



Граниты: классификация, систематика, генезис и проблемы геодинамической типизации.

Андрей В. Гребенников

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН

e-mail: greandr@hotmail.com

“There are granites and granites” H.H. Read (1957)

«Гранит — визитная карточка Земли»

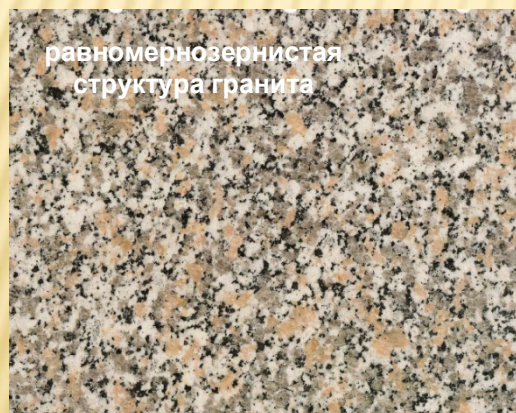
Гранит (итал. granito, от лат. granum - зерно) - кислая магматическая интрузивная горная порода.

Состоит из полевых шпатов (кислый плагиоклаз и калиевый полевой шпат) - 60-65 %; кварца - 25-35 %; темноцветных минералов (биотит, реже роговая обманка) - 5-10 %. Полевые шпаты в сумме составляют около 60% объема породы, кварц – не менее 30%, а Fe–Mg силикаты – до 10%.

Для валового химического состава гранитов характерно высокое содержание кремнезема (SiO_2), которое колеблется от 68–69 до 77–78 мас.%. Кроме того, граниты содержат 12–17 мас.% Al_2O_3 , 7–11 мас.% суммы $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ и до нескольких массовых процентов суммы $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO}$.

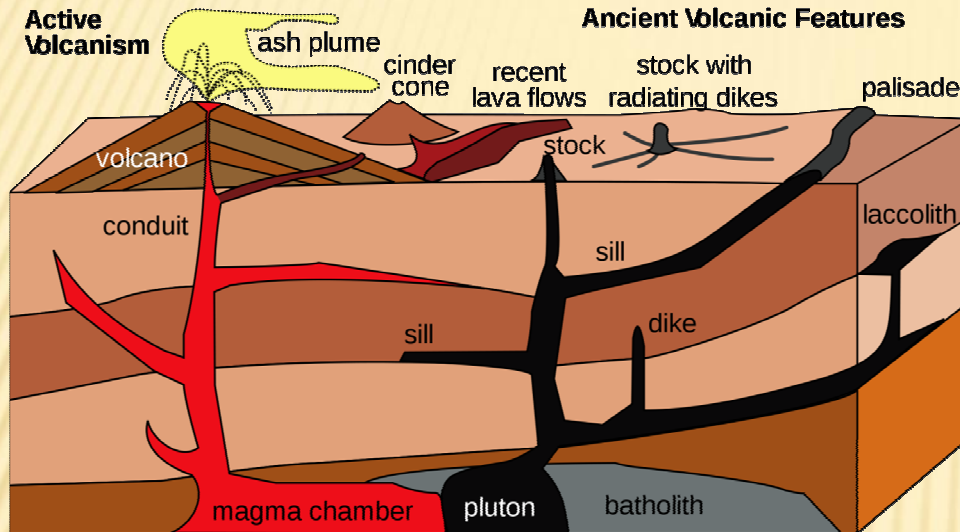
Его структура обычно полнокристаллическая, нередко порфировидная и гнейсовидно-полосчатая.

Риолит (устар. название – липарит) - вулканический аналог гранита. Его структура в основной массе стекловатая, порфировая, реже скрытозернистая.



- (i) Самые распространенные породы верхней части Земной континентальной коры;
- (ii) Практическое отсутствие на других планетах земной группы;
- (iii) Их внедрение обусловлено процессами тектоники и геодинамики;
- (iv) Взаимосвязь с промышленными концентрациями полезных ископаемых...

Формы интрузивных тел



По глубине залегания:

- (i) Субвулканические – первые сотни метров;
- (ii) Гипабисальные – до 1-1.5 км;
- (iii) Абисальные – глубинные...

По отношению к вмещающим породам интрузивы подразделяются на *согласные* (concordant) и *несогласные* (discordant).

Различают *перемещенные* (аллохтонные) и *неперемещенные* (автохтонные) гранитные тела.

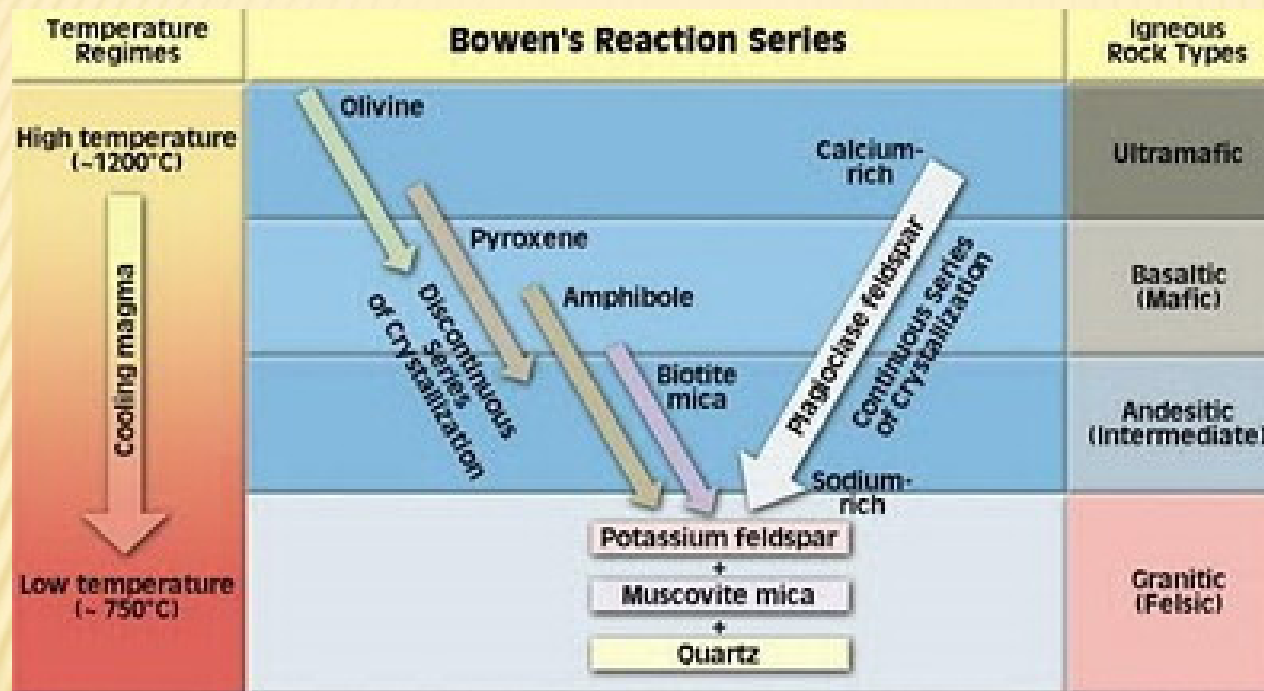


ГРАНИТИЗАЦИЯ — процесс преобразования хим. и минер. состава г. п. (расплава) в направлении приближения состава и структур его продуктов к гранитовому



МИГМАТИТ

Происхождение гранитов



Норман Леви Боуэн
 (21.06.1887, Канада) -
 американский геолог и
 петрограф.
 В 1928 году опубликовал
 фундаментальный труд
 Evolution of the Igneous Rocks
 («Эволюция изверженных
 пород»)

- В качестве главного механизма образования обычных химических типов изверженных пород, дающих непрерывную серию от базальтов до риолитов, Н.Л. Боуэн рассматривал фракционную кристаллизацию родоначальной базальтовой магмы;
- реакционные ряды кристаллизации минералов могут нарушаться в зависимости от состава расплава, от температуры, давления и других условий;
- порядок выделения минералов в различных рядах зависит от состава расплава;
- каждый минерал данного ряда с соответствующим минералом параллельного ряда образует эвтектику.

This relationship
 can be seen
 in the Stillwater Complex in
 Montana.

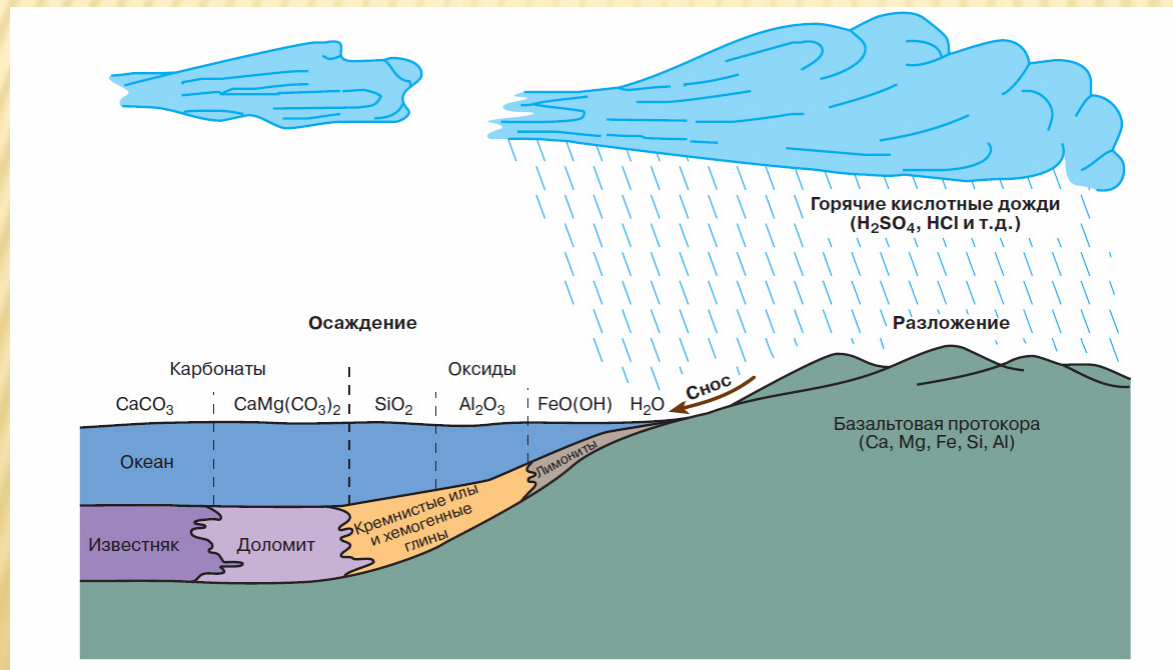
"Литогенетическая" модель гранитообразования (В.И. Вернадский, Н.В. Фролова и др.).

- основной объем глубинных зон литосферы и подстилающей ее мантии сложен гипербазитами, не содержащими полевых шпатов и кварца;
- их плавление могло породить только базальтовый расплав, а потому первичная кора Земли должна была быть базальтовой, то есть такой же, как кора Луны, Марса и Венеры.

“Как же образуются граниты и почему они развиты только на Земле = чем еще, помимо присутствия гранита, Земля отличалась в своей геологической истории от других планет?”

- присутствие в атмосфере Земли свободного кислорода и паров воды;
- присутствие жизни, выступающей в качестве активного геохимического фактора;
- наличие гидросферы.

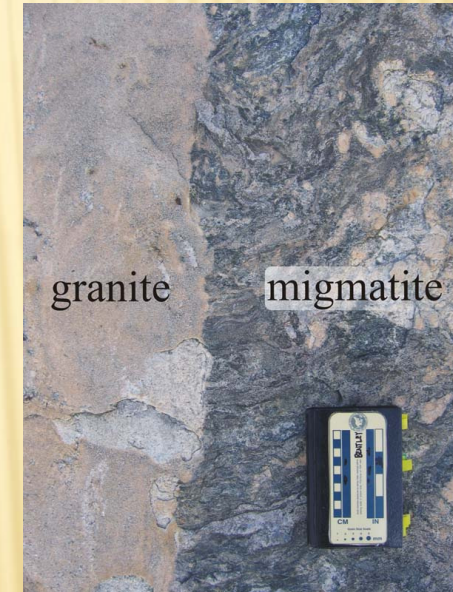
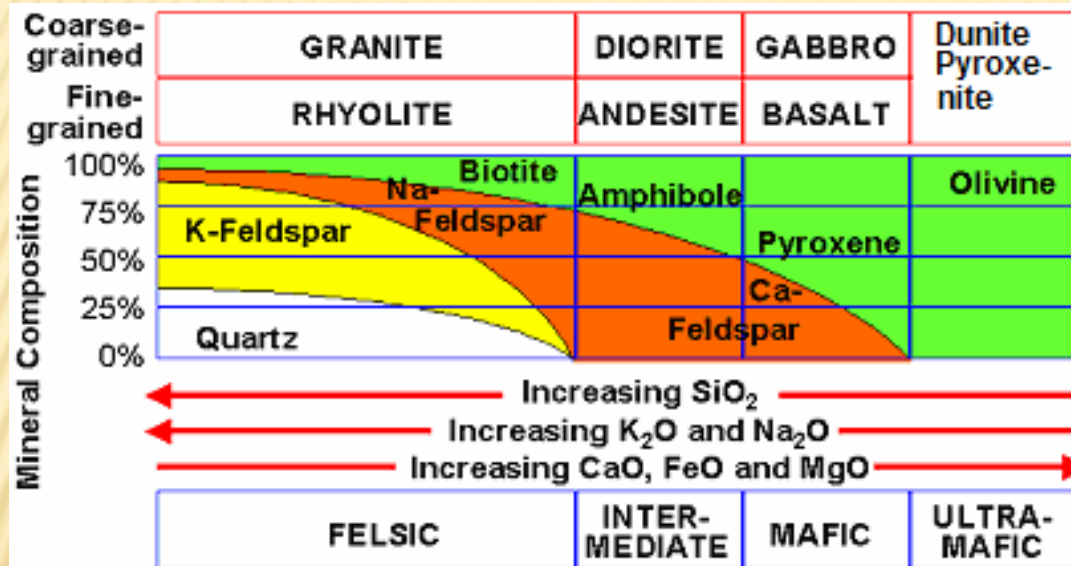
Только на Земле проявлен полный цикл литогенеза (формирования осадочных пород).



Метаморфизм осадочных отложений породил первые гнейсы, подготавливая таким образом материал протокоры к последующему коровому анатексису (плавлению) т.е. гранитизации.

