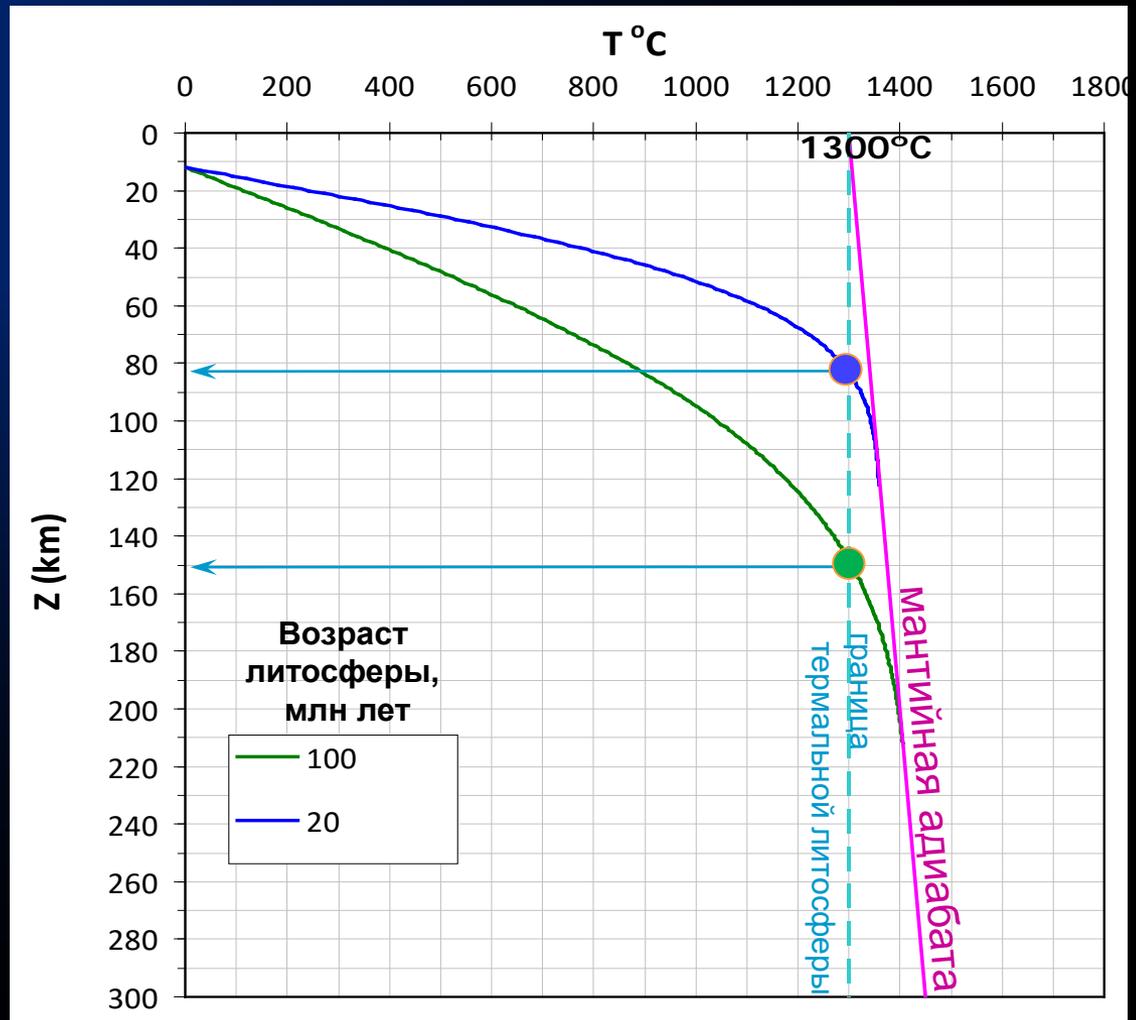
возраста

при $T_m - T_s \approx T_p = 1300^\circ\text{C}$,

где T_p - потенциальная температура мантии

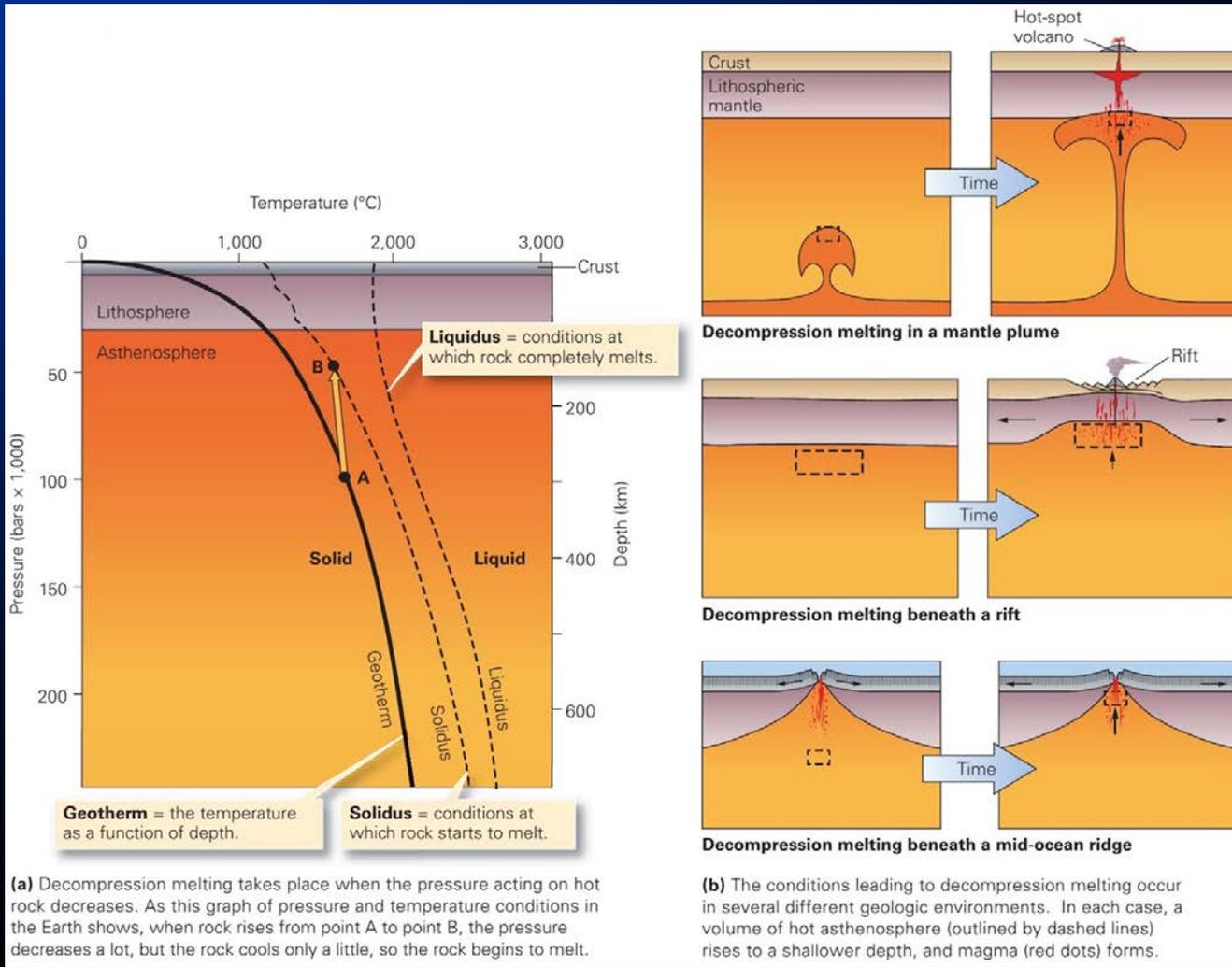
$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_s = \frac{\alpha g T}{c_p}$$

