



# граниты

Древнеегипетский саркофаг из  
гранита.

---



## Происхождение гранитов

---

В конце XVIII века ученые всерьез полагали, что граниты образовались путем осаждения кристаллов на дне океана, заполненного морской водой. Эта гипотеза поддерживалась научной школой нептунистов, которую возглавлял немецкий геолог А.Г. Вернер (1749-1817).

### МАГМАТИЗМ???

Однако уже в начале XIX века ошибочность такой интерпретации стала очевидной, и она уступила место концепции плутонистов, которые привели убедительные доказательства в пользу того, что граниты возникли в результате охлаждения и затвердевания силикатных расплавов - магм, поднимавшихся из глубин Земли. Первым сформулировал эту идею англичанин Дж. Геттон (1726-1797)

---



## ГРАНИТИЗАЦИЯ ???

---

- В середине XX века происхождение гранитов стало предметом новой дискуссии. В качестве альтернативы представлений о магматической природе этих пород была высказана идея о возможности формирования гранитов путем преобразования (трансформации) пород иного состава при их взаимодействии с горячими водными растворами, которые приносят компоненты, необходимые для создания гранита, и выносят (растворяют) "лишние" химические элементы.
- 
- 

## Граниты –

породы, характерные для верхней части континентальной земной коры. Они неизвестны на дне океанов, хотя на некоторых океанических островах, например в Исландии, распространены довольно широко. Граниты формировались на протяжении всей геологической истории континентов. По данным изотопной геохронологии, самые древние породы гранитного состава датируются 3,8 млрд лет, а самые молодые граниты имеют возраст 1-2 млн лет.



# РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ГРАНИТОВ

Кварц-полевошпатовые гранитные породы образуют тела, которые первоначально не выходили на дневную поверхность. По геологическим данным, верхние контакты гранитных тел в момент образования располагались на глубине от нескольких сот метров до 10-15 км. В настоящее время граниты обнажены благодаря последующему подъему и размыву пород кровли. **Согласно статистическим подсчетам, граниты составляют около 77% объема всех магматических тел, затвердевших на глубине в верхней части континентальной земной коры.**

---



# Различают перемещенные и неперемещенные гранитные тела.

Главные доказательства магматического происхождения **перемещенных** гранитов сводятся к следующему:

1. формирование гранитных тел сопровождается локальными деформациями окружающих пород, которые указывают на активное внедрение гранитного расплава.
2. вблизи контактов с гранитами вмещающие породы испытали преобразования, вызванные нагревом. Судя по минеральным ассоциациям, возникшим в ходе этого процесса, начальная температура гранитных тел была выше температуры затвердевания гранитной магмы, которая, следовательно, была внедрена в жидком состоянии.
3. в настоящее время происходят вулканические извержения, выносящие к поверхности магмы гранитного состава.