Гранитизация (Д.С. Коржинский, Л.Л. Перчук и др.).

ГРАНИТИЗАЦИЯ — процесс преобразования химического и минерального состава горной породы (расплава) в направлении приближения состава и структур его продуктов к гранитовому под воздействием восходящих флюидных потоков глубинного происхождения.



Экспериментальные данные, позволили установить общие закономерности формирования гранитных магм в связи с реакциями дегидратации.

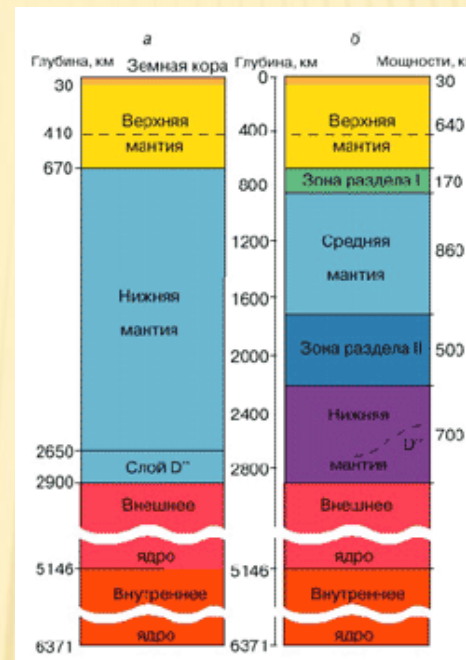
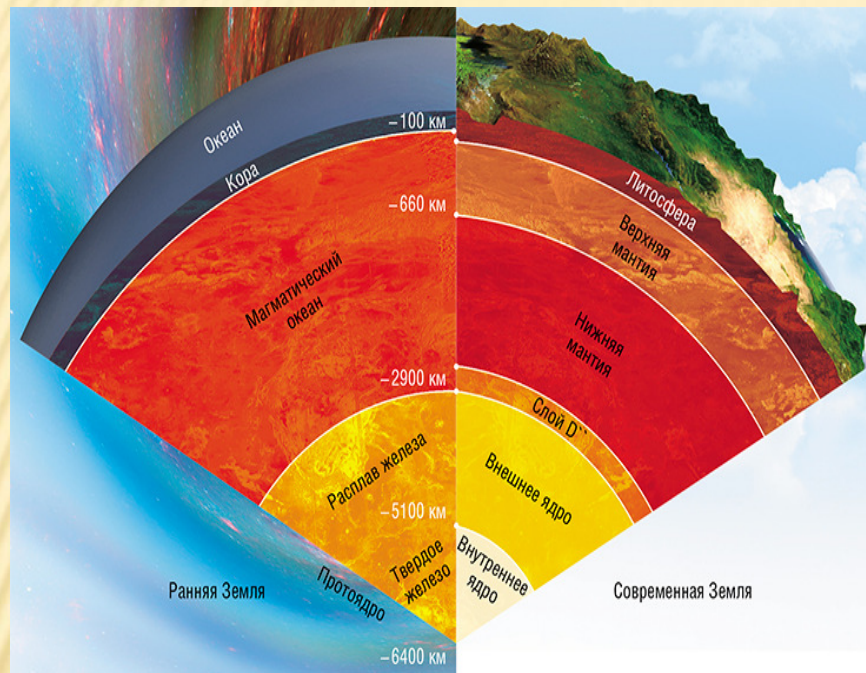
При нагревании корового вещества разложение мусковита происходит при 650°C , и этот процесс приводит к появлению относительно низкотемпературных гранитных магм.

Бiotита – при $750\text{--}850^\circ\text{C}$, а амфибола – при $900\text{--}1000^\circ\text{C}$. Такие расплавы имеют относительно высокую начальную температуру.

Чем глубже магматический источник, тем выше может подняться магма, содержащая воду. Перемещенные граниты 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, то расплав достигает насыщения и затвердевает в виде мигматитов недалеко от места зарождения (**аллохтонные гранитные тела**).

Современная теория образования гранитов



Модели строения Земли:

а - традиционная модель, распространенная в настоящее время;
 б - новая модель, основанная на анализе сейсмотомографических карт и данных о сейсмических границах.

- Граниты как заключительная стадия верхней оболочки Земли;
- Состав протопланетного вещества близок хондритам;
- Дифференциация привела к формированию верхней мантии (перидотит = $mgOl+Px$);
- Парциальное плавление мантии сформировало протокору ($Ol+Px+Pl$ и $Grt+Px$ г.п.);
- В процессе последующих преобразований Px был замещен Amf ;
- Дегидратация Amf привела к переходу $Q+Pl$ в расплав и образованию низко-К "primary crustal granites" (Р-гранитов);
- Эти граниты и продукты их разрушения после магматического рециклинга образовали все I-, S- и A-граниты.

Попов В.С., 1993. Новая геохимическая модель формирования континентальной литосферы Земли. Известия вузов. Геология и разведка 1, 3–19.

Пуцаровский Ю.М., 1996. Сейсмотомография и структура мантии: Тектонический ракурс. ДАН 351 (6), 805-809

Классификации гранитоидов

- i. Минералогическая классификация (IUGS, BGS, петрографический кодекс и др.);
- ii. Геохимические классификации (e.g., ASI, S-A-I-M);
- iii. Тектонические классификации (основанные на геодинамических обстановках).

IUGS – the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks
BGS – British Geological Survey

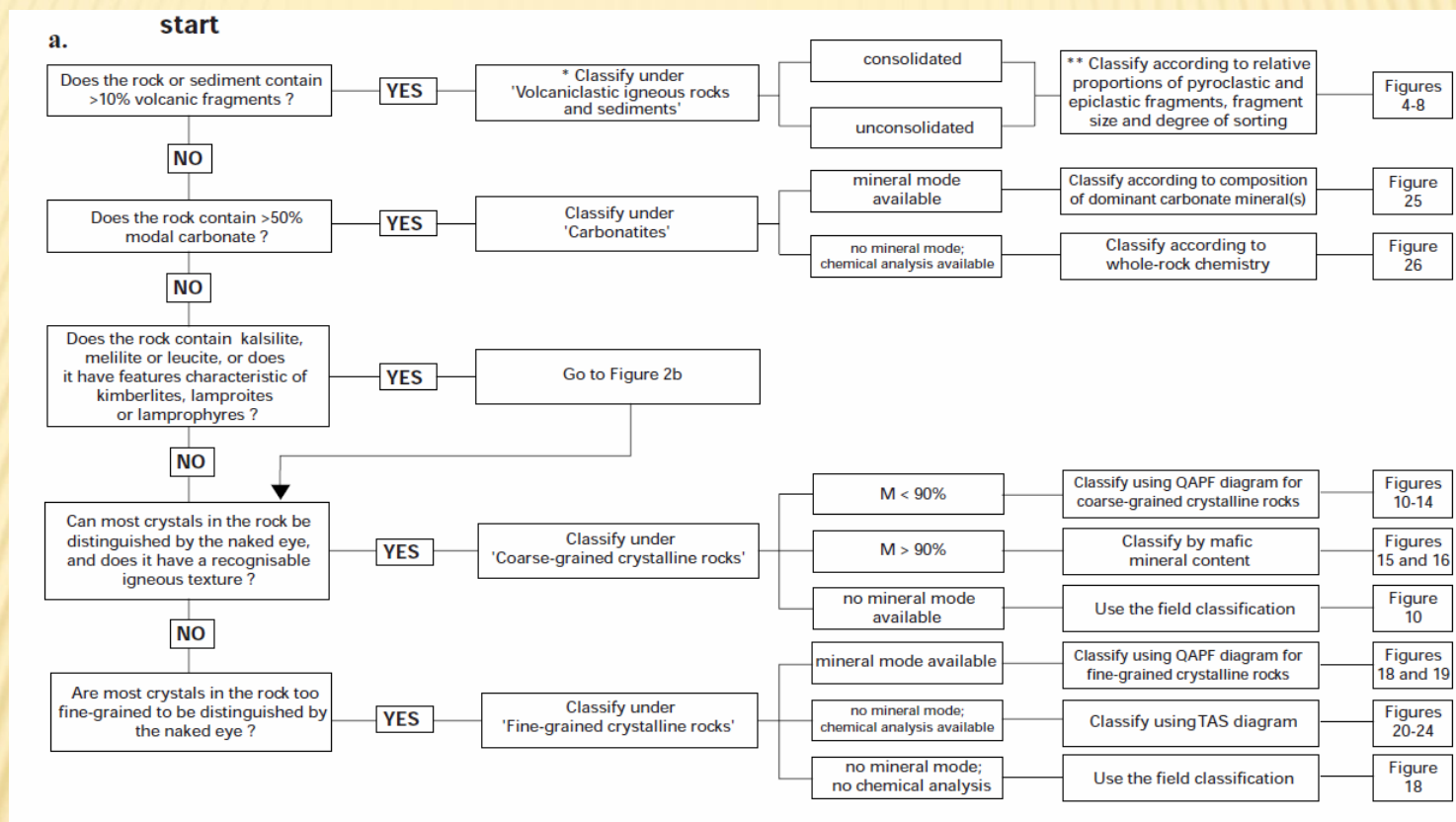
Классификацией называется распределение объектов по тому или иному существенному свойству, в результате чего каждый из них попадает в точно указанный класс, подмножество или группу.

Диаграмма (греч. - изображение, рисунок, чертёж) — графическое представление данных, позволяющее быстро оценить соотношение нескольких величин. Представляет собой геометрическое символическое изображение информации с применением различных приёмов техники визуализации.

Дискриминантный анализ используется для принятия решения о том, какие переменные различают (дискриминируют) две или более возникающие совокупности (группы)



Минералогическая классификация (IUGS, BGS, петрографический кодекс и др.)



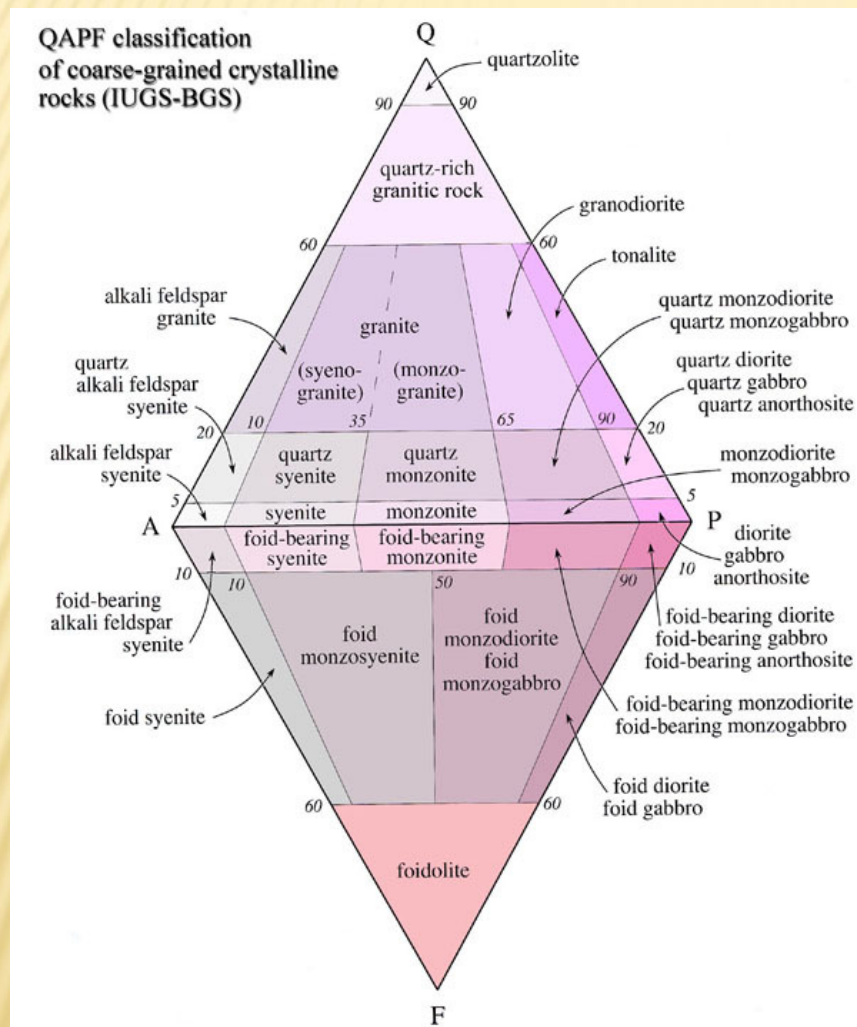
Международный союз геологических наук (IUGS)

Основные принципы классификаций:

- 1) использовать описательные атрибуты (т.е. размер зерен, состав и др.);
- 2) обеспечить пригодность для всех геологов;
- 3) использовать терминологию одобренную МСГН;
- 4) установить границы для типов пород;
- 5) сделать лёгкой в применении;
- 6) использовать методы модальной минералогии (QAPF классификацию);
- 7) если это не возможно - химический анализ.

До этого не было чёткого определения подобных принципов и их обоснованности.