$$T_p = T \exp\left(-\frac{g \alpha z}{C_p}\right)$$



2.3 Декомпрессионный режим плавления

2.3.6 Геодинамические ситуации



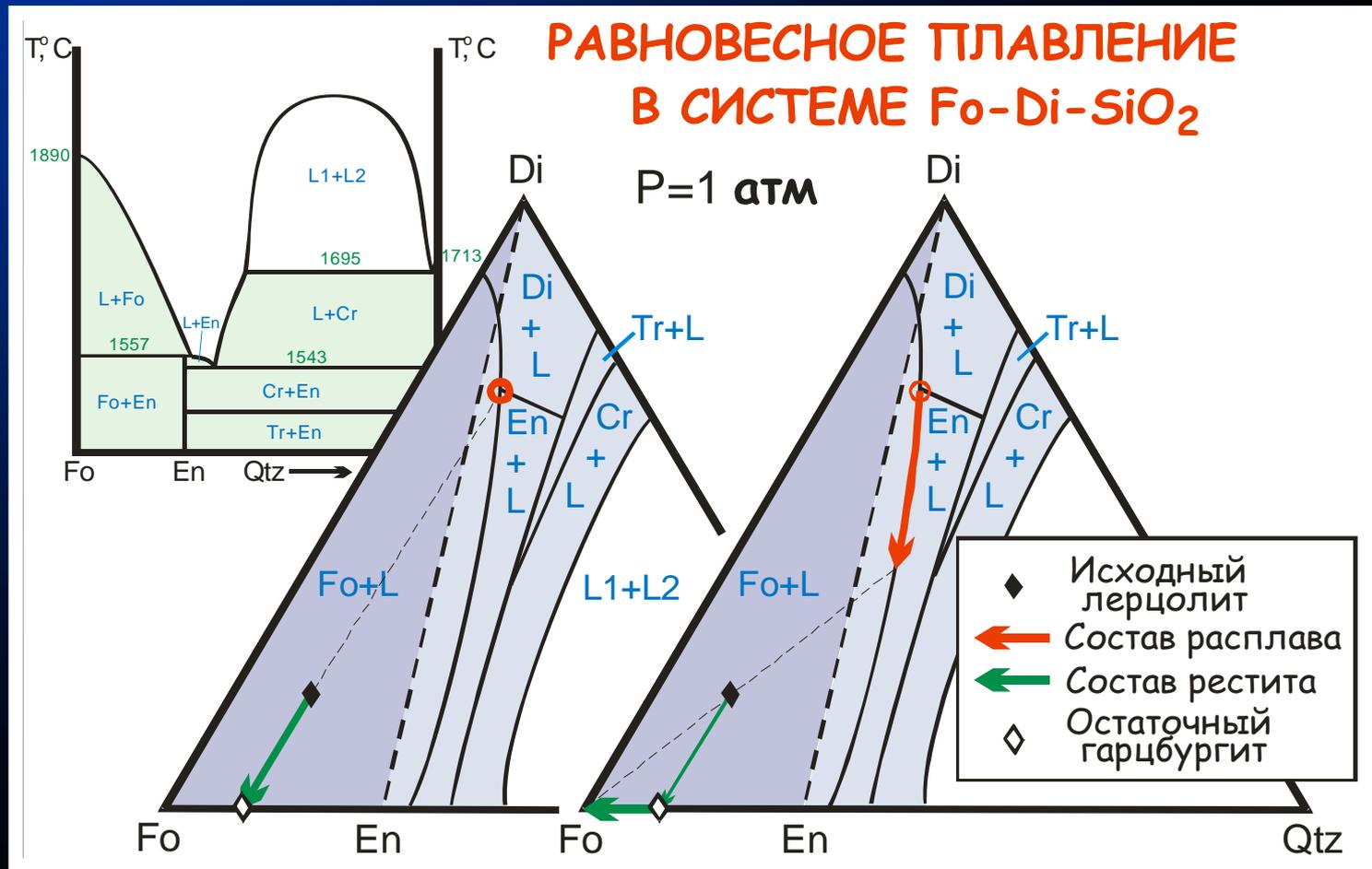
Горячая точка

Континентальный рифт

Зона спрединга

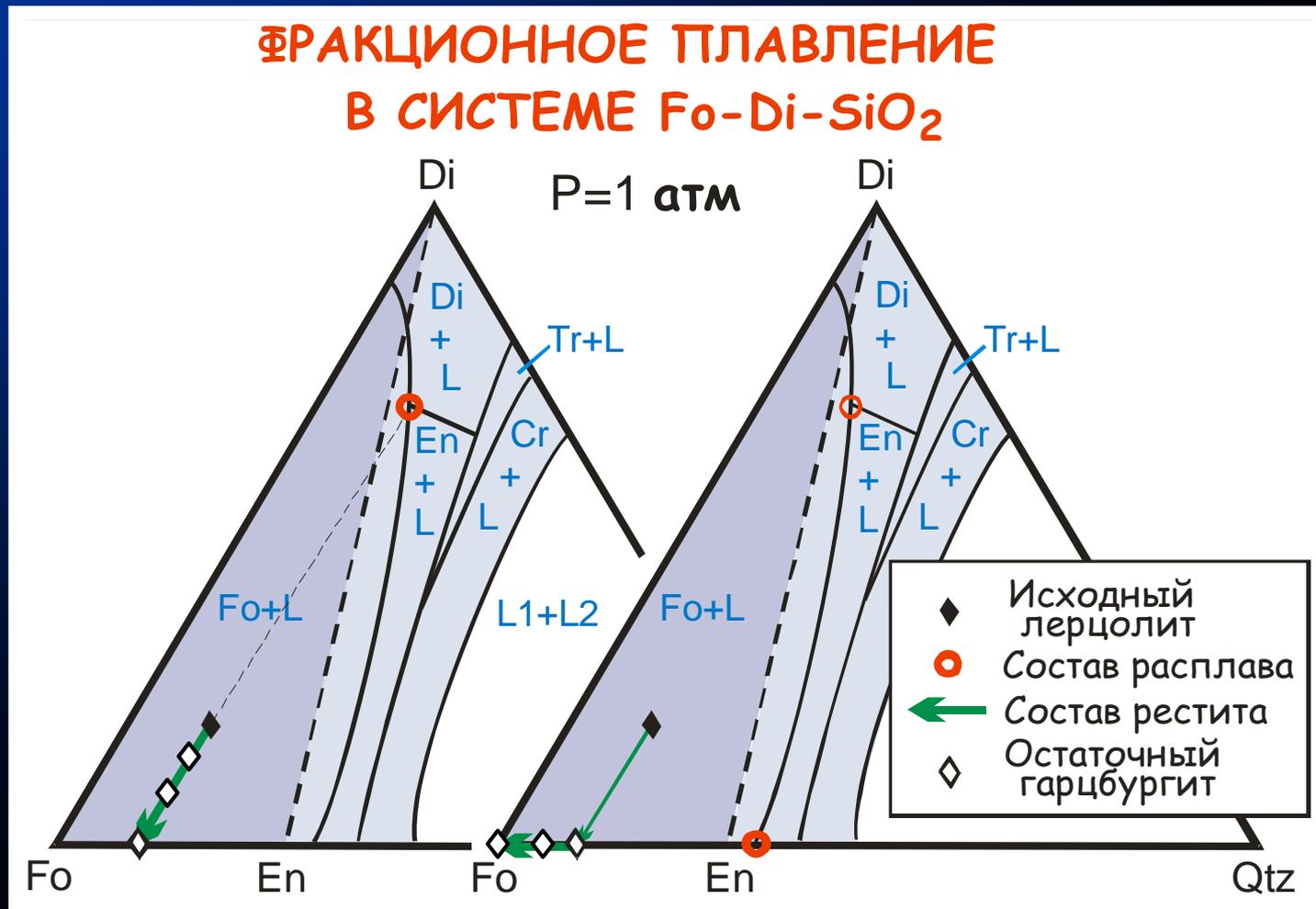
**3. Механизмы плавления
мантийного вещества:
равновесное и фракционное
плавление**

3.1 Схемы равновесного плавления в аналоговых мантийных системах



Эволюция состава расплава и рестита по мере частичного плавления при атмосферном давлении

3.2 Схемы фракционного плавления в аналоговых мантийных системах



Особенность **фракционного плавления** состоит в том, что новообразованная жидкость не уравнивается с реститом, а мгновенно удаляется из системы. При этом валовый состав источника монотонно обедняется легкоплавкими компонентами.