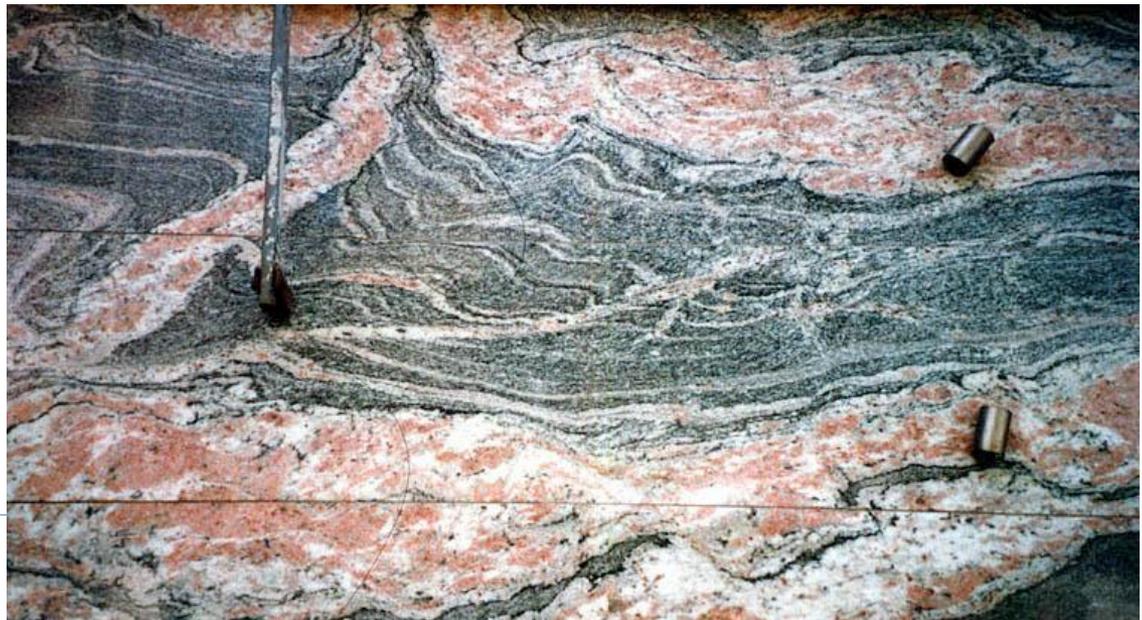


В отличие от перемещенных гранитов, которые затвердевали значительно выше области своего зарождения, **неперемещенные** граниты кристаллизовались примерно на том самом месте, где возникли. Если перемещенные граниты - это обычно однородные породы, заполняющие те или иные объемы, то неперемещенные граниты чаще встречаются в виде полос, линз, пятен, измеряемых миллиметрами и сантиметрами в поперечнике, которые перемежаются с породами иного состава.

Подобные  
образования  
называют

**МИГМАТИТАМИ**

(от греч. мигма -  
смесь).



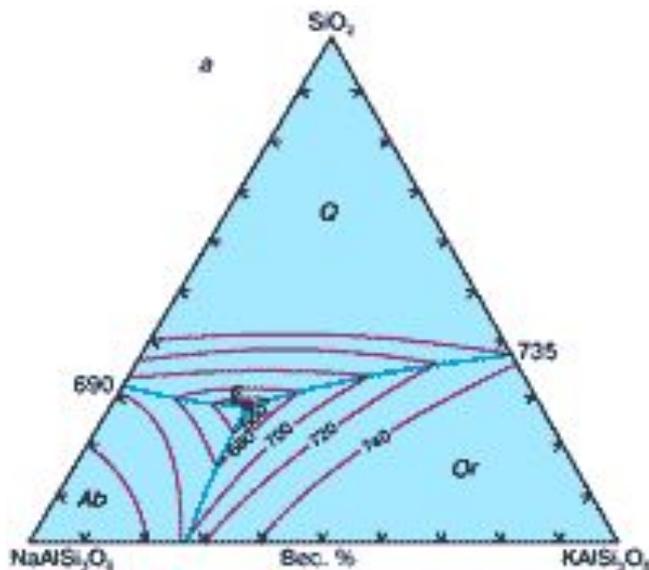


Рис. 1а. Система  $\text{SiO}_2$ - $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{H}_2\text{O}$  при давлении 500 МПа...

Физико-химической моделью гранитов, в основном состоящих из полевых шпатов и кварца, может служить система  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$ - $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{K}_2\text{O}$ , которая включает пять главных оксидов, входящих в эти минералы. Несмотря на кажущуюся простоту, эта пятикомпонентная система сложна для исследования, и фазовые соотношения в ней трудно представить в наглядной форме. Поэтому используют частные модельные системы с меньшим числом компонентов:  $\text{SiO}_2$ (кварц)- $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ (ортоклаз)- $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (альбит) и  $\text{SiO}_2$ - $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (анортит)

## Роль воды в гранитных расплавах

Силикатные расплавы, которые могут быть получены при нагревании смесей кварца и полевых шпатов, обладают высокой вязкостью, затрудняющей достижение равновесия между фазами. Для того чтобы понизить вязкость, кварц-полевошпатовые системы исследуют в присутствии воды, которая, растворяясь в силикатном расплаве, делает его более текучим. Такой подход тем более оправдан, поскольку природные гранитные магмы содержат растворенную воду, что подтверждается наличием в гранитах гидроксилсодержащих минералов - слюд и амфиболов. Система  $\text{SiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-H}_2\text{O}$  была впервые подробно изучена американскими петрологами-экспериментаторами **О. Таттлом** и **Н. Боуэном** в 1958 году.



Таттлом и Боуэном показано, что природные граниты близки по составу к наиболее низкотемпературным эвтектоидным расплавам, находящимся в равновесии с кварцем и К-На полевыми шпатами

В 1970-1980-х годах Г. Винклер и В. Иоханнес изучили систему  $\text{SiO}_2$ - $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ - $\text{H}_2\text{O}$ , которая учитывает присутствие Са плагиоклаза. В этой системе также были определены составы самых низкотемпературных расплавов, равновесных с кварцем и полевыми шпатами.