QAPF классификация

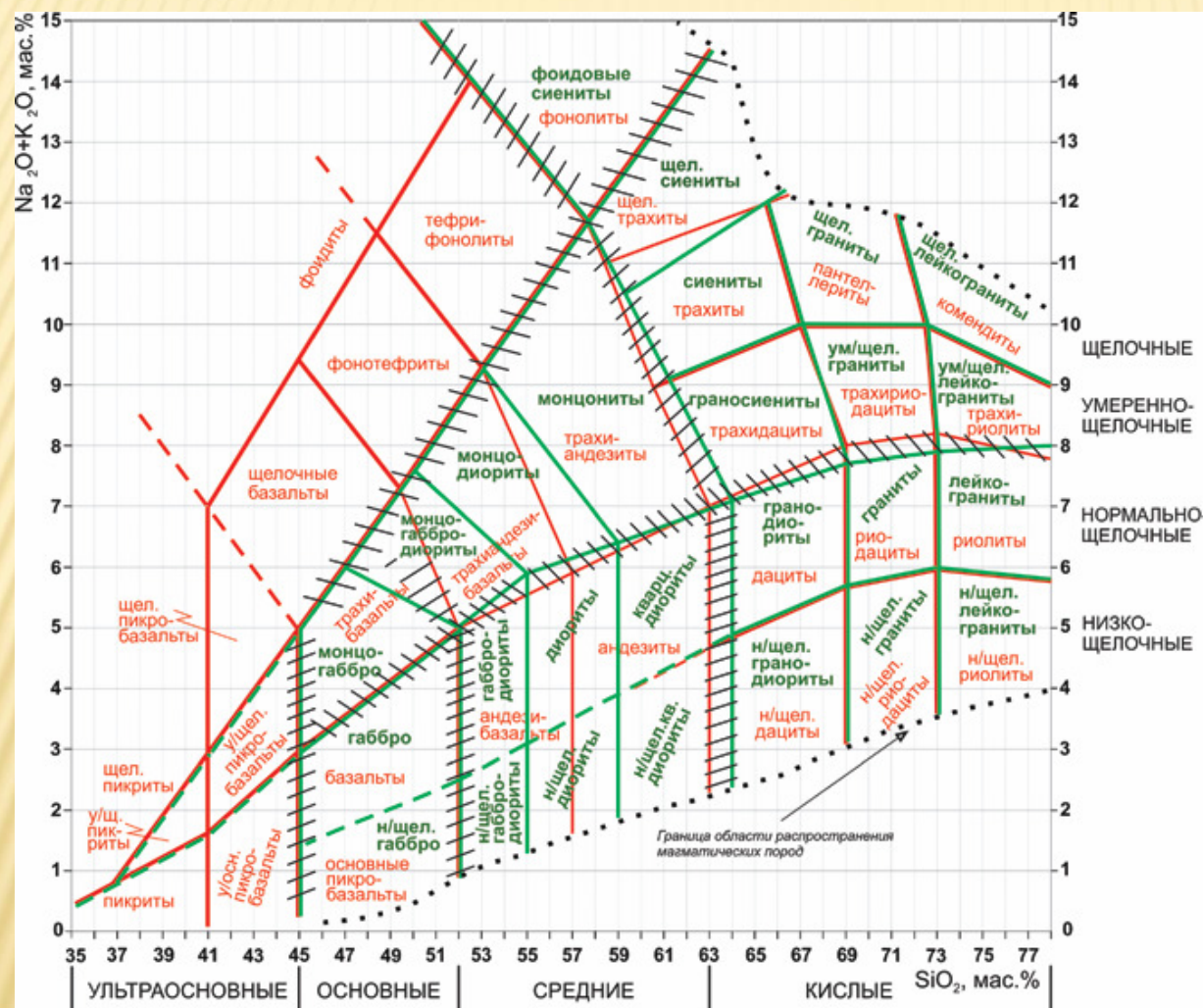


Granite is classified according to the **QAPF diagram** for coarse grained plutonic rocks and is named according to the percentage of quartz, alkali feldspar (orthoclase, sanidine, or microcline) and plagioclase feldspar on the A-Q-P half of the diagram. True granite according to modern petrologic convention contains both plagioclase and alkali feldspars. When a granitoid is devoid or nearly devoid of plagioclase, the rock is referred to as **alkali feldspar granite**. When a granitoid contains less than 10% orthoclase, it is called **tonalite**; pyroxene and amphibole are common in tonalite. A granite containing both muscovite and biotite micas is called a binary or *two-micagranite*. Two-mica granites are typically high in potassium and low in plagioclase

Q, A, P and F comprise the felsic minerals; minerals included under M are considered to be mafic in the context of the modal classifications. The sum of Q + A + P + F + M must be 100%. Minerals in Q and F are mutually exclusive. For each rock, the modal volumes for each group of minerals must be known and QAP or APF recalculated so that their sum is 100%. For example, a rock with Q = 10%, A = 30%, P = 20% and M = 40% would give recalculated values of Q, A and P as follows:
 $Q = 100 \cdot 3 \cdot 10 / 60 = 16.7$
 $A = 100 \cdot 3 \cdot 30 / 60 = 50.0$
 $P = 100 \cdot 3 \cdot 20 / 60 = 33.3$

Streckeisen, A. 1979. *Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks: recommendations and suggestions of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Geology 7, 331–335.*

TAS диаграмма для химической классификации вулканических (?) пород

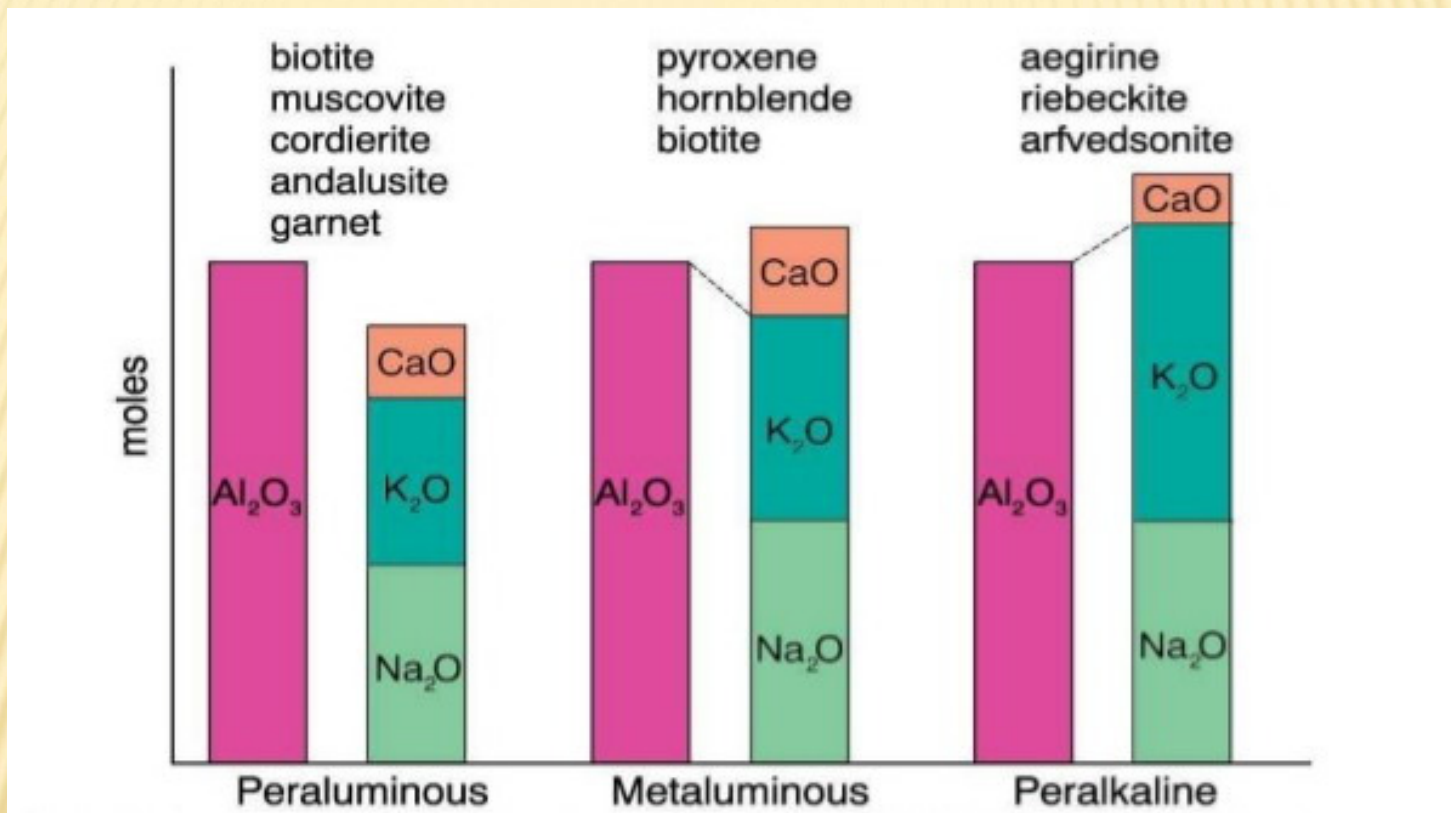


Границы полей групп плутонических (зеленые линии) и вулканических (красные линии) горных пород на TAS-диаграмме. Заштрихованы основные пограничные «зоны неопределенности» между группами пород

Le Bas, M.J. et al., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27, 745–750.

Шарпенюк, Л.Н. и др., 2013. TAS-диаграмма сумма щелочей–кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород. *Региональная геология и металлогения* 56, 40–50.

Классификация основанная на индекс насыщения глиноземом (ASI)

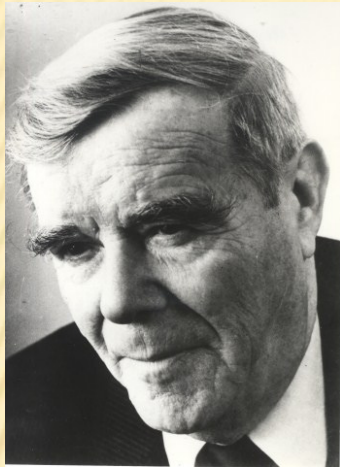


Shand, S. J. (1943). The Eruptive Rocks, 2nd edn. New York: John Wiley, 444 pp.

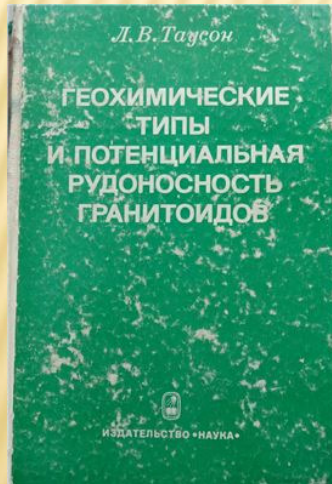
Молекулярное отношение $\text{Al}/(\text{Ca} - 1.67 \times \text{P} + \text{Na} + \text{K})$ даёт возможность разделить кислые магматические породы на высокоглиноземистые /плюмазитовые ($\text{ASI} > 1.0$), умеренно глиноземистые ($\text{ASI} < 1.0$, при $(\text{Na} + \text{K}) < \text{Al}$) и аптаитовые ($\text{ASI} < 1.0$, но $(\text{Na} + \text{K}) > \text{Al}$).

This ratio has been referred to as A/CNK by *Clarke, 1981* and the Aluminium Saturation Index ASI by *Zen, 1986*.

Геохимические классификации



Лев Владимирович
Тавсон
советский геохимик,
академик АН СССР



Известково-щелочная серия
Исходный материал:
слабо метаморфизованные
толщи осадочных пород.

1. Палингенное плавление вещества континентальной коры

Щелочная серия
Исходный материал:
сильно метаморфизованные
толщи осадочных пород

Палингенные гранитоиды
изв.-щел. ряда
абиссальные
Sr-330; Ba-830;
K/Rb-200; Ba/Rb-5

Плюмазитовые
редкометалльные
гранитоиды
гипабиссальные
Li-180; F-0.27;
K/Rb-90; Ba/Rb-0.4
(Li-F граниты / онгониты)

Палингенные гранитоиды
щелочного ряда
абиссальные
Ba-1550; Sr-650;
K/Rb-300; Ba/Rb-11

Редкометалльные граниты
щелочного ряда
гипабиссальные
Ba-500; Sr-170;
K/Rb-140; Ba/Rb-19

Промышленные содержания Sn, W, Ta и Mo
Высокие содержания Li, Rb, Be, F и Au

W-Mo месторождения

2. Дифференциация магм основного и среднего состава, возникших в результате селективного плавления вещества верхней мантии

Базальтоидные магмы
толеитового состава

Андезитовые расплавы

латитовые щелочные
базальтоидные магмы

щелочные оливиновые
базальтоидные магмы

плагриограниты толеитового ряда
главный компонент офиолитовых
серий
K-0.3; Rb-2.6; Ba-67;
K/Rb-1080; Ba/Rb-22
наименее перспективны для
потенциальной рудоносности

гранитоиды
андезитового
(изв.-щел.) ряда
K-2.0; Rb-100; Ba-550;
K/Rb-200; Ba/Rb-5.5
Au-W, Au-Ag, Cu-Mo
месторождения

граниты латитового
Px-Fsp
(монзонитового) ряда
Ba-1700; Sr-700; B-23;
K/Rb-280; Ba/Rb-14
Залежи шеелита,
Sn, Mo, Pb-Zn и Au

агпайтовые редкометалльные
гранитоиды
Nb-320; Zr-2170; Ta-18.6;
Sr-12; Ba-40;
K/Rb-133; Ba/Rb-0.15
Ta-Nb редкометалльные
месторождения

3. Ультраметаморфизм и гранитизация кристаллического основания континентальной коры

гранитоидов глубокометаморфизованных участков земной коры, образовавшихся в результате мигматизации и последующего палингенного выплавления анхизэвтектических гранитоидных расплавов.

Ультраметаморфические граниты K-4.6; Ba-2800; K/Rb-330; Ba/Rb-20
наименее перспективны для потенциальной рудоносности

Палингенез (*pálin* — снова, и *génesis* — происхождение, рождение), образование магм за счет частичного или полного плавления осадочных, метаморфических или магматических горных пород в условиях земной коры.

The “genetic alphabet soup”, referred to as S-I-A-M (e.g., Clarke, 1992), or S-I-M-A (e.g., Sial et al., 1987).



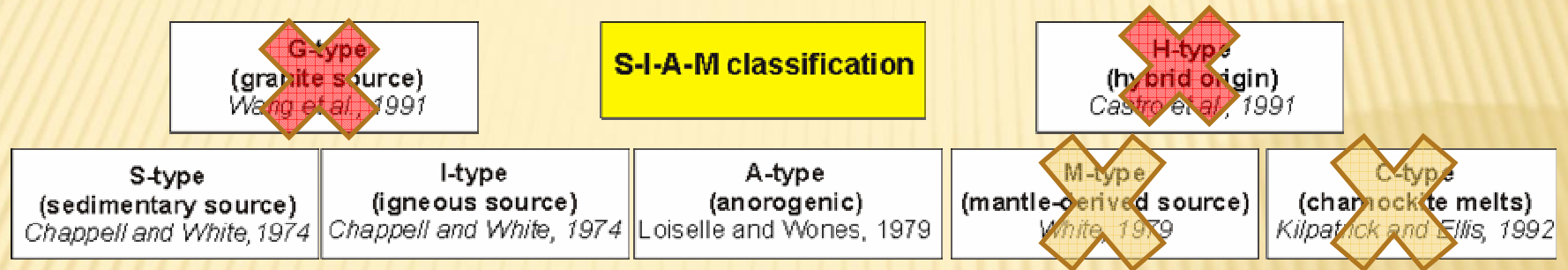
Granite type	Chemical features	Specific minerals	Source rocks
S (1)	Peraluminous $ASI \geq 1.1$	Peraluminous mafic minerals (cordierite, garnet, etc.)	Meta-sedimentary sequences
I (1)	Metaluminous $ASI < 1.1$	No peraluminous mafic minerals occurrence of hornblende	Igneous materials from deep crustal levels
M (2)	Volcanic arc signature		Subducted oceanic crust
No letter attributed (3)	Alkaline affinities and anorogenic	Fe-rich mafic silicates	Granulitic residue from a previous melting event

1. S- and I-types are the oldest defined granite types (Chappell and White, 1974).
2. M-type is akin to Archean TTGs and modern adakites (for an overview, see Martin et al., 2005).
3. The type with no letter attributed corresponds to A-type.