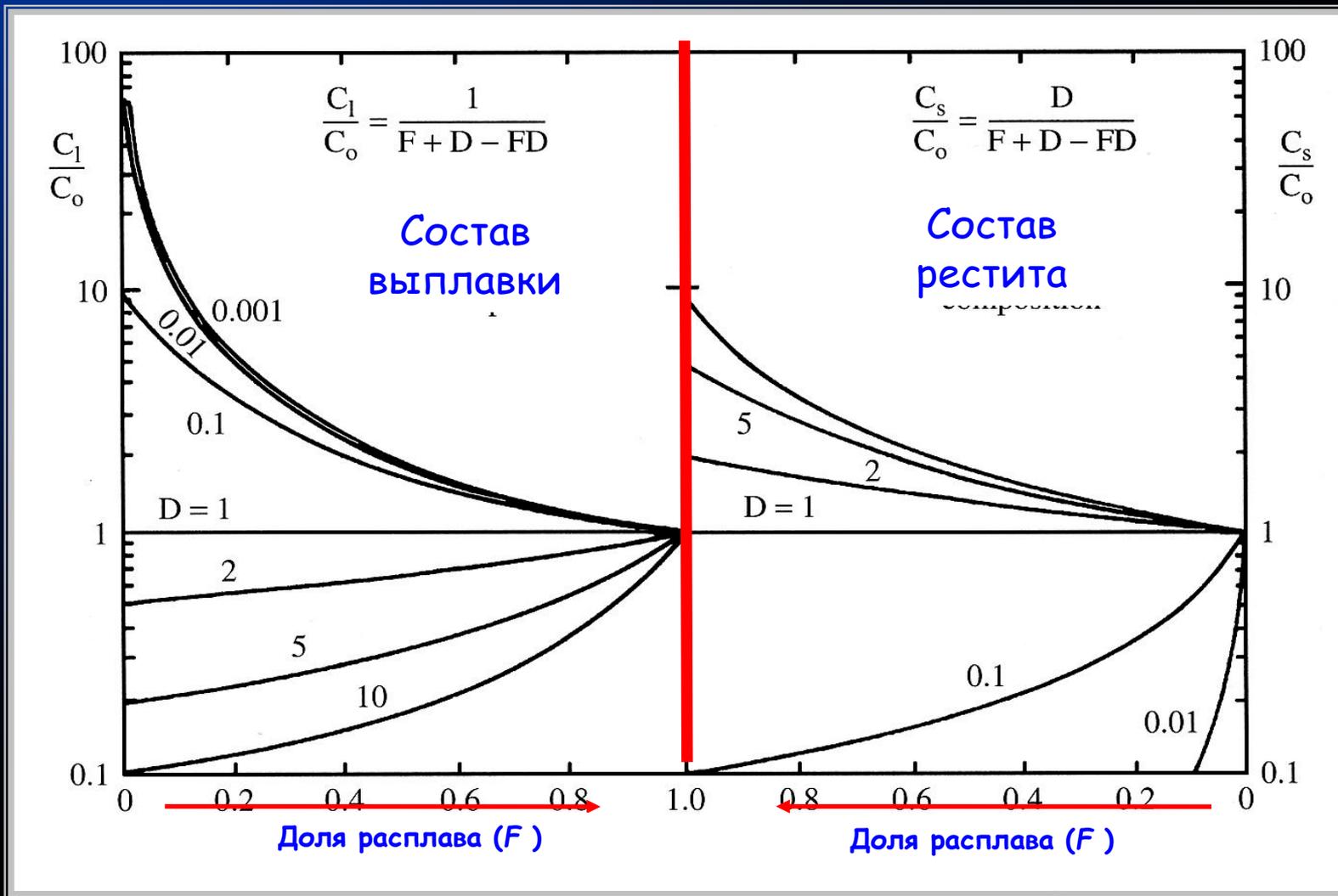
3.3 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОДУКТОВ ЧАСТИЧНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

3.3.1 Микроэлементы

3.3.2 Главные компоненты

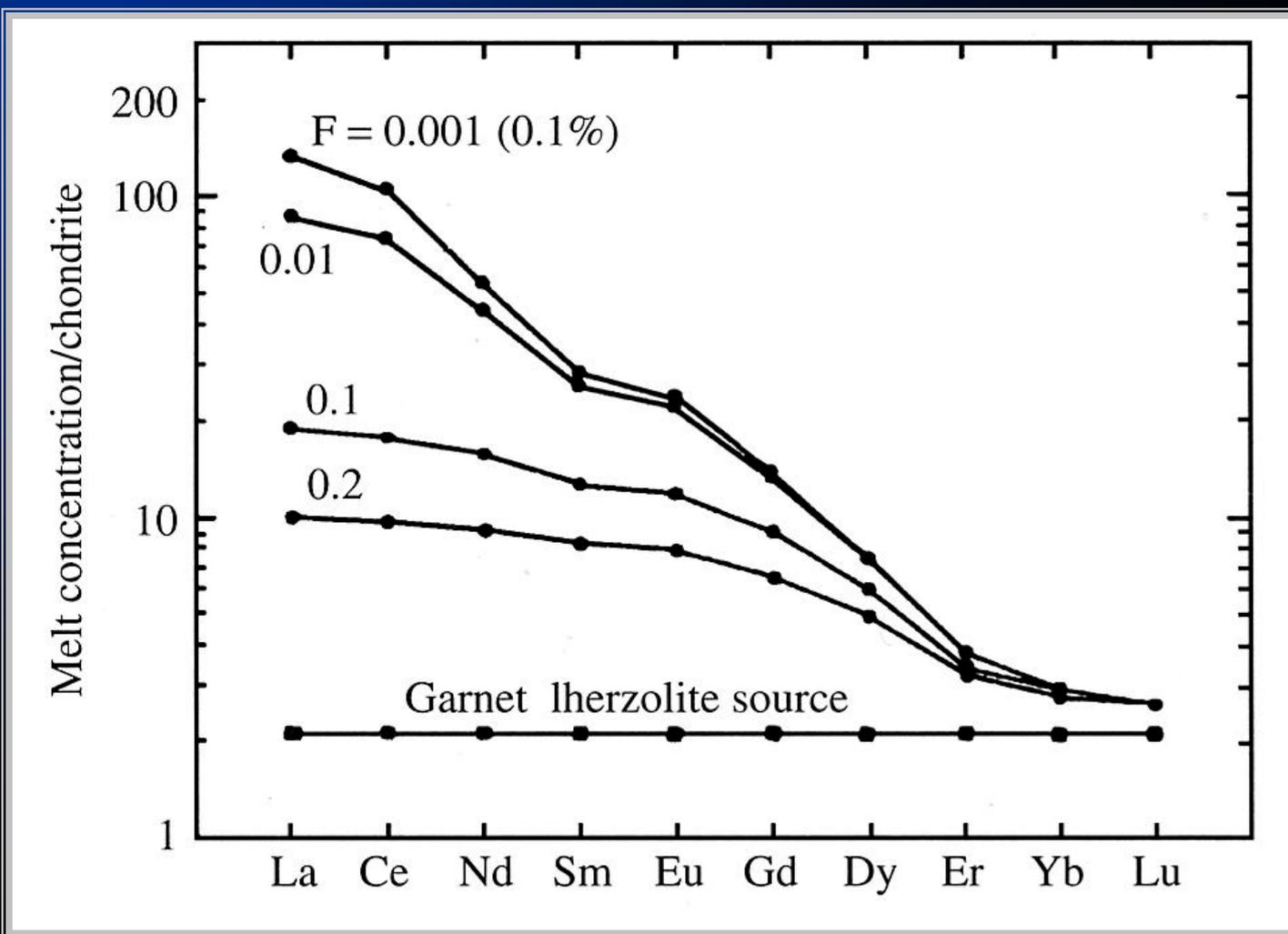
3.3 Химический состав продуктов частичного плавления