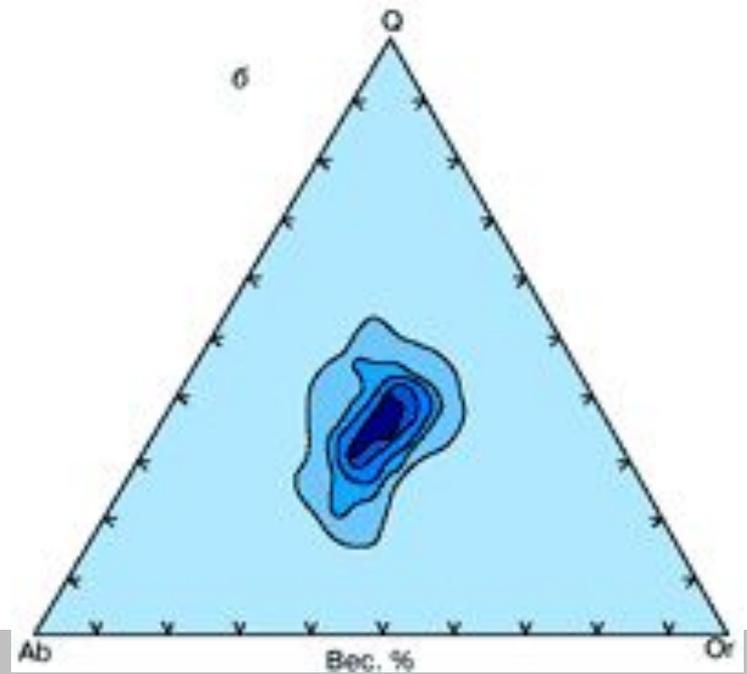
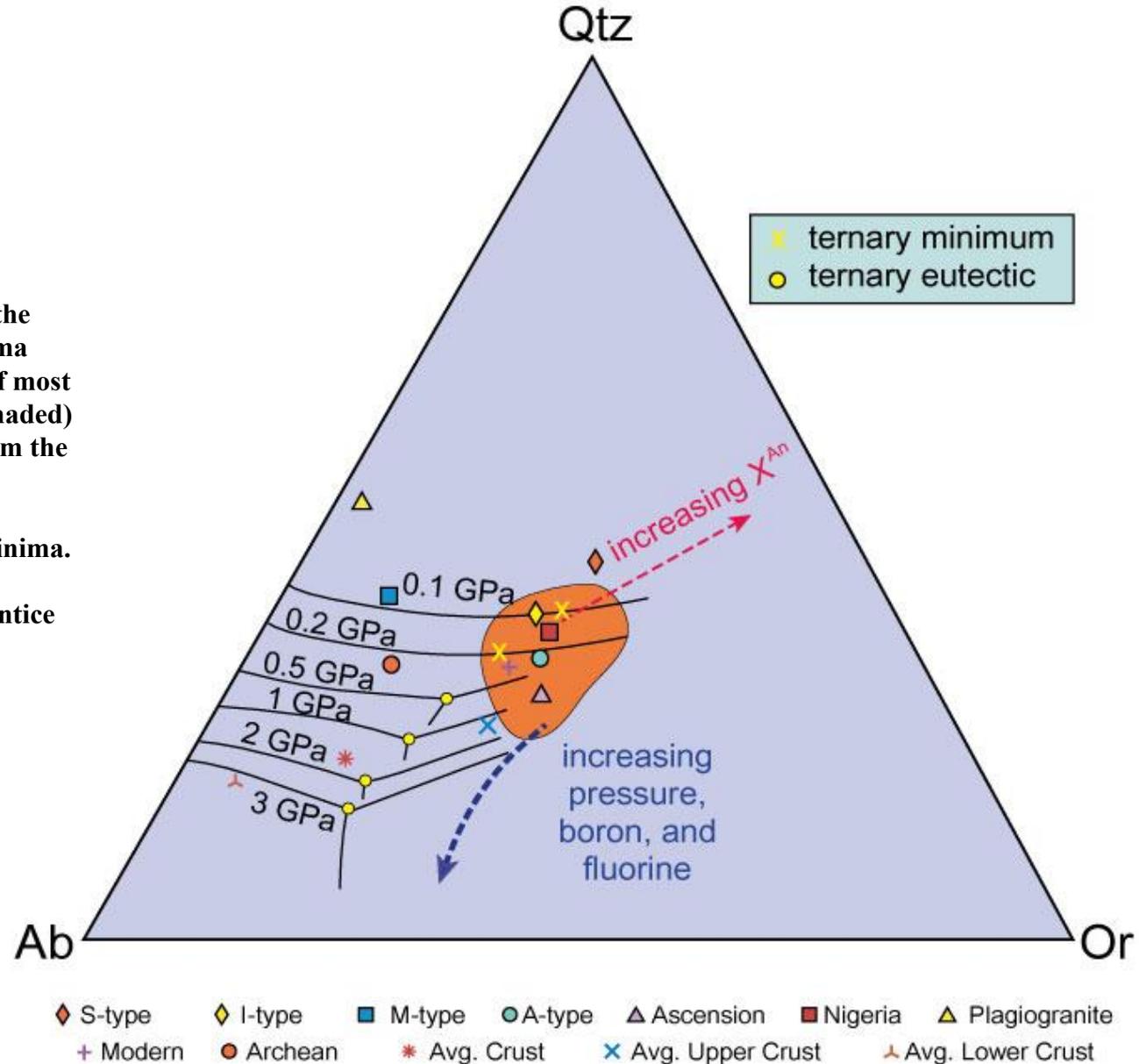


Рис. 16. Составы 511 природных гранитов...