•Chappell, B.W., White, A.J.R., 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology* 8, 173–174.

M-, C-type and others

There is no need of a specific letter, C-type, for a charnockite type, and for M-type, for mantle-derived source (Bonin, 2007).



- M-type, результат парциального плавления субдуцируемой океанической коры (технически I-type);

- *Martin et al., 2005*

- C-type, предложен на 2м Hutton Symposium по гранитам, Австралия (*Kilpatrick and Ellis, 1992*);

- C-type не получил широкого признания среди специалистов;

- C-type представляет продукт плавления гранулитов, в очень высокотемпературной и "dry" среде;

- По сравнению с A-типом магм, характеризуется еще большими содержаниями Zr, HFSE, Ba и Sr, и отсутствием Eu аномалии (*Elliott, 2003*).

Bonin, B., 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos* 97, 1–29.

Xiao, L., Clemens, J.D., 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. *Lithos* 95, 399–414.

Martin, H., Smithies, R.H., Rapp, R., Moyen, J.F., Champion, D., 2005. An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos* 79, 1–24.

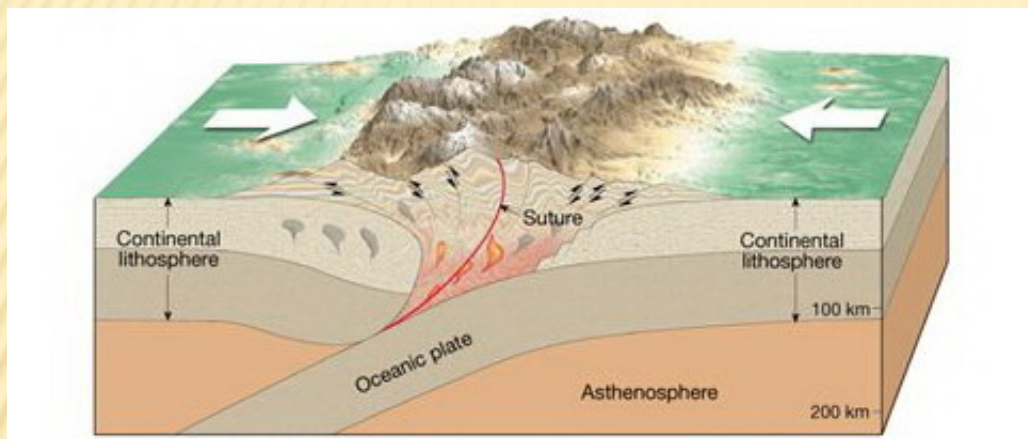
I – igneous source; S – (meta-) sedimentary source

I-types	S-types
Relatively high sodium, Na₂O normally >3.2% in felsic varieties, decreasing to >2.2% in more mafic types	Relatively low sodium, Na₂O normally <3.2% in rocks with ~ 5% K ₂ O, decreasing to <2.2% in rocks with ~ 2% K ₂ O
Mol. Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O + K ₂ O + CaO) <1.1	Mol. Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O + K ₂ O + CaO) >1.1
CIPW normative diopside or < 1% normative corundum	>1% CIPW normative corundum
Broad spectrum of compositions from felsic to mafic	Relatively restricted in composition to high SiO ₂ types
<ul style="list-style-type: none"> •Hornblende is common in the more mafic I-types and generally present in felsic varieties; •Sphene is a common accessory in the I-type; •Apatite inclusions are common in biotite and hornblende of I-type granites; •hornblende-bearing xenoliths; •Initial Sr₈₇/Sr₈₆ ratios in the range 0.704–0.706 	<ul style="list-style-type: none"> •Hornblende is absent, but muscovite is common, in the more felsic S-types, biotite may be very abundant, up to 35%, in more mafic S-types; •Monazite may be found in S-types; •Aluminosilicates (garnet and cordierite) may occur in S-type xenoliths or in the granites themselves; •Apatite occurs in larger discrete crystals in S-types; •metasedimentary xenoliths; •Initial Sr₈₇/Sr₈₆ >0.708
Volcanic rocks typically contain Qz, Pl, Opx and Cpx	Volcanic rocks typically contain Qz, Pl, Opx and Crd
<p>(i) low-temperature I-type contains abundant inherited zircon, formed in a tectonic setting other than simple subduction (cf. <i>Collins 1998</i>).</p> <p>(ii) high-temperature I-type lacks inherited zircon.</p>	<p>(i) two-mica leucogranite representing pure crustal melts of thermal minimum composition,</p> <p>(ii) cordierite- or garnet-bearing granitoids explained as retaining a strong Al-rich restitic component.</p>
U–Pb (zircon) and Zr (bulk-rock) studies of low temperature I-type granites reveal that they crystallized from zircon-undersaturated magmas and inherited zircon crystals reflect melting and assimilation of a meta-sedimentary source (<i>Kemp et al., 2005</i>).	Sr–Nd isotopic data show that two-mica leucogranite could result exclusively from the melting of metagranites (<i>Turpin et al., 1990</i>) and experimental studies (<i>Patino Douce, 1991, 1999</i>) show that incorporation of at least 50% basalt into 50% metapelite is required to generate liquids of S-type composition

CHAPPELL B. W. & WHITE A. J. R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology* 8, 173–174.

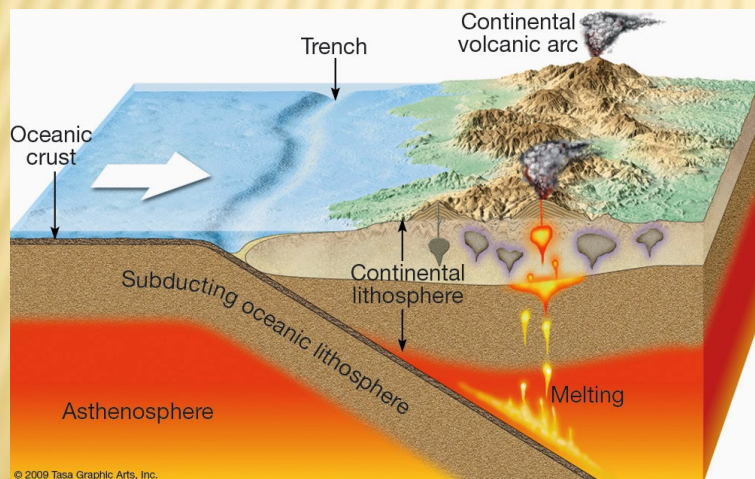
CHAPPELL B. W. & WHITE A. J. R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences* (2001) 48, 489–499.

S-Type granitoids – syn-collisional granitoids (*Pearce et al., 1984*), continental collision granitoids (*Maniar & Piccoli, 1989*), and muscovite–peraluminous granites (*Barbarin, 1999*)



- результат парциального плавления осадочных или претерпевших метаморфизм осадочных пород;
- встречаются как изолированные плутоны или метаморфические ядра утолщенной конт. коры;
- обычно отмечены в ассоциации с более мафичными породами;
- e.g. Himalayan granites.

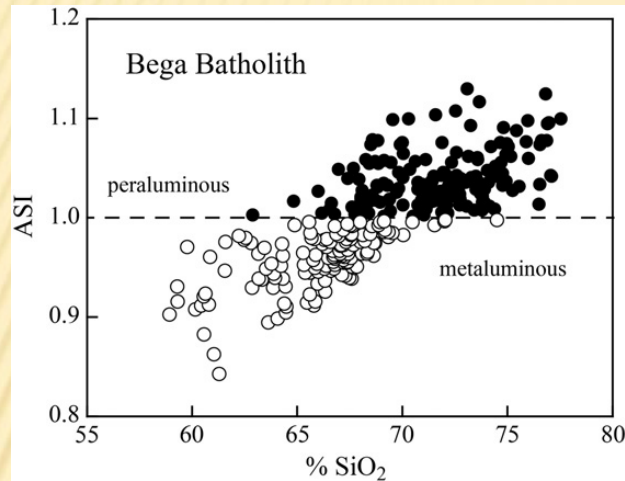
I-Type (Andean) granitoids – volcanic arc granites (*Pearce et al., 1984*), island arc and continental arc granitoids (*Maniar & Piccoli, 1989*), or amphibole-bearing calc-alkalic granites (*Barbarin, 1999*)



- результат парциального плавления магматических г.п.;
- в основном магнезиальные (*Frost et al., 2001*);
- окислительные условия;
- e.g. Cordillieran granites.



Высокоглиноземистые I-тип граниты !?



«I-type igneous rocks are commonly, wrongly, conceptualised as being metaluminous, but more than half of the low-temperatures I-types analysed from the LFB in SE Australia are peraluminous».

- избыток Al_2O_3 в гранитах I-типа зависит от процесса плавления ($Bi, Amf \rightarrow Px$) и не связан с валовым составом источника;
- при более высоких температурах частичного плавления, кальций и другие составные элементы Srx растворяются в расплаве, который в итоге становится умеренноглинозёмистым.

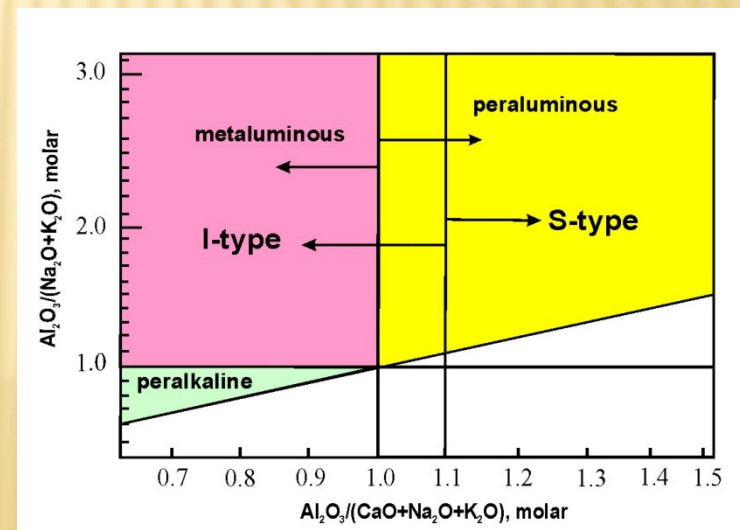
• Chappell, B.W., Bryant, C.J., Wyborn, D., 2012. Peraluminous I-type granites. *Lithos* 153, 142–153

• низко-температурные I-граниты Австралии сформировались в иных геодинамических условиях нежели просто субдукция (cf. Collins 1998);

• высоклиноземистые I-типы магм образуются из умеренноглиноземистого источника;

• граниты S-типы обычно менее глиноземистые чем породы из которых они образуются.

A/NK ($Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$) vs. *A/CNK* ($Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$, all in molar quantities) diagram of Shand's index (Maniar and Piccoli, 1989)



A-type granites and related volcanic rocks

Один из самых «загадочных типов» магматических образований; на основе своего безводного (от английского Anhydrous), щелочного (Alkaline) и глиноземистого (Aluminous) состава, а также, в силу их проявления в различных геодинамических обстановках: анорогенных (Anorogenic), атлантических (Atlantic, *Harker, 1909*), After (в смысле постколлизийных, *Liegeois, 1998*), и, в результате за годы оживленных дискуссий заслуживших еще один термин – «двусмысленные» (Ambiguous) получил название А-«гранитоиды».

- A-type rocks are associated with ultramafic rocks, alkali and tholeiitic basalts, and intermediate rocks (*Richey et al., 1961*);
- A-type granites were originally defined for continental areas, but most, if not all, granitic rocks emplaced within oceanic contexts share A-type characteristics and are associated with alkaline, transitional, or tholeiitic mafic rocks (e.g., *Giret, 1990*).
- On Moon, 4.4–3.9 Ga granite clasts display $Qz + Or_{80-95} + An_{85-65} + Fa + Px + Ilm + \text{accessory minerals} + FeS + Fe-Ni \text{ metal assemblage}$, indicating fayalite–iron–quartz (FIQ) buffering conditions (*Warren et al., 1983*) striking affinities to WPG and A-type high-silica granites;



Данный тип магматических пород образован в условиях резко отличающихся от таковых для других типов гранитов. Их проявления поддерживают доказательство, что вопреки традиционным выводам – ассоциация воды, континентальной коры и процессов плиттектоники **НЕ** являются предпосылками образования гранитных расплавов А-типа (*Bonin, 2007*).