3.3.1 Микроэлементы: зависимость состава расплава и рестита от степени равновесного плавления



3.3 Химический состав продуктов частичного плавления

3.3.1 Микроэлементы: поведение Р.З.Э. при плавлении гранатового лерцолита



3.3 Химический состав продуктов частичного плавления

3.3.1 Главные компоненты (программа pMELTS)



Geochemistry
Geophysics
Geosystems

G³

AN ELECTRONIC JOURNAL OF THE EARTH SCIENCES
PUBLISHED BY AGU AND THE GEOCHEMICAL SOCIETY

Article
Volume 3, Number 5
31 May 2002
10.1029/2001GC000217
ISSN: 1525-2027

The pMELTS: A revision of MELTS for improved calculation of phase relations and major element partitioning related to partial melting of the mantle to 3 GPa

Mark S. Ghiorso

Department of Earth and Space Sciences, Box 351310, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA (ghiorso@u.washington.edu)

Marc M. Hirschmann

Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, 310 Pillsbury Drive SE, Minneapolis, MN 55455, USA (Marc.M.Hirschmann-1.umn.edu)

Peter W. Reiners

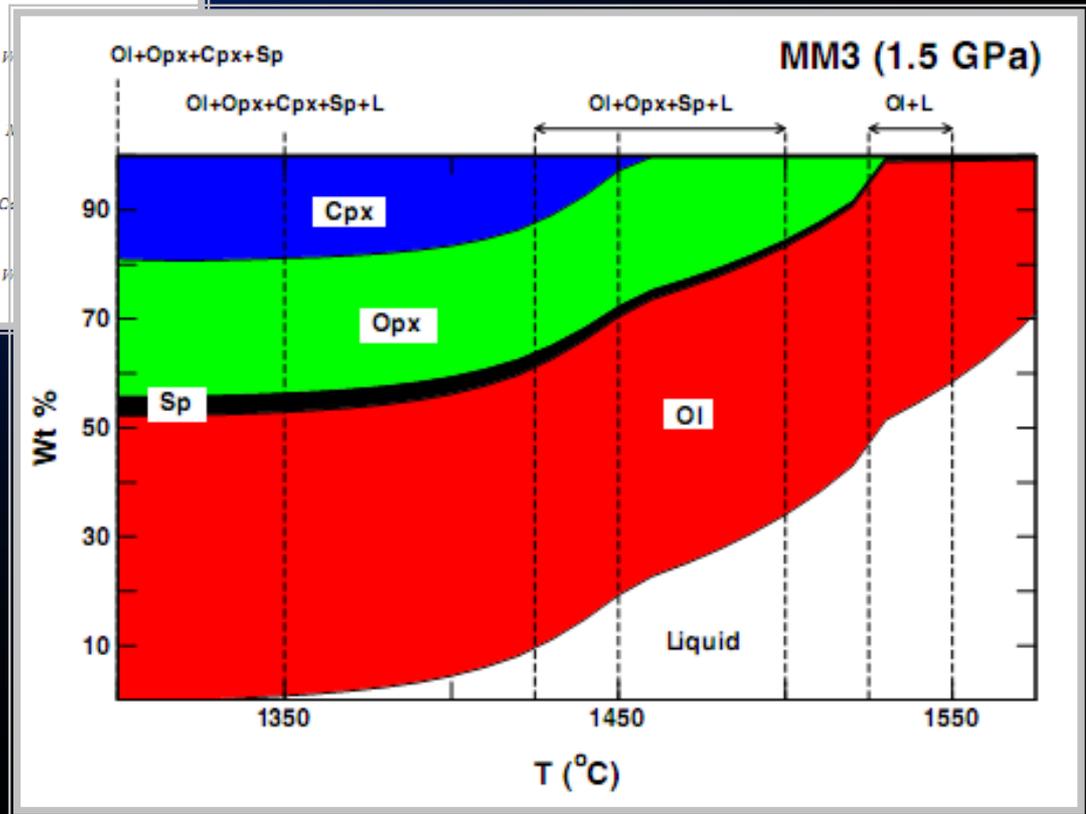
Department of Geology and Geophysics, Yale University, P.O. Box 208109, New Haven, CT 06510, USA (peter.reiners@yale.edu)

Victor C. Kress, III

Department of Earth and Space Sciences, Box 351310, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA (kress@u.washington.edu)

Сравнение результатов моделирования и экспериментов на составе лерцолита ММЗ при P=15 кбар (Falloon et al., 1999)

Результаты расчетов показаны стрелками с указанием фазовых ассоциаций



3.3 Химический состав продуктов частичного плавления

3.3.1 Главные компоненты (программа pHMELTS)



**Geochemistry
Geophysics
Geosystems** **G³**
AN ELECTRONIC JOURNAL OF THE EARTH SCIENCES
Published by AGU and the Geochemical Society