Как было установлено, многие природные граниты отвечают именно этим составам.

# Chapter 18: Granitoid Rocks

**Figure 18.3.** The Ab-Or-Qtz system with the ternary cotectic curves and eutectic minima from 0.1 to 3 GPa. Included is the locus of most granite compositions from Figure 11-2 (shaded) and the plotted positions of the norms from the analyses in Table 18-2. Note the effects of increasing pressure and the An, B, and F contents on the position of the thermal minima. From Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



# **механизмы образования гранитных магм –**

1. частичное плавление кварц-полевошпатовых пород: песчаников, глинистых осадков, ранее образованных магматических пород, гнейсов и т.п.

2. Гранитные магмы могут быть получены и другим путем - в результате дифференциации менее кремнекислых магм, из которых в процессе кристаллизации удаляются тугоплавкие твердые фазы, избыточные по отношению к эвтектоидному гранитному расплаву.

На протяжении последних десятилетий дискуссия о происхождении гранитов в основном сводилась к выбору между этими двумя моделями. В 1950-1970-х годах предпочтение отдавалось дифференциации. Позднее были получены данные, свидетельствующие о том, что **крупные массы гранитов являются продуктами частичного плавления вещества земной коры**, а кристаллизационная дифференциация приводит к появлению лишь относительно малых количеств гранитного материала.

# РОЛЬ ВОДЫ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНИТНЫХ МАГМ

Экспериментальные данные подтвердили важную роль воды в зарождении и кристаллизации гранитных магм. Было установлено, что безводные силикатные расплавы гранитного состава образуются при температуре не менее  $950^{\circ}\text{C}$ , тогда как природные гранитные магмы имеют начальную температуру  $850\text{-}650^{\circ}\text{C}$ . Понижение температуры затвердевания гранитов обусловлено растворением в силикатном расплаве некоторого количества воды, обычно измеряемого первыми процентами. Такая концентрация оказывается достаточной для того, чтобы существенно понизить температуру затвердевания и оказать влияние на реологические свойства магматической жидкости.

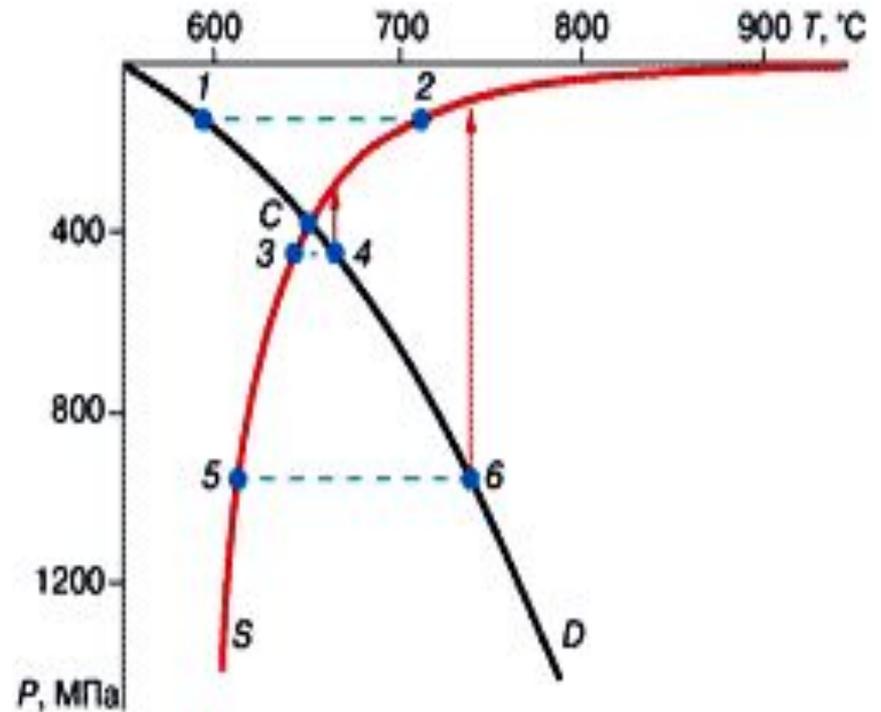


## Откуда берется вода в гранитной магме???

Реальным источником воды, растворенной в гранитной магме, могут служить гидроксилсодержащие минералы, главным образом слюды и амфиболы, входившие в состав того корового вещества, которое подвергалось частичному плавлению. Слюда содержит около 4 мас.%, а амфиболы, например роговая обманка, - около 2%  $H_2O$ . Если вся эта вода перейдет в расплав при дегидратации, то при малых степенях частичного плавления (~ 20%) даже относительно небольшие количества этих минералов (10-20%) могут обеспечить заметную водонасыщенность расплава, которая в ходе последующей кристаллизации возрастает вследствие выделения ранних безводных минералов.