Состояние проблемы

CHARACTERISTICS AND ORIGIN OF ANOROGENIC GRANITES

LOISELLE, Marc C., and WONES, David R., Department of Geological Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061

Granitoid rocks generated along rift zones and within stable continental blocks (anorogenic or A-type) are usually mildly alkaline, with low CaO and Al₂O₃ contents, high Fe/Fe+Mg, high K₂O/Na₂O and absolute K₂O contents. Examples include the Pikes Peak batholith, the White Mountain Magma Series of New Hampshire, the Nigerian Younger granites, and the Gardar Province, Greenland. Petrographic studies of crystallization sequences indicate low H₂O fugacity; the F content of biotites indicates a relatively high HF/H₂O ratio in the magma; oxides and accessories indicate low to moderate oxygen fugacity. A-type granitoids are enriched in the incompatible trace elements (REE (except Eu), Zr, Nb, Ta), and low in trace elements compatible in mafic silicates (Co, Sc, Cr, Ni) and feldspars (Ba, Sr, Eu). Initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios

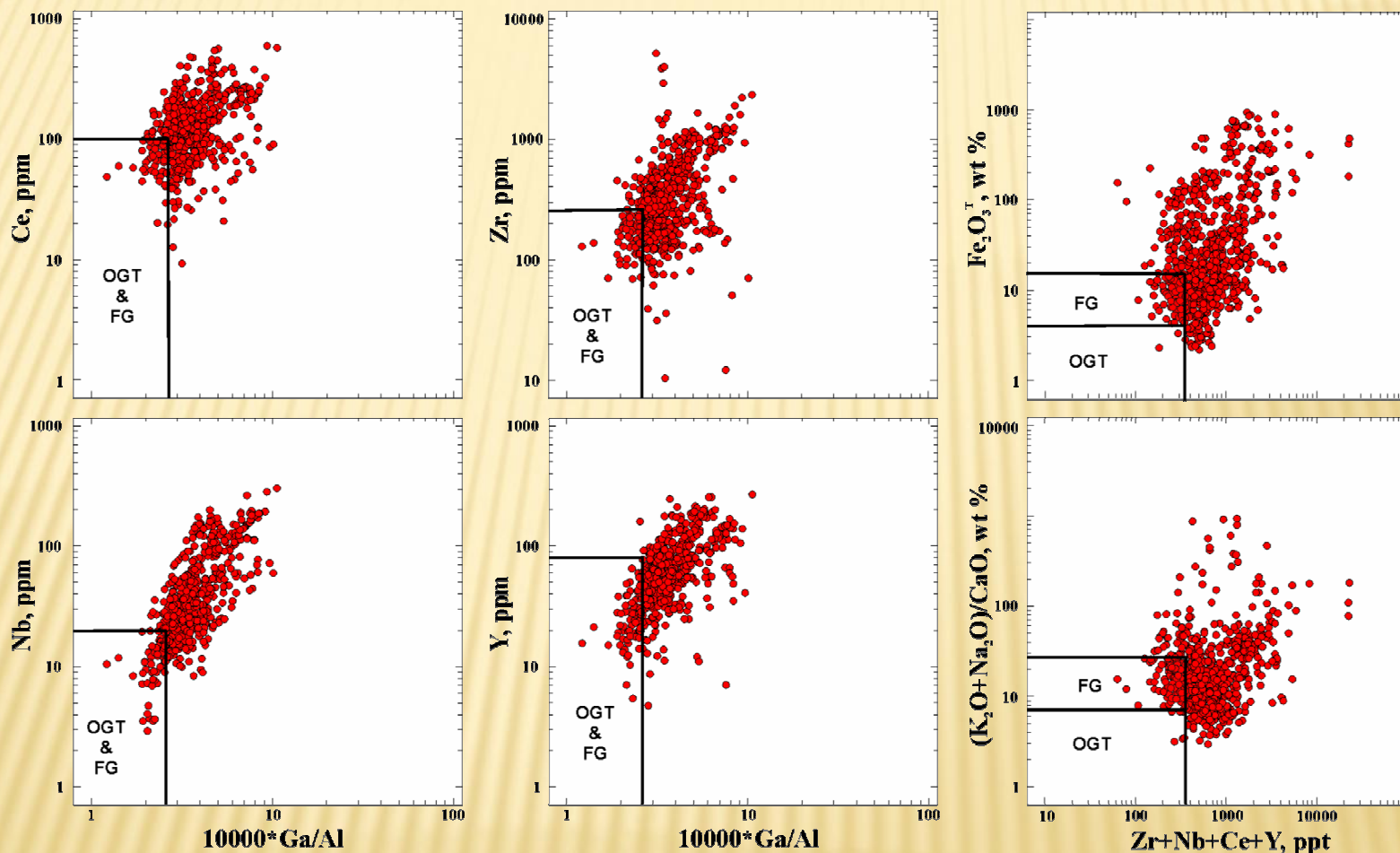
range from 0.703 to 0.712. The majority of A-type granitoids are produced when alkali basalt either a) interacts with a granulite facies lower crust (which has undergone a previous partial melting episode) to generate magmas with moderate to high initial Sr isotope ratios, or b) fractionates directly without crustal interaction to yield granites with low initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. In compressive orogenic zones basaltic magma (or its latent heat) commonly interacts with a thick crustal sequence to produce calcalkaline (I-type) or peraluminous (S-type) granitoids. Continental blocks undergoing rifting or fracturing provide minimal opportunity for interaction between basic magma and the crust.

Первая статья, в которой использовался термин А-граниты, появилась только в 1982 г. Её авторы отнесли к А-типу гранитные комплексы юго-восточной Австралии на основе **высоких концентраций Nb, Ga, Y и PЗЭ, при низких содержаниях Al (!), Mg и Ca.** Ранняя кристаллизация амфибола (гастингсита) и поздняя биотита (аннита) объяснялись авторами как результат обогащения магматических расплавов F и Cl. Ими же впервые было установлено, что **высокие значения Ga/Al** являются характерной чертой А-расплавов.

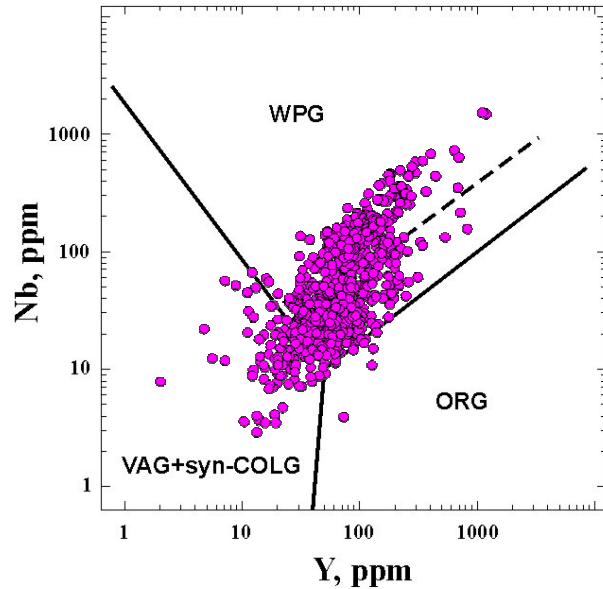
Loiselle, M.C., Wones, D.R. Characteristics and origin of anorogenic granites. Abstracts of papers to be presented at the Annual Meetings of the Geological Society of America and Associated Societies. San Diego. California. November 5-8. 1979. 11. P. 468.

Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R., Chappell, B.W., 1982. Nature and origin of A-type granite with particular reference to southeastern Australia. Contributions to Mineralogy and Petrology 80, 189-200.

Zr+Nb+Ce+Y versus FeO^*/MgO and $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$; $10000 \cdot \text{Ga}/\text{Al}$ versus Ce, Zr, Nb, Y plots of A-type granites and also fields for fractionated felsic granites (FG) and unfractionated M-, I- and S-type granites (OGT).



Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology 95, 407-419.



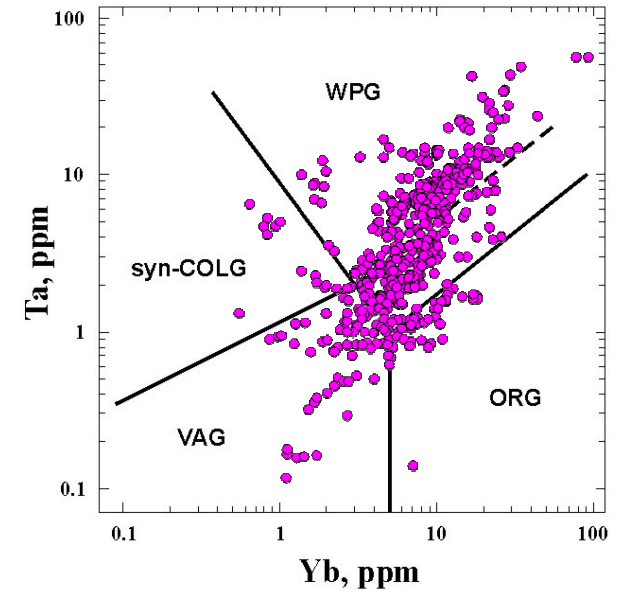
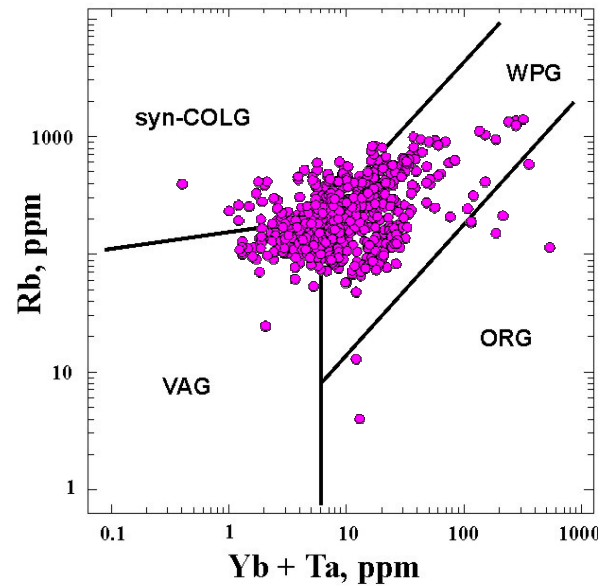
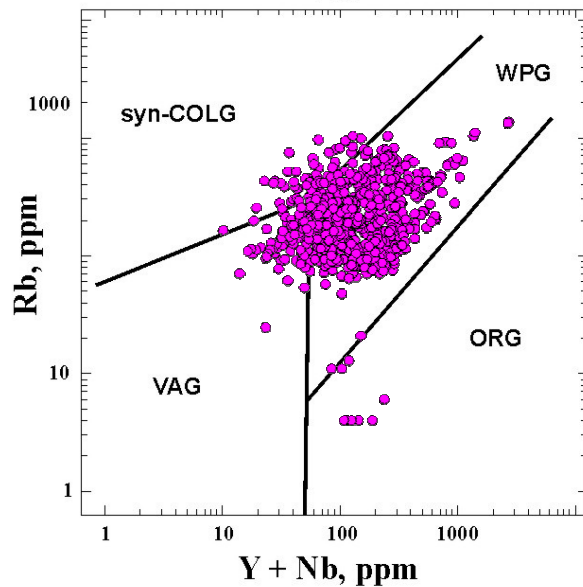
Дискриминантные диаграммы для синколлизонных (syn-COLG), вулканических дуг (VAG), внутриплитных гранитов (WPG) и гранитов океанических хребтов (ORG).

Пунктирная линия – граница ORG для анамальных рифтов.

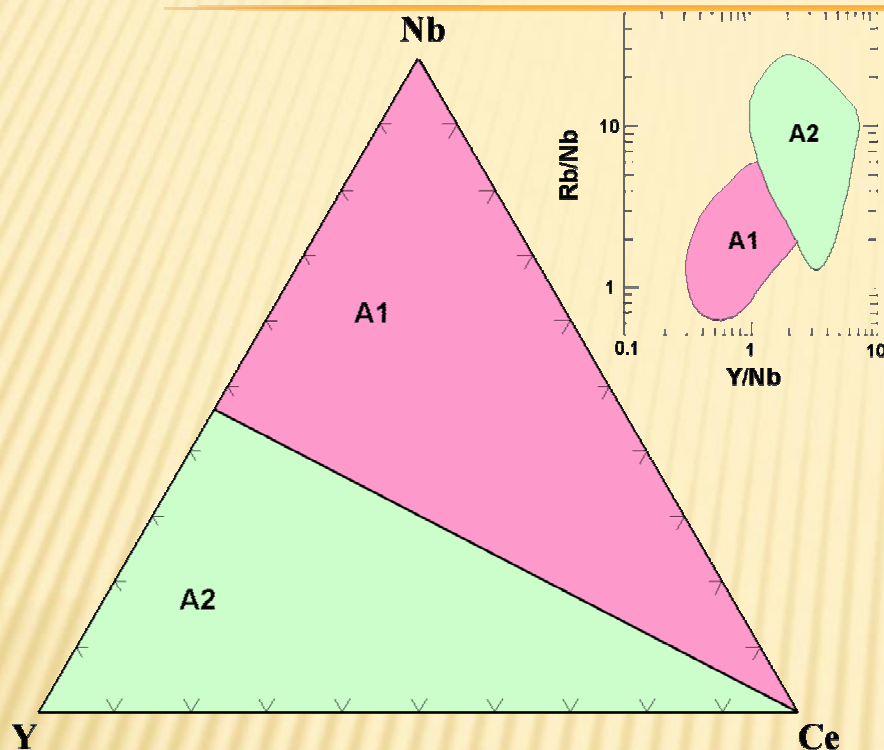
Note that post-collision granites can plot in all but the ORG fields, and that supra-subduction zone ocean ridge granites plot in the VAG field.

Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // *Journal of Petrology*. 1984. 25. P. 956-983.

Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism / Cowards M.P., Ries A.C. (Eds.). *Collisions tectonics*. Geological Society, London, Special Publication. 1986. 19. P. 67-81.



Тройная диаграмма Nb-Y-Ce для распознавания A1 и A2 гранитоидов.



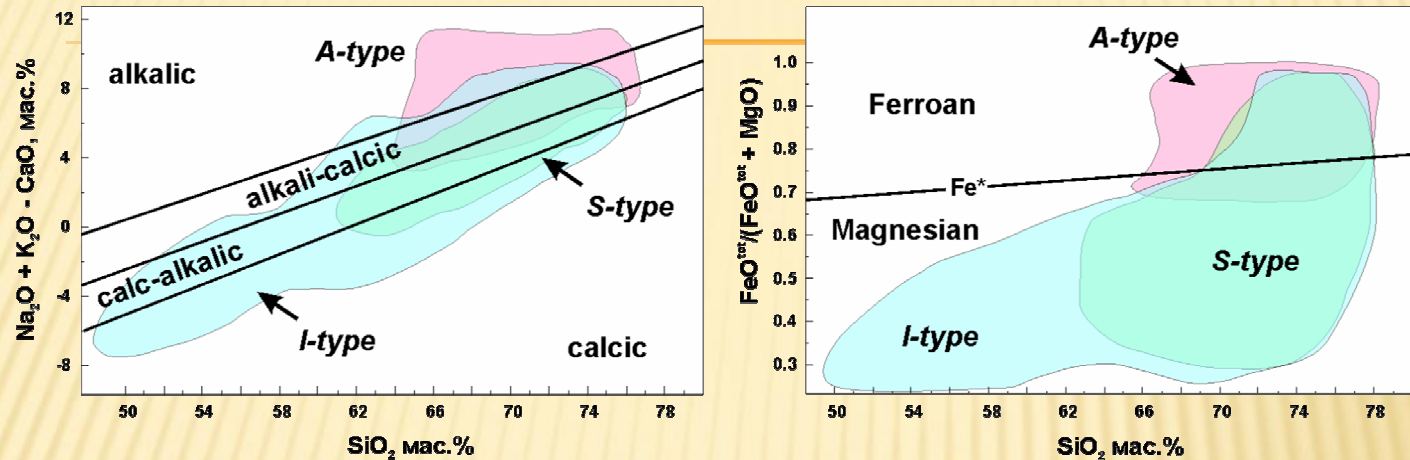
«These A1 and A2 discriminant diagrams should only be used for granitoids that plot both in the within-plate granite field of Pearce et al. (1984) and the A-type granitoid field of the Ga/Al plots of Whalen et al. (1987)».