Article
Volume 5, Number 1
28 January 2004
Q01E16, doi:10.1029/2003GC000568
ISSN: 1525-2027

A hydrous melting and fractionation model for mid-ocean ridge basalts: Application to the Mid-Atlantic Ridge near the Azores

P. D. Asimow

Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena (asimow@gps.caltech.edu)

Formerly at Lamont-Doherty Earth Observatory, Palisades, New York 10964, USA

J. E. Dixon

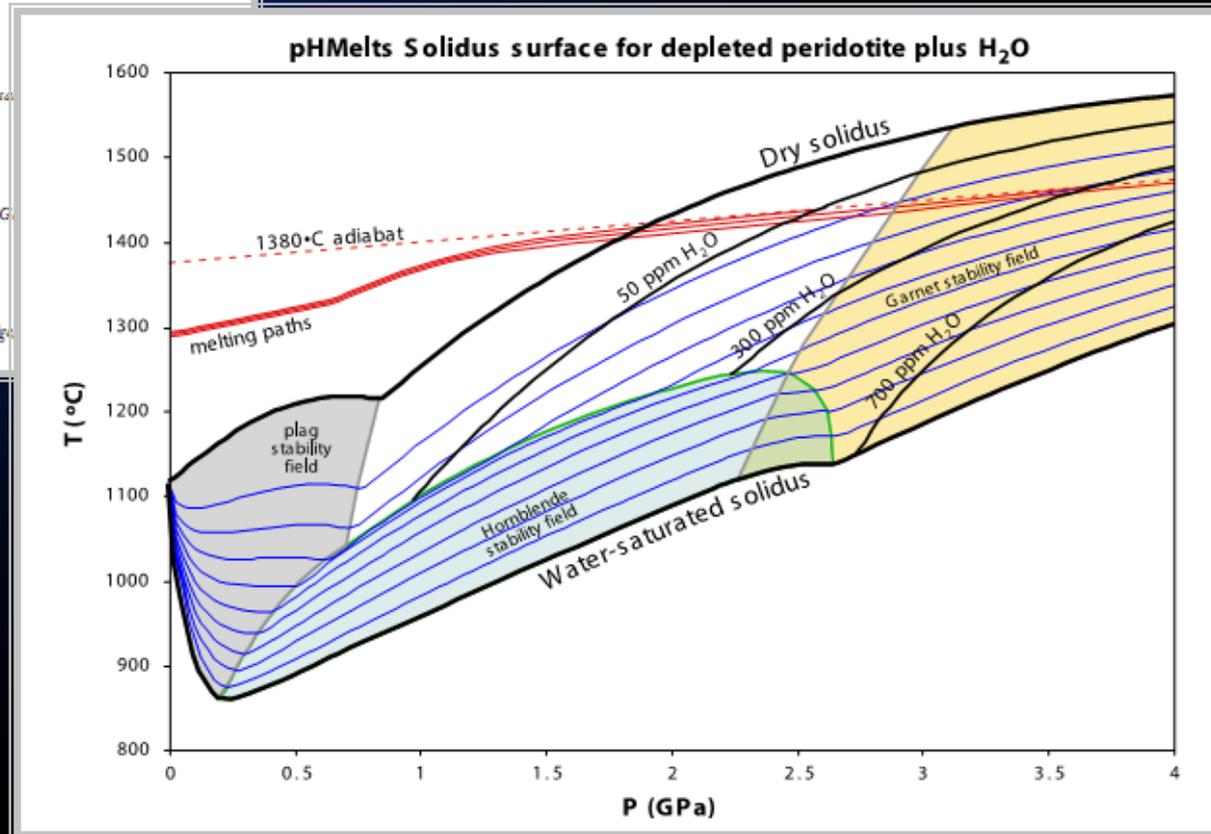
Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, Division of Marine Geology and Geophysics, Miami, Florida 33149, USA (jdixon@rsmas.miami.edu)

C. H. Langmuir

Lamont-Doherty Earth Observatory, Palisades, New York 10964, USA

Now at Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University, Cambridge (langmuir@eps.harvard.edu)

Солидусные соотношения при плавлении обедненного мантийного перидотита в присутствии воды



3.3 Химический состав продуктов мантийного плавления

3.3.2 Микроэлементы при фракционном плавлении

3.3 Химический состав продуктов мантийного плавления

3.3.2 Главные компоненты при фракционном плавлении

JOURNAL OF PETROLOGY | VOLUME 40 | NUMBER 5 | PAGES 661-698 | 2000

Calculation of Peridotite Partial Melting from Thermodynamic Models of Minerals and Melts, IV. Adiabatic Decompression and the Composition and Mean Properties of Mid-ocean Ridge Basalts

P. D. ASIMOW^{1*}, M. M. HIRSCHMANN² AND E. M. STOLPER¹

¹DIVISION OF GEOLOGICAL AND PLANETARY SCIENCES, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, M/C 170-25, PASADENA, CA 91125, USA