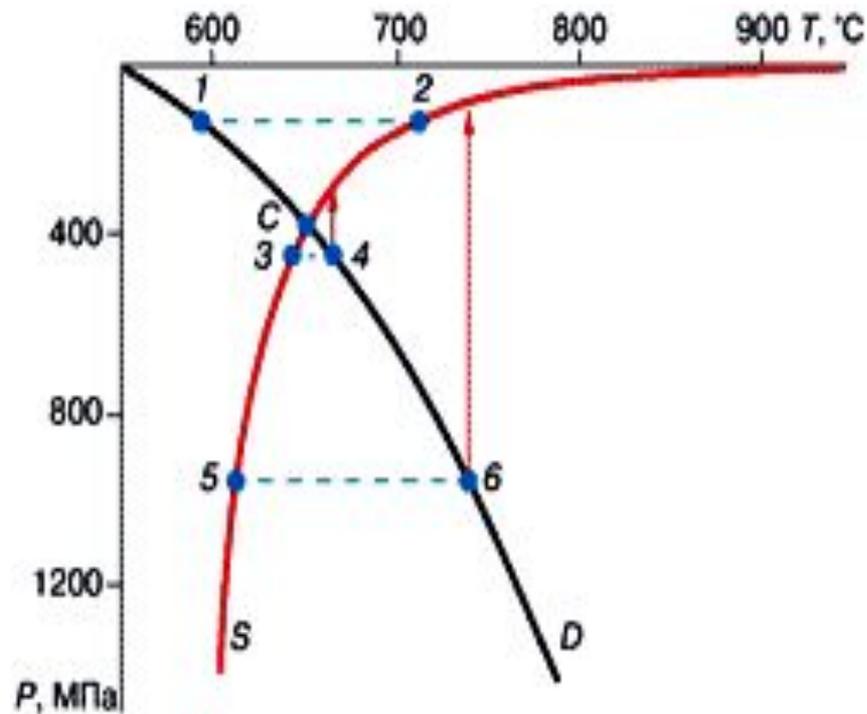


В координатах температура ( $T$ ) - давление ( $P$ ) кривые дегидратации гидроксилсодержащих минералов (линия  $D$ ) и кривые начала плавления гранита при избытке воды (линия солидуса  $S$ ) имеют разный наклон и пересекаются в точке  $C$ .



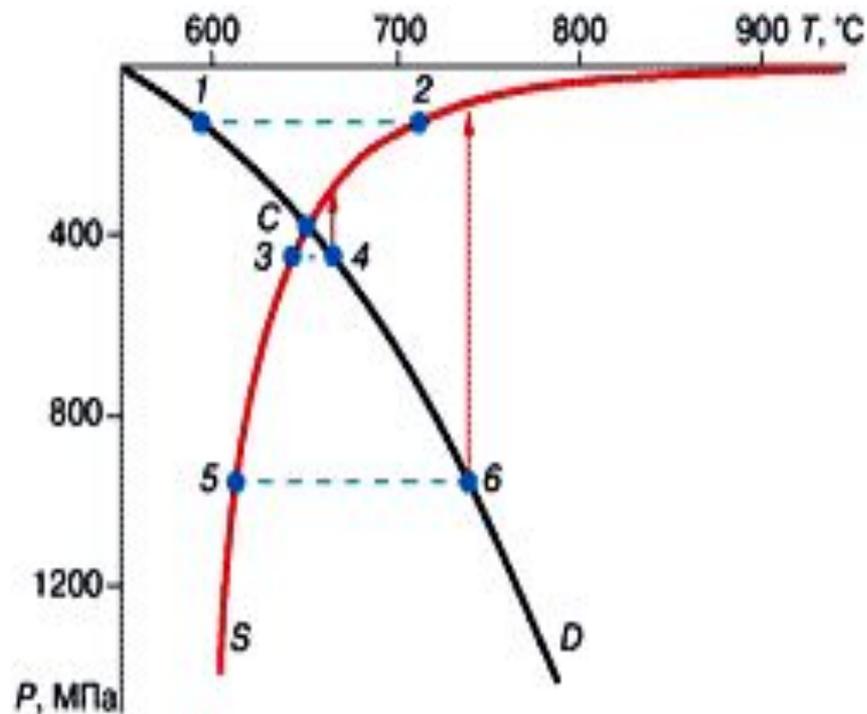
Соотношения между кривой дегидратации мусковита ( $D$ ) и кривой начала плавления гранита при избытке воды ( $S$ ).

Выше этой точки дегидратация происходит до того, как возникает гранитный расплав, и в интервале 1-2 вода может сохраняться в межзерновом пространстве твердых пород. При температуре  $T_2$  она растворится в насыщенном водой расплаве.