Одним из важных выводов профессора Массачусетского университета Нельсона Эби является заключение о том, что **A-гранитоиды могут быть образованы самыми различными путями, которые не всегда соответствуют анорогенному режиму.**

A1 - кислые магматические породы океанических островов и континентальных рифтов анорогенных обстановок. Источник - базальты океанических островов (OIB) в обстановках внутриплитного или рифтового магматизма.

A2 - широкий диапазон геодинамических обстановок (в т.ч. коллизионных и составляющих исключение – анорогенных гранит-рапакиви), возникла за счет базальтового источника континентальных окраин и островных дуг (IAB) или в результате частичного плавления коры.

Диаграммы [Frost, et al., 2001] с полями щелочных (alkalic), известково-щелочных, щелочно-известковых и известковых (calcic) серий с составами A-, S и I-type гранитов



В систематику за основу были приняты три основных химических параметра: индекс железистости, позволяющий разделять магниевые (magnesian) и железистые (ferroan – собственно A-тип) гранитоиды; модифицированный щелочно-известковый индекс М. Пикока – $Na_2O + K_2O - CaO$ (MALI); и индекс насыщения глиноземом (ASI) дающий возможность разделить кислые магматические породы на высокоглиноземистые ($ASI > 1.0$) умеренноглиноземистые ($ASI < 1.0$, при $Na + K < Al$) и апаитовые ($ASI < 1.0$, но $Na + K > Al$).



Frost B.R. et al., 2001. A geochemical classification for granitic rocks. Journal of Petrology 42, 1771-1802.

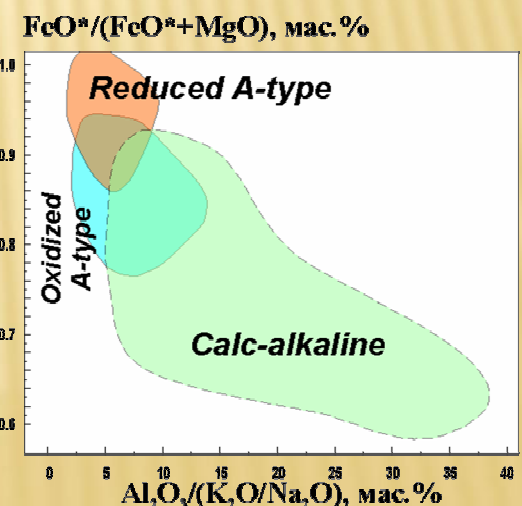
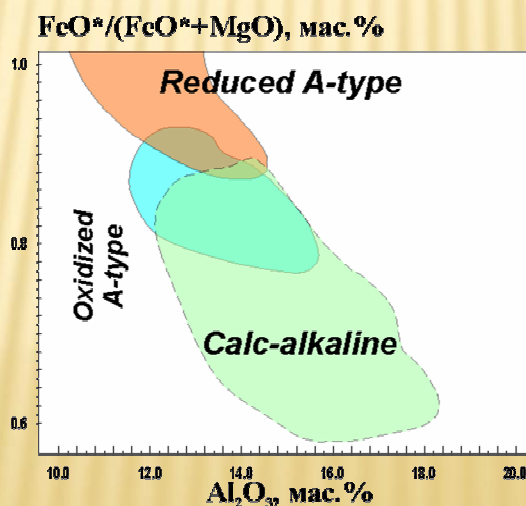
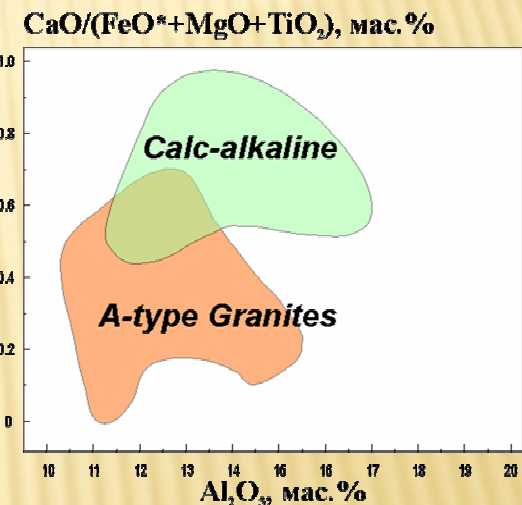
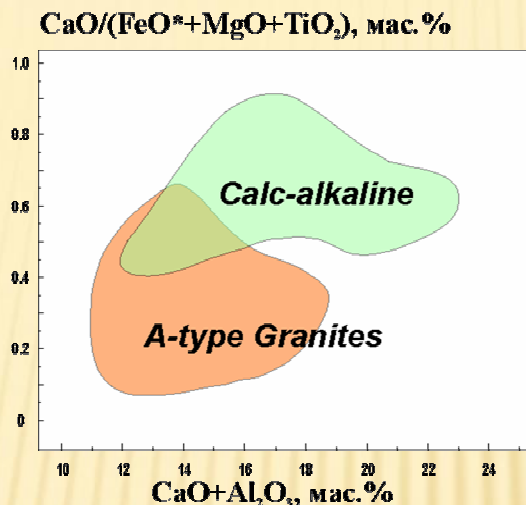
Frost C.D., Frost B.R., 2011. On ferroan (A-type) granitoids: their compositional variability and modes of origin. Journal of Petrology 52, 39-53.

Диаграммы $\text{CaO}/(\text{FeO}^*+\text{MgO}+\text{TiO}_2) - \text{CaO}$, $\text{CaO}/(\text{FeO}^*+\text{MgO}+\text{TiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{FeO}^*/(\text{FeO}^*+\text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{FeO}^*/(\text{FeO}^*+\text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$, (мас.%) с полями известково-щелочных и А-типов гранитов ("окисленных" и "восстановленных").

Anderson J.L., Bender E.E. Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States of America // Lithos. 1989. 23. P. 19-52.

Уточняющий термин «окисленный А-тип» вносит еще большую неопределенность в понимание А-гранитоидов. В целом, поскольку большинство классификаций, рассмотренных выше, не способны отличить подобные образования как от собственно А-гранитов, так и от орогенных (известково-щелочных), и I-гранитов.

Dall'Agnol R., Olivera D.C. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajas, Brasil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites // Lithos. 2007. 93. P. 215-233.



ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ А-ГРАНИТОВ И ИХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ

Ассоциации А-гранитоидов	Закартированы на всех континентах (включая Антарктиду)
Время образования	От неоархея (около 2.7 млрд. лет) до кайнозоя (10 млн. лет и моложе)
Формы проявления	Редкие для нижней коры (как, например, некоторые чарнокитовые комплексы), они обычны для близповерхностных, субвулканических уровней, где зачастую формируют кольцевые корнеподводящие каналы кальдер
Классификация	Кварцевые сиениты, умеренноглиноземистые и агпаитовые граниты, а вулканические аналоги – витрофировые риолиты, комендиты и пантеллериты
Химический состав	Щелочно-известковый до щелочного, железистый валовый состав, высокие концентрации крупноионных LIL, HFS (прежде всего Nb, Ga и Y) и REE (за исключением Eu) и низкие содержания Sr, Sc, V и обилие галогенов, особенно – F.
Минеральный состав	Присутствие железистых силикатов (феррогеденбергит, ферргастингсит, файялит и аннит) или характерных для агпаитовых разновидностей: эгирин, арфведсонит и рибекит, а также пертитовый полевой шпат.
Генезис	Граниты А-типа отмечены в ассоциации с основными изверженными породами и на континентах, и на океаническом дне, их происхождение связывают с мантийными производными. Мантийные значения изотопных соотношений (Rb-Sr, Sm-Nd).
Металлогенический потенциал	Помимо F, Y, Zr и группы редкоземельных элементов, А-гранитоиды известны и как источник Sn, а также W, Ta, Nb и Be. Sn-In минерализация характерна для топазовых гранитов северо-восточной и центральной Бразилии (e.g. Botelho, Moura, 1998). FeO-Cu-Au проявления парагенетически связаны с А-гранитами штата Миссури (США) (Kisvarsanyi and Kisvarsanyi, 1990) и Австралии (Polard, 2006).
Геодинамические условия проявления	От внутриплитных до границ скольжения плит. Зачастую А-граниты и риолиты ассоциируются с мантийным плюмом (файялитовые риолиты Йеллоустона); встречаются в областях континентального рифтогенеза (гранитные комплексы Африки, Южной Америки и северо-восточной части США, обусловленные раскрытием Атлантического океана); а также связаны с комплексами, установленными в зонах крупно-масштабных континентальных растяжений (провинция Бассейнов и Хребтов, зап. окраина США).

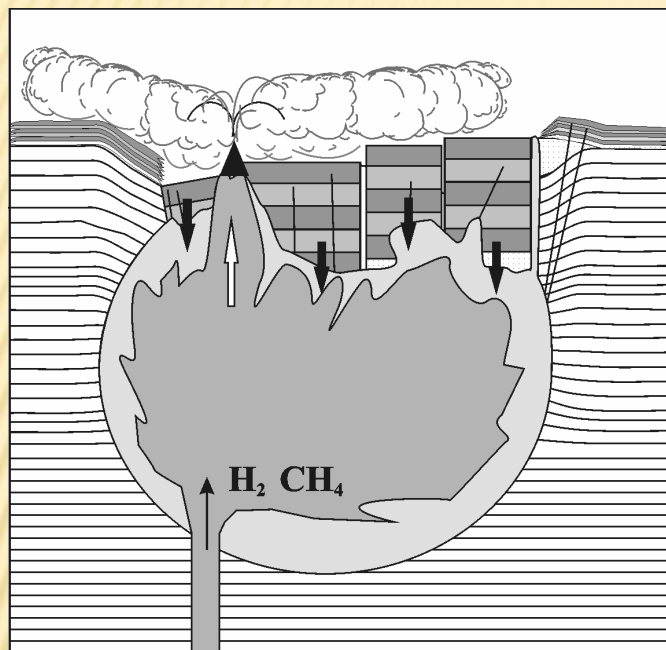
«Специфические особенности магматических пород из-за незначительности различий в составе основных петрогенных оксидов для пород близкой кремнекислотности выявить невозможно» ???

- + Альтернативный подход в использовании основных петрогенных элементов
- + Рассеянные элементы в кислых расплавах (в отличие от базальтов) обычно являются некогерентными [Bea, 1996].
- + U, Th и Zr входят главным образом в состав акцессорных минералов: апатита, циркона, сфена, ортита и монацита
- + Nb и Y концентрируются в оксидах и амфиболах, и их содержания отражают историю кристаллизации и некоторые интенсивные параметры (фугитивность кислорода и воды) этого процесса
- + Коровая контаминация также обычно оказывает гораздо большее влияние на содержания рассеянных элементов в гранитных, нежели, более основных расплавах

Выбор петрохимических параметров:

- + Содержание Fe, Mg, Ca, K и Na

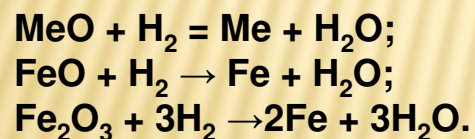
Fenitization-type (щелочной метасоматоз)



The mantle-derived fluid is alkali- and silica-bearing, and is able to transport a very wide array of elements, including the high field-strength elements, and a broad variety of anions are available to do the job. Fenitization-type reactions transform the refractory intermediate to mafic rocks of the lower crust to fertile assemblages that can melt (in cases completely) to give A-type granitic magmas of metaluminous or peralkaline character, or nepheline syenitic magmas, or carbonatitic magmas (*Martin, 2006, 2012*).

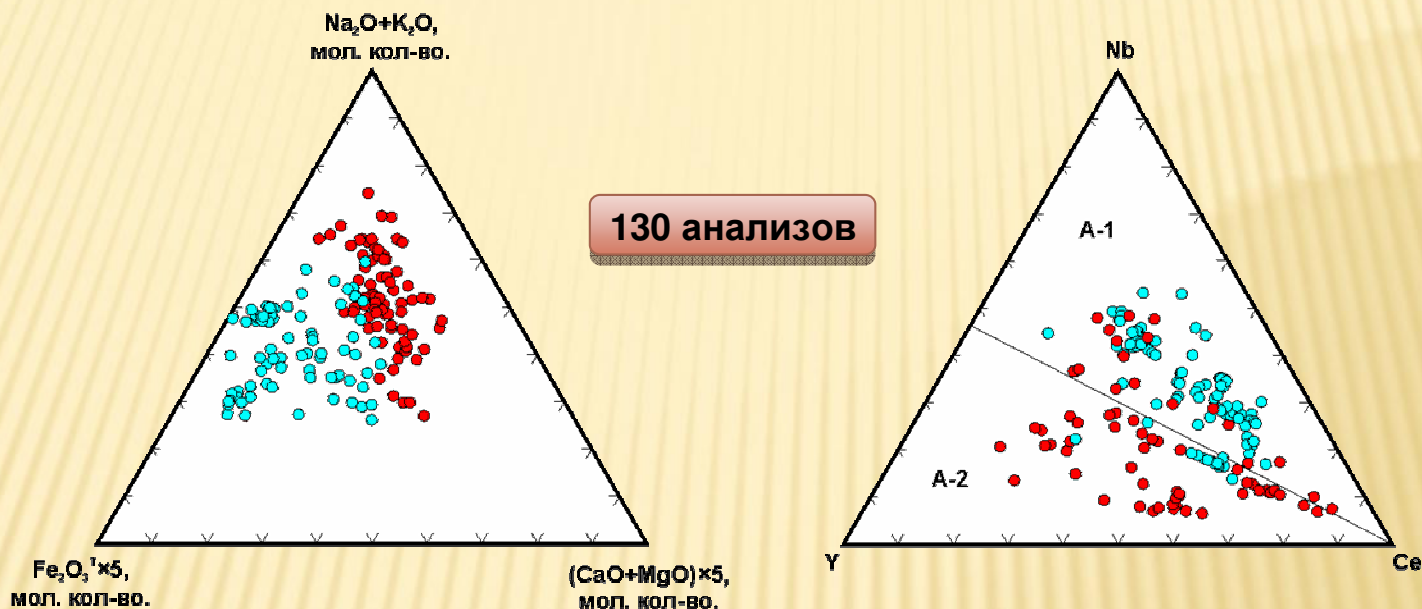
Палингенно-метасоматическое гранитообразование

(Д.С. Коржинский, Л.Л. Перчук и др.)