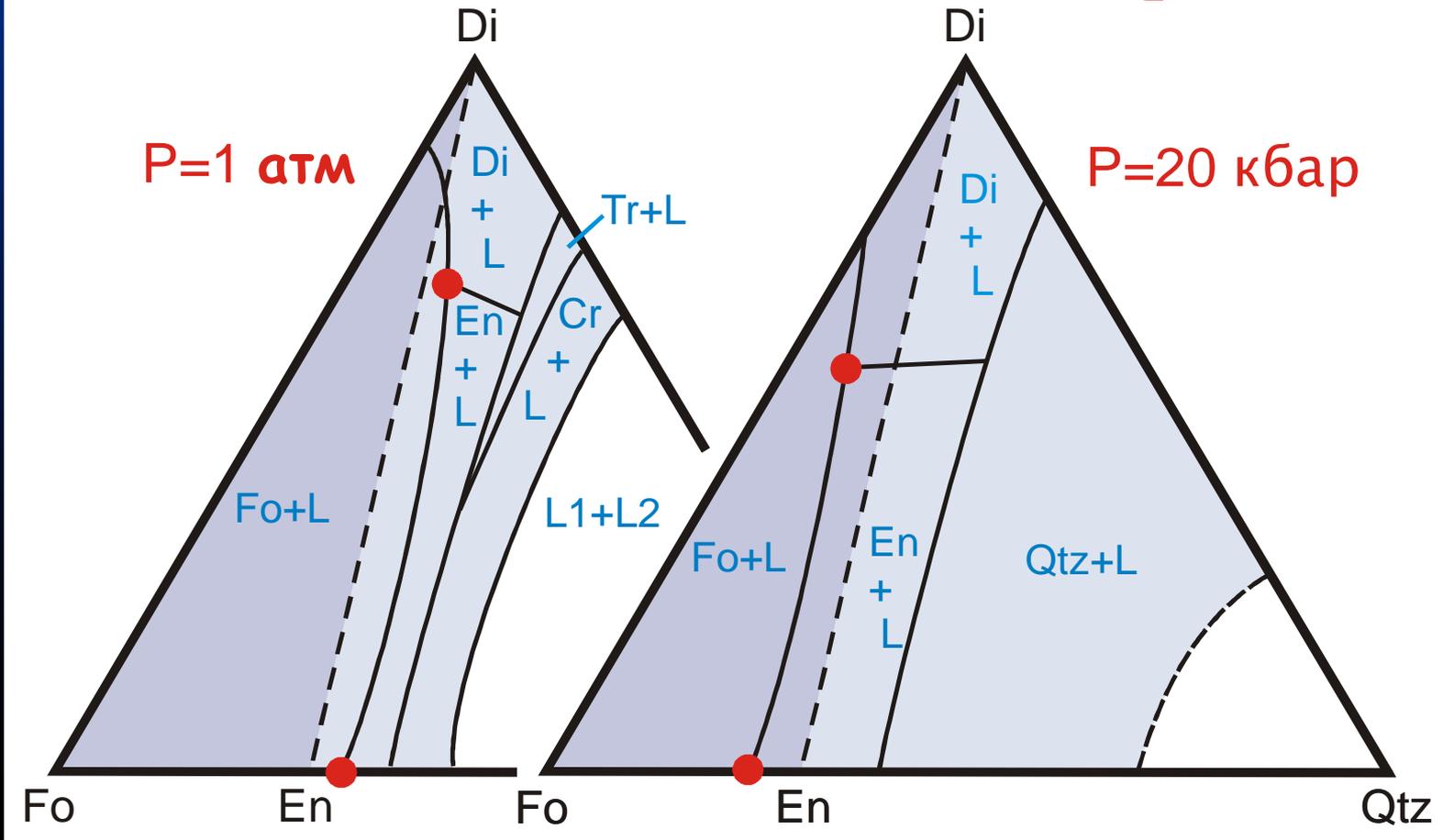
²DEPARTMENT OF GEOLOGY AND GEOPHYSICS, UNIVERSITY OF MINNESOTA, 116 HILLSBURY DRIVE SE, MINNEAPOLIS, MN 55455-0210, USA

RECEIVED JANUARY 25, 2000; REVISED TYPESCRIPT ACCEPTED AUGUST 14, 2000

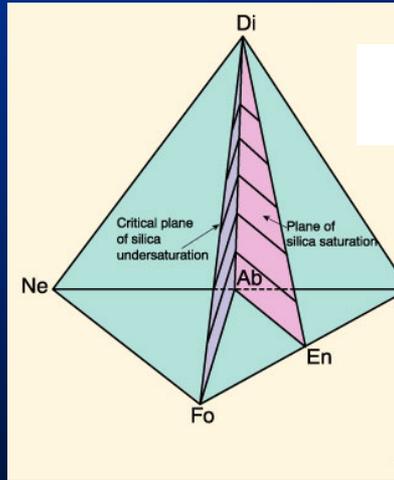
4. Глубина выплавления первичных магм и влияние давления на их составы

4.1 Влияние давления на положение инвариантной точки

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПОЛОЖЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ ТОЧЕК В СУХОЙ СИСТЕМЕ Fo-Di-SiO₂