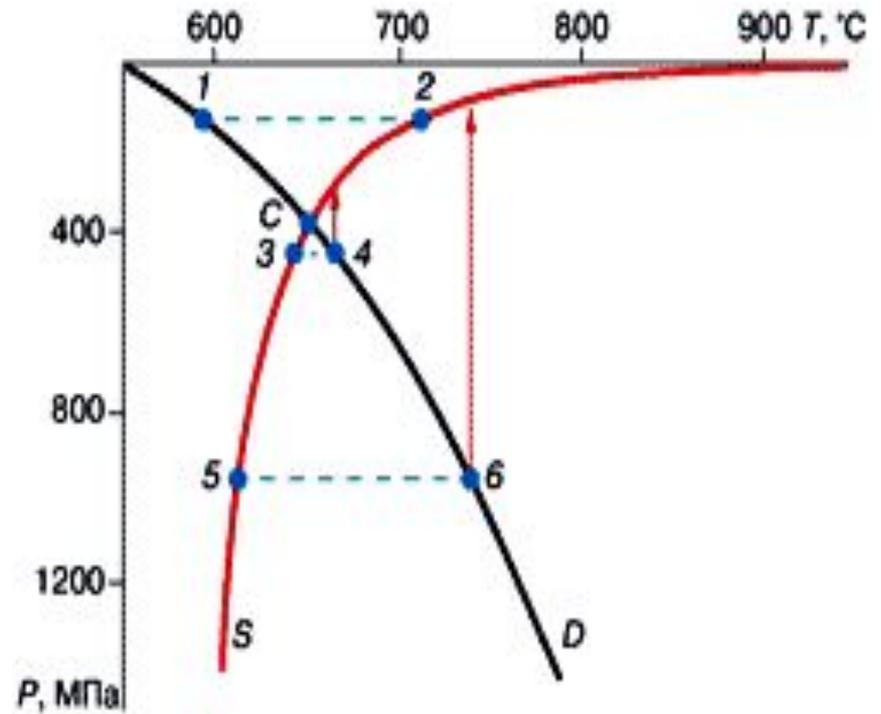
Соотношения между кривой дегидратации мусковита (D) и кривой начала плавления гранита при избытке воды (S).

Если давление больше, чем РС, то гидроксилсодержащие минералы разлагаются при температуре выше солидуса S (точки 4 или 6) и выделившаяся вода сразу же растворяется в возникающем расплаве, причем концентрация воды в перегретом расплаве оказывается ниже предельной растворимости.



Соотношения между кривой дегидратации мусковита (D) и кривой начала плавления гранита при избытке воды (S).

Чем выше давление, при котором происходит реакция плавления, связанная с дегидратацией, тем больше перегрев расплава относительно солидуса (ср. интервалы 3-4 и 5-6) и тем меньше степень насыщения расплава водой. Поэтому, чем глубже магматический источник, тем выше может подняться магма, содержащая воду (см. вертикальные стрелки на рисунке).



Соотношения между кривой дегидратации мусковита (D) и кривой начала плавления гранита при избытке воды (S).

Эти соотношения раскрывают причину возникновения **перемещенных и неперемещенных** гранитов. Первые связаны с более глубокими коровыми источниками, имеют относительно высокую начальную температуру и в большей степени недонасыщены водой, что обеспечивает возможность дальней миграции расплава. Если же источник расположен на меньшей глубине вблизи уровня С (рисунок), то расплав достигает насыщения и затвердевает в виде **МИГМАТИТОВ** недалеко от места зарождения.



# ВОЗМОЖНЫЙ СОСТАВ ИСТОЧНИКОВ ГРАНИТНЫХ МАГМ

Количественные соотношения между **кварцем** и **полевыми шпатами** в гранитах зависят от нескольких переменных, в том числе от давления. Учитывая теоретически рассчитанные и экспериментально подтвержденные зависимости, было установлено, что источники гранитных магм, отвечающих по составу реально наблюдаемым породам, расположены в **континентальной земной коре** на глубине от 10-15 до 30-40 км, где **литостатическое давление** равно 300-1000 Мпа (мегапаскалей).



Широко известной за рубежом является классификация ГРАНИТОВ Чаппела и Уайта, продолженная и дополненная Коллинзом и Валеном. В ней выделяется 4 типа гранитоидов: S-, I-, M-, A-граниты. В 1974 г. Чаппел и Уайт ввели понятия о S- и I-гранитах, основываясь на том, что состав гранитов отражает материал их источника.

S — (sedimentary) — продукты плавления метаосадочных субстратов,

I — (igneous) — продукты плавления метамагматических субстратов,

M — (mantle) — дифференциаты толеит-базальтовых магм,

A — (anorogenic) — продукты плавления нижнекоровых гранулитов или дифференциаты щелочно-базальтоидных магм.