- Гранитные магмы зарождаются в глубоких горизонтах континентальной коры под влиянием не просто тепловых, а флюидно-тепловых потоков;
- Флюиды – это надкритические смеси преимущественно газовых компонентов (H_2O , CO_2 , CH_4 , H_2 , Ar , He и др.). Их глубинная природа доказана повышенным содержанием тяжелых изотопов углерода и водорода;
- Процесс гранитизации сводится к потере исходными породами Mg , Fe , Ca и Ti . Эти элементы выносятся щелочными флюидами из первичных пород. В сторону гранита возрастает концентрация Na_2O , K_2O , SiO_2 , а также присущих гранитам элементов-примесей.

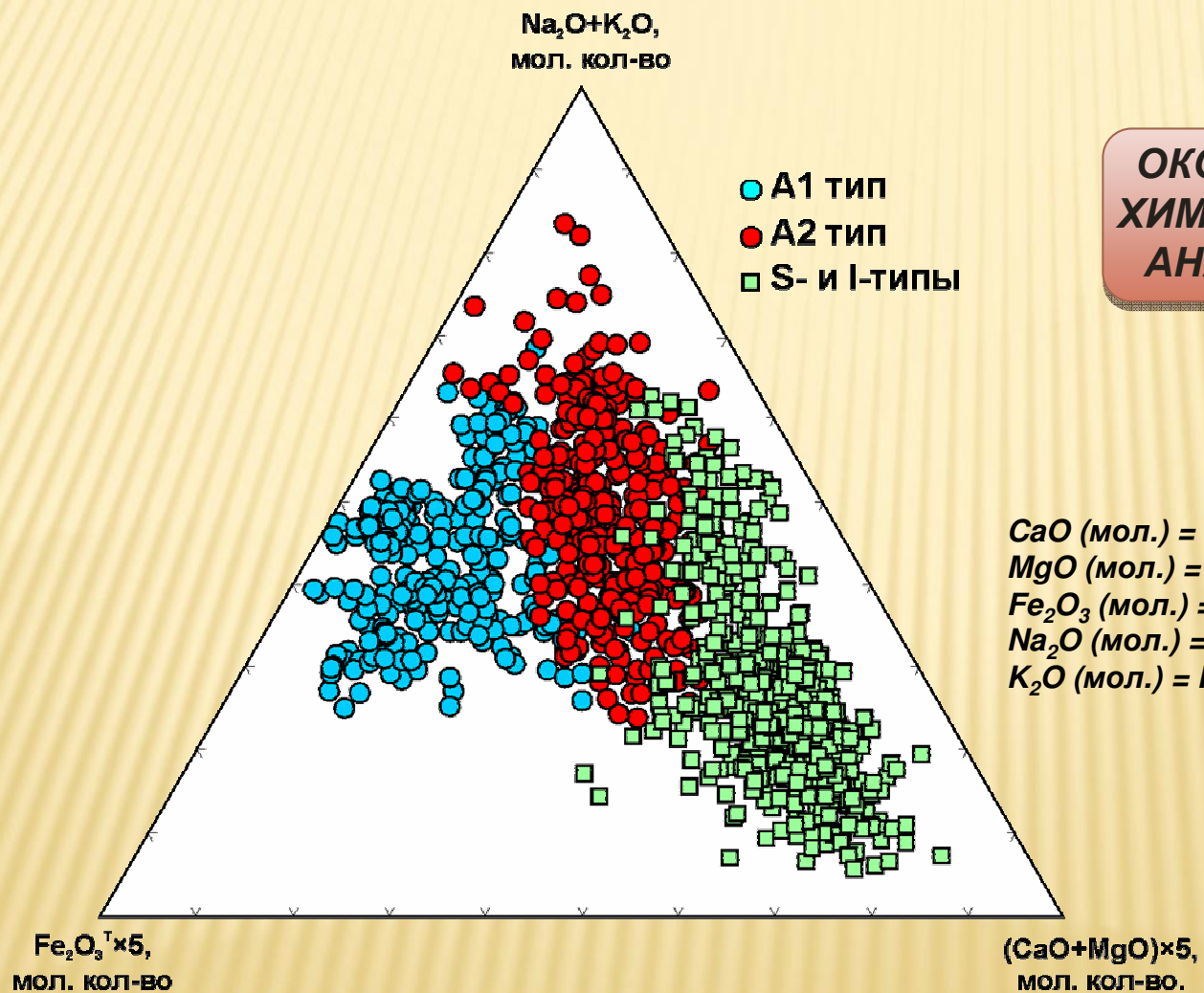
Сопоставление диаграмм $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}) - \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} \times 5 - (\text{CaO}+\text{MgO}) \times 5$ (мол. кол-во) и Nb – Y – Ce (г/т), для гранитов А-типа.



A-1 representative of a **rift environment**: Naivasha, East African Rift system; Zomba-Malosa, Chilwa province, Malawi; Yemen rift ; and the Eastern Trans-Pecos magmatic province, Texas. As representative of a **hotspot or plume environment** the following have been selected: White Mountain batholith, New Hampshire; Kaerven complex, East Greenland; Ras ed Dom complex, Sudan; and Velasco, Bolivia.

A-2 representative of **the postcollisional or postorogenic environments**: Gabo and Mumbulla, Lachland fold belt, Australia; Topsails complex, Newfoundland; Habd-Aldyaheen, Arabian Peninsula; Malani suite, northern India; Narraburra granite, Lachland fold belt; and subalkalic-peralkalic rhyolites of the southern British Caledonides. **The rapakivi granites** are also members of this second chemical group, and a rapakivi suite (Suomenniemi complex) from Fennoscandia is included as an example.

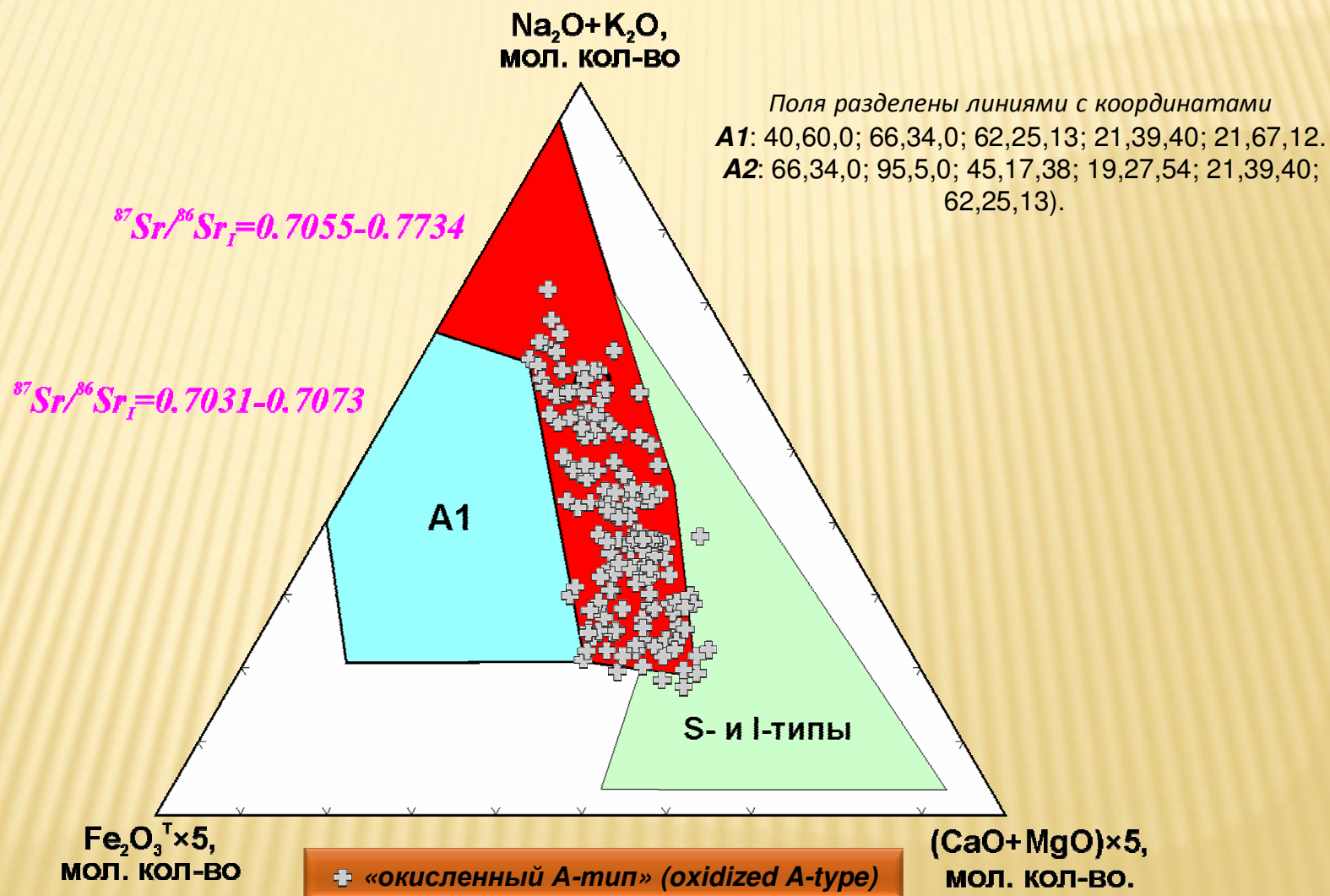
Тройная диаграмма $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}) - \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} \times 5 - (\text{CaO}+\text{MgO}) \times 5$ (мол.кол-во)
для разделения составов А-гранитоидов
и кислых магматических образований S-, и I типов



ОКОЛО 2500
ХИМИЧЕСКИХ
АНАЛИЗОВ

$\text{CaO (мол.)} = \text{CaO (мас. \%)} \times 1000/56.08;$
 $\text{MgO (мол.)} = \text{MgO (мас. \%)} \times 1000/40.32;$
 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (мол.)} = \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (мас. \%)} \times 1000/159.68;$
 $\text{Na}_2\text{O (мол.)} = \text{Na}_2\text{O (мас. \%)} \times 1000/61.99;$
 $\text{K}_2\text{O (мол.)} = \text{K}_2\text{O (мас. \%)} \times 1000/94.20.$

Тройная диаграмма ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) – $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}\times 5$ – $(\text{CaO}+\text{MgO})\times 5$ (мол.кол-во)
 для разделения составов А-гранитоидов
 и кислых магматических образований S-, и I типов

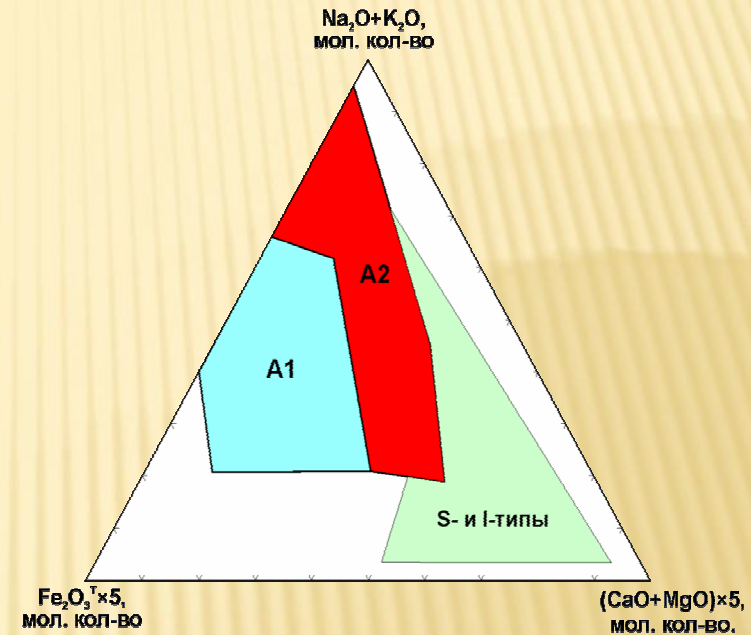


Интерпретация данных

1) **Геохимическая:** Диаграмма $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}) - \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} \times 5$ – $(\text{CaO}+\text{MgO}) \times 5$, основанная на молекулярных количествах петрогенных окислов, позволяет достаточно надежно разделить А-гранитоиды и кислые магматические образования других типов;

2) **Генетическая:** Выделенные поля среди А-типов соответствуют двум петрогенетическим типам, возникших в результате дифференциации щелочно-базальтовых магм, при незначительных процессах ассимиляции (A1), и обусловленных значительным контаминирующим взаимодействием мантийных расплавов с кислым материалом континентальной коры (A2);