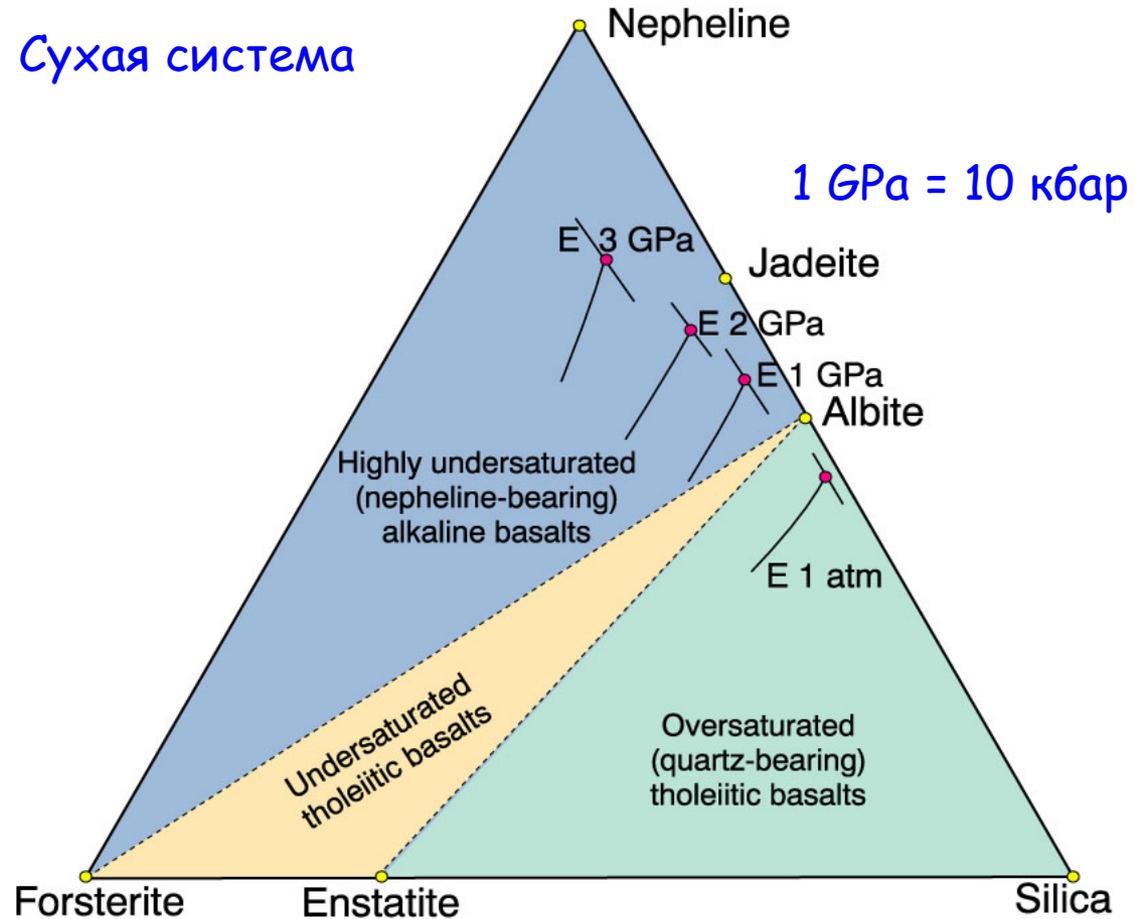


4.2 Составы модельных выплавов в зависимости от давления (плавление лерцолита)

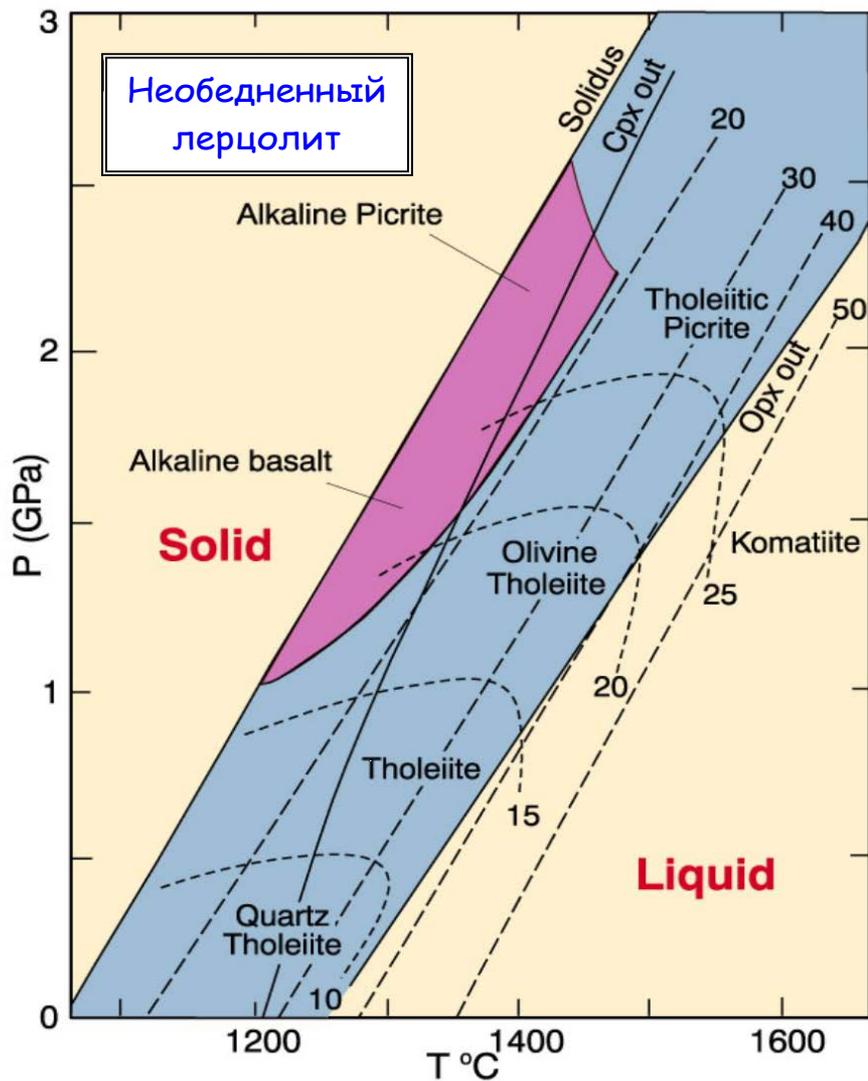


Составы главных типов базальтовых магм отражают разную глубинность процессов магмообразования.

Сухая система



ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ БАЗАЛЬТОВЫХ МАГМ КАК ФУНКЦИЯ ГЛУБИНЫ И СТЕПЕНИ ПЛАВЛЕНИЯ



При давлениях ниже 5 кбар и степени плавления порядка 10% могут формироваться кварцевые толеиты.

Слабонеодосыщенные по SiO₂ (т.е. нормальные) толеитовые магмы отражают более высокую степень плавления - около 15% и формируются при давлениях около 10 кбар, т.е. на глубинах 25-30 км.

Наиболее примитивные пикрит-коматиитовые магмы требуют достаточно высокой (не менее 25%) степени плавления и образуются на глубинах 50-60 км.