# Chapter 18: Granitoid Rocks

Table 18.3. The S-I-A-M Classification of Granitoids

Type	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	Ca, Sr	Al/(C+N+K)*	Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup>	Cr, Ni	δ <sup>18</sup> O	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	Misc	Petrogenesis
<b>M</b>	46-70%	low	high	low	low	low	< 9‰	< 0.705	Low Rb, Th, U Low LIL and HFS	Subduction zone or ocean-intraplate Mantle-derived
<b>I</b>	53-76%	low	high in mafic rocks	low: metal- uminous to peraluminous	moderate	low	< 9‰	< 0.705	high LIL/HFS med. Rb, Th, U hornblende magnetite	Subduction zone Intracrustal Mafic to intermed. igneous source
<b>S</b>	65-74%	high	low	high  peraluminous	low	high	> 9‰	> 0.707	variable LIL/HFS high Rb, Th, U biotite, cordierite Als, Grt, Ilmenite	Subduction zone  Supracrustal sedimentary source
<b>A</b>	high → 77%	Na <sub>2</sub> O high	low	var peralkaline	var	low	var	var	low LIL/HFS high Fe/Mg high Ga/Al High REE, Zr High F, Cl	Anorogenic Stable craton Rift zone

\* molar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)

Data from White and Chappell (1983), Clarke (1992), Whalen (1985)



# M-граниты

M-граниты - дифференциаты толеит-базальтовых магм, обогащены Ca, Sr, бедны K, Al

I-граниты (igneous granites). Термин подчеркивает магматогенную природу корового вещества, вовлеченного в частичное плавление. Умеренно глиноземистые, с не очень высокими содержаниями калия

# I-граниты

S-граниты (sedimentary granites), источником которых служат метаморфизованные (преобразованные в условиях высоких температур и давлений) осадочные кварц-полевошпатовые породы. Богаты калием и пересыщены глиноземом.

# S-граниты

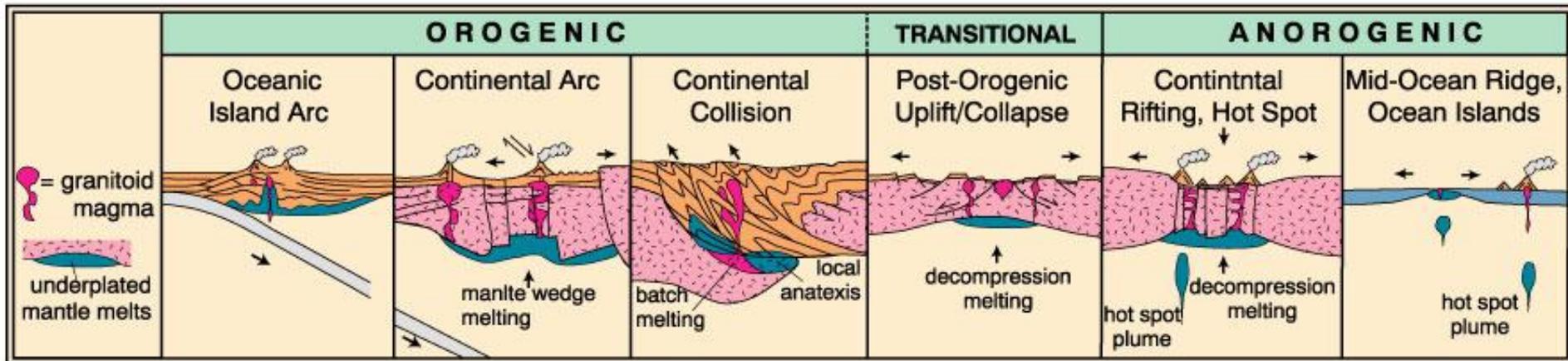
В качестве особой генетической группы выделяют также А-граниты (alkaline, anhydrous, anorogenic granites). Эти породы обогащены щелочными металлами (Na и K) и содержат относительно мало алюминия так, что нередко  $(2Ca + Na + K) > Al$ . Судя по составу минералов, расплавы были бедны водой, но обогащены фтором. Если I- и S-граниты распространены в подвижных геологических поясах, то А-граниты тяготеют к стабильным блокам земной коры.

## А-граниты



# Chapter 18: Granitoid Rocks

**Table 18-4.** A classification of granitoid rocks based on tectonic setting



**Table 18.4.** A Classification of Granitoid Rocks Based on Tectonic Setting. After Pitcher (1983) in K. J. Hsü (ed.), *Mountain Building Processes*, Academic Press, London; Pitcher (1993), *The Nature and Origin of Granite*, Blackie, London; and Barbarin (1990) *Geol. Journal*, 25, 227-238. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