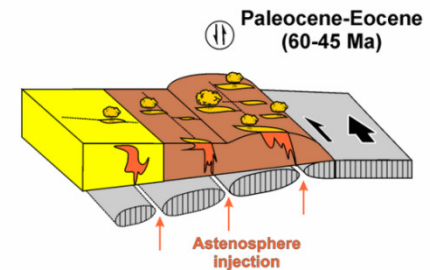
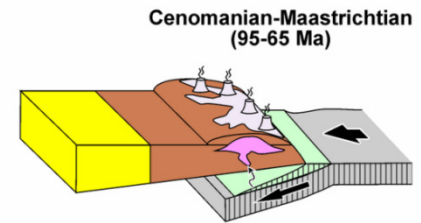
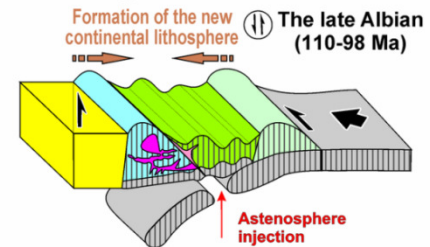
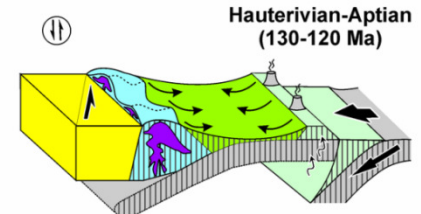
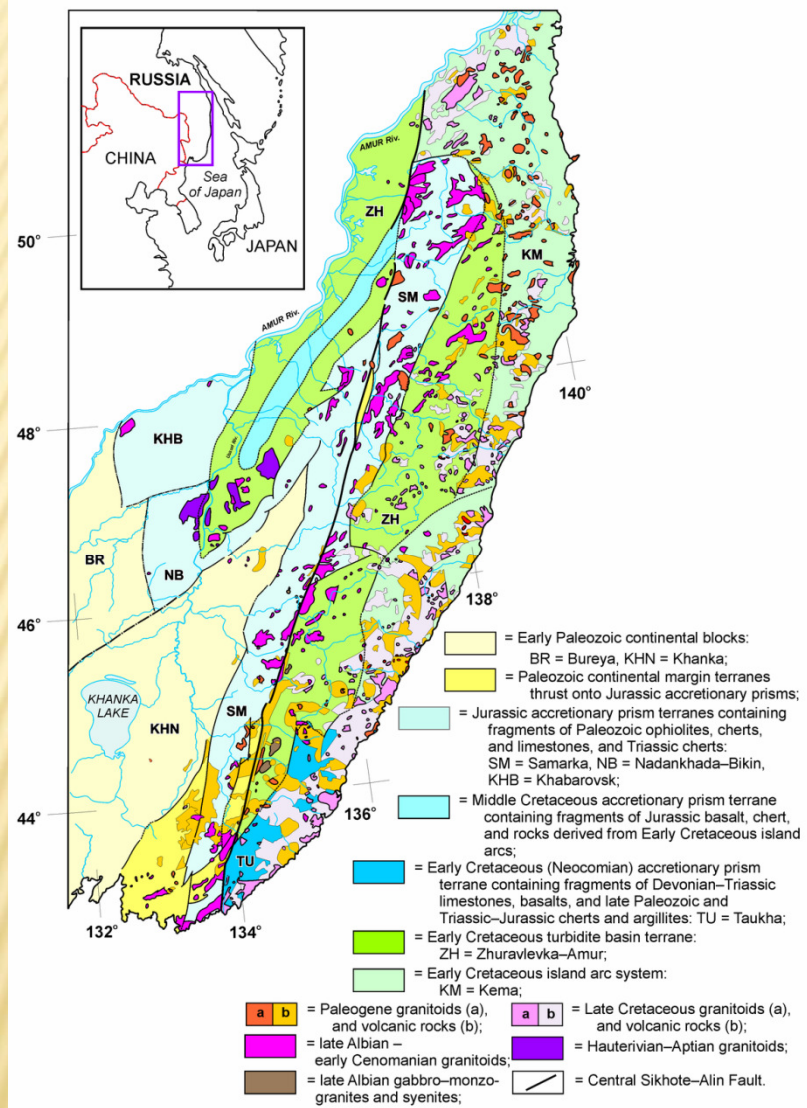
3) **Геодинамическая:** **A1** - поле кремнекислых пород внутриплитных геодинамических обстановок: океанических островов и континентальных рифтов; **A2** - кислые магматические ассоциации проявленные в геодинамических обстановках скольжения плит внутри- и окраинноконтинентального типа.



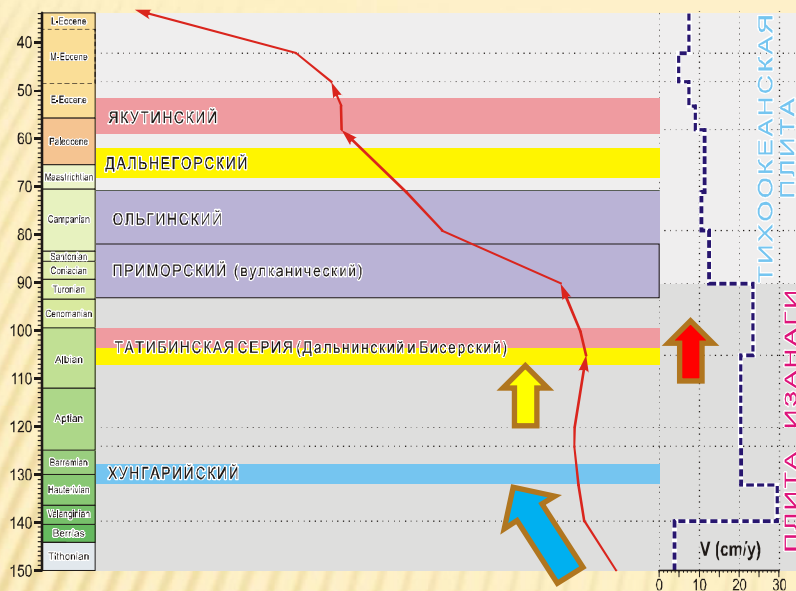
Ряд ограничений:

- использовать только кислые магматические породы $\text{SiO}_2 > 67$ мас.%;
- исключить породы подверженные значительным вторичным изменениям, представляющие вулканические стекла, фьямме или их фрагменты, а также «экстремальные» разности ($\text{SiO}_2 > 80\%$ мас.%) и продукты ликвации;
- осмотрительно подходить при трактовке составов А-«гранитоидов» располагающихся на границе полей А2 и I-S-типов в связи с возрастанием области перекрытия с высокодифференцированными «орогенными» производными.

ПРИМЕРЫ



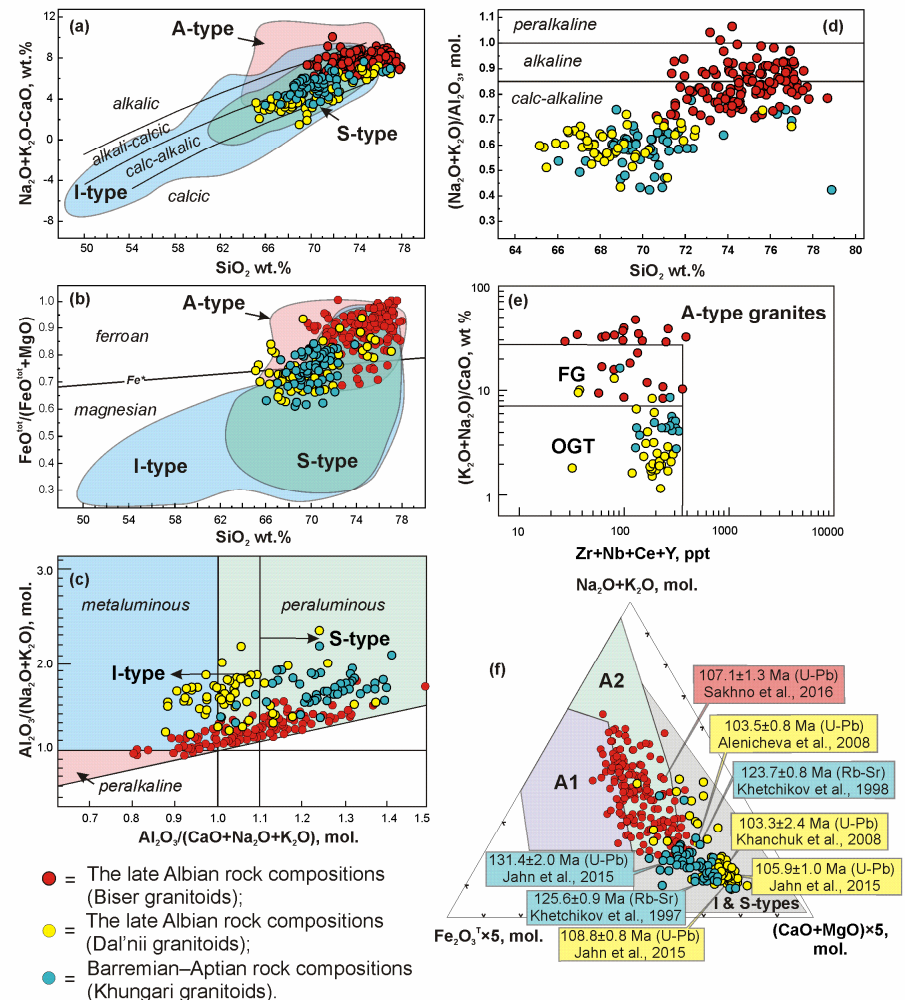
Grebennikov, A.V., Khanchuk, A.I., Gonevchuk, V.G., Kovalenko, S.V. Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia): geochemistry and tectonic implications. *Lithos* (2016), doi: 10.1016/j.lithos.2015.12.020.

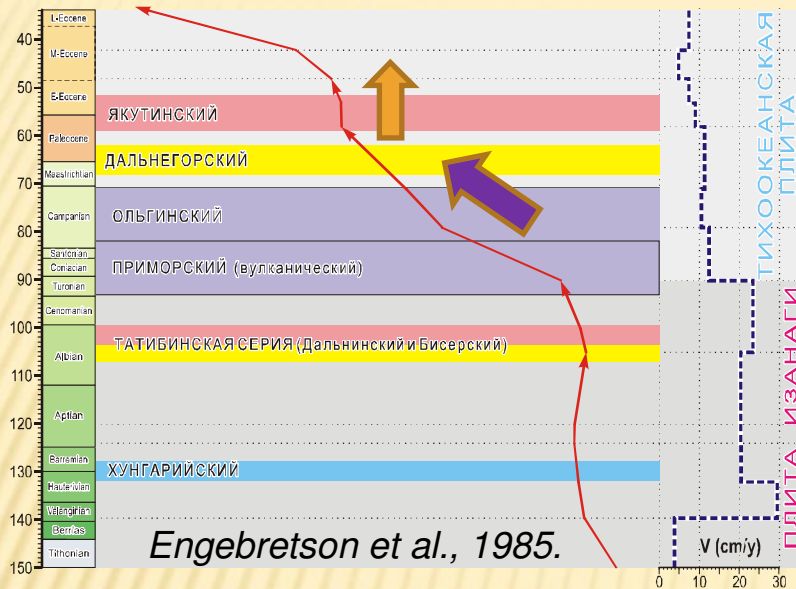


Составлено С.А. Касаткиным
на основе данных *Engebretson et al., 1985*

В готерив–апте орогенный этап в пределах Сихоте-Алиня ассоциируется с сдвиговыми дислокациями ранее палеозойских континентальных блоков, последующей деформацией юрских и раннемеловых террейнов и внедрением «первых» гранитоидов S-типа.

В течение позднего альба территория Сихотэ-Алиня подверглась сдвиговым дислокациям обусловленным коллизией с аптской островной дугой в результате чего произошло внедрение огромных объемов известково-щелочных магниезальных (S- и I-типов) и щелочно-известковых железистых (A-type) гранитоидов по системам разломов в области сжатия и растяжения соответственно.





Перемещение плиты Изанаги в северо-западном – западном направлении в сеноман-маастрихте выразилось во фронтальной субдукции палеотихоокеанской плиты, что, в свою очередь, отразилось в образовании больших объемов плато-игнимбритов и их интрузивных аналогов из кислых магматических расплавов I-типа.



Палеоцен–эоценовый рифтогенный магматизм в пределах Сихоте-Алиня был инициирован сразу после завершения субдукции и связан с трансформным скольжением океанической плиты относительно континентальной. Разрыв слэба и внедрение астеносферных расплавов в субконтинентальную литосферу отразился во внедрении лампроитов и файялитовых риолитов и интрузиях габбро и щелочных гранитов (А-типа).

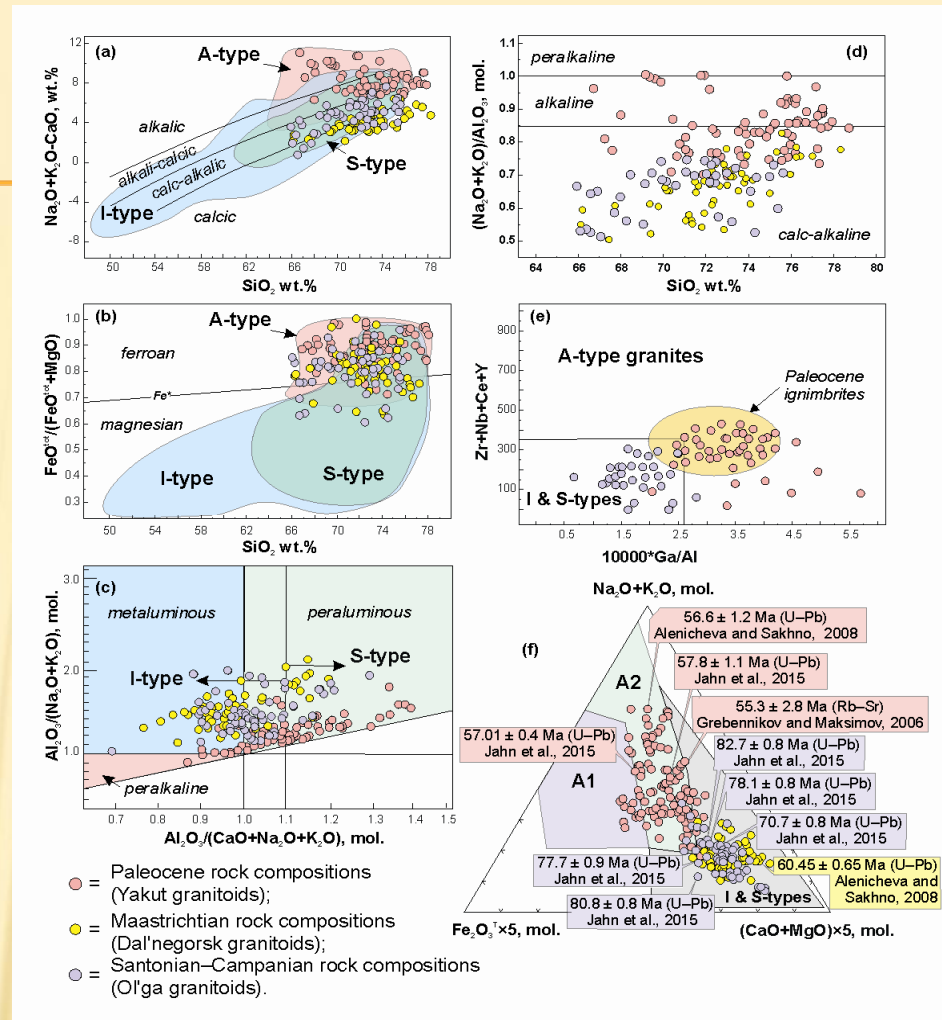