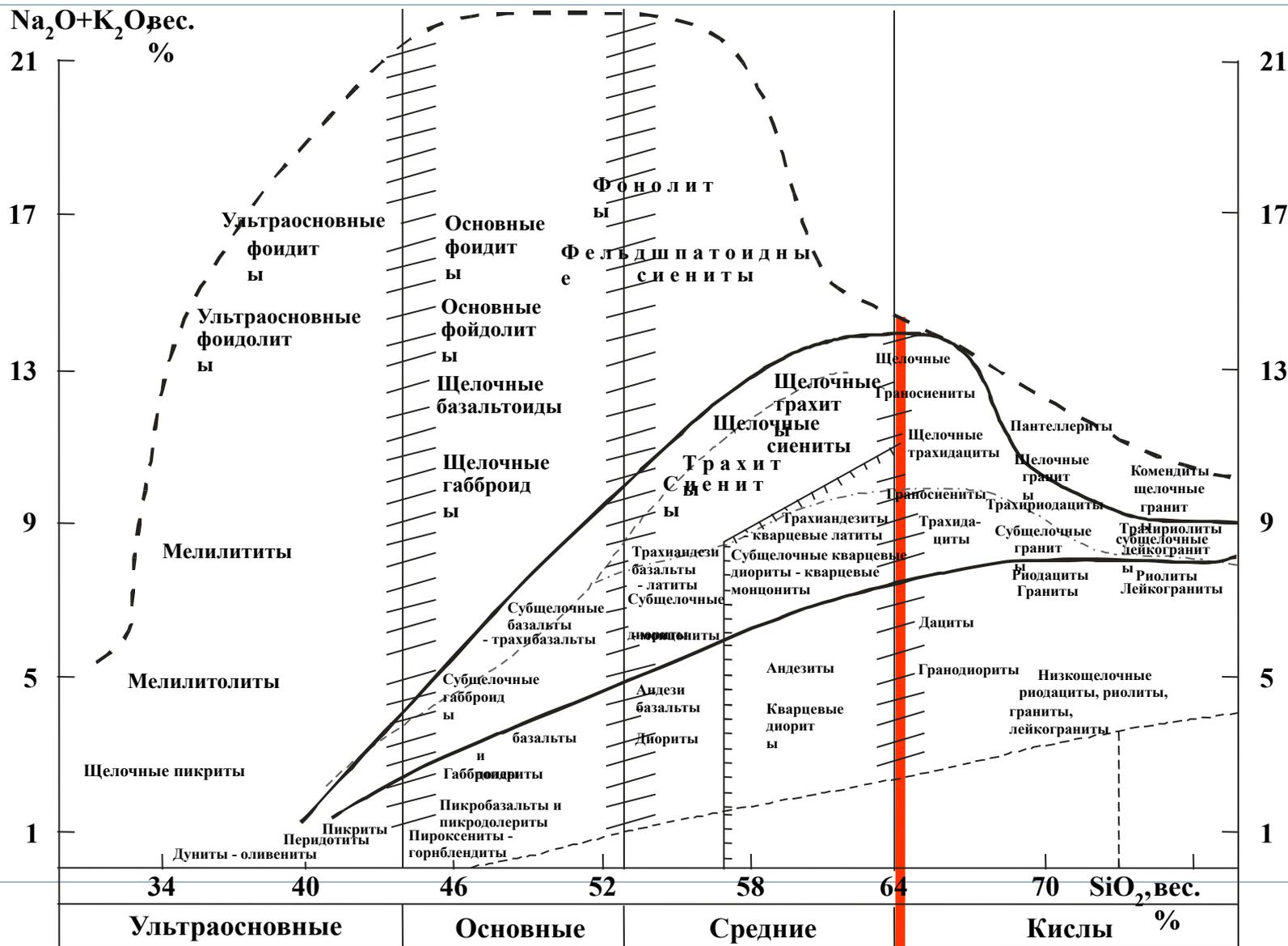
# Образование гранитов - заключительная стадия эволюции верхней оболочки Земли

Образование всех гранитов обычно рассматривают как заключительную стадию многоступенчатой эволюции верхней оболочки Земли. Согласно такой модели, протопланетное вещество, из которого состояла ранняя Земля, было близко по составу к примитивным каменным метеоритам - хондритам. Дифференциация этого вещества привела к формированию перidotитовой верхней мантии Земли, состоящей в основном из магнезиального оливина и пироксена. В результате частичного плавления верхней мантии обособилась первичная земная кора. Частичное плавление амфиболсодержащих пород первичной коры, в свою очередь, привело к образованию низкокалиевых гранитов. Сами эти граниты и продукты их размыва затем вновь вовлекались в магматический рециклинг с образованием I-, S-, A-гранитов. На каждом этапе относительно легкие выплавки перемещались вверх, и в конечном итоге была сформирована современная континентальная кора, верхняя часть которой в значительной мере занята гранитами.



# Классификация кислых пород

Границы группы - по  $\text{SiO}_2 > 64\%$



# Геологическая карта Кольского региона *Geological Map of the Kola region*

Гл. редактор Ф.П. Митрофанов  
*Editor in chief F.P. Mitrofanov*

Геологический институт Кольского научного центра РАН  
*Geological Institute of the Kola Science Centre RAS*

Масштаб 1:1500000    Scale 1:1500000



Апатиты 2001  
*Apatity 2001*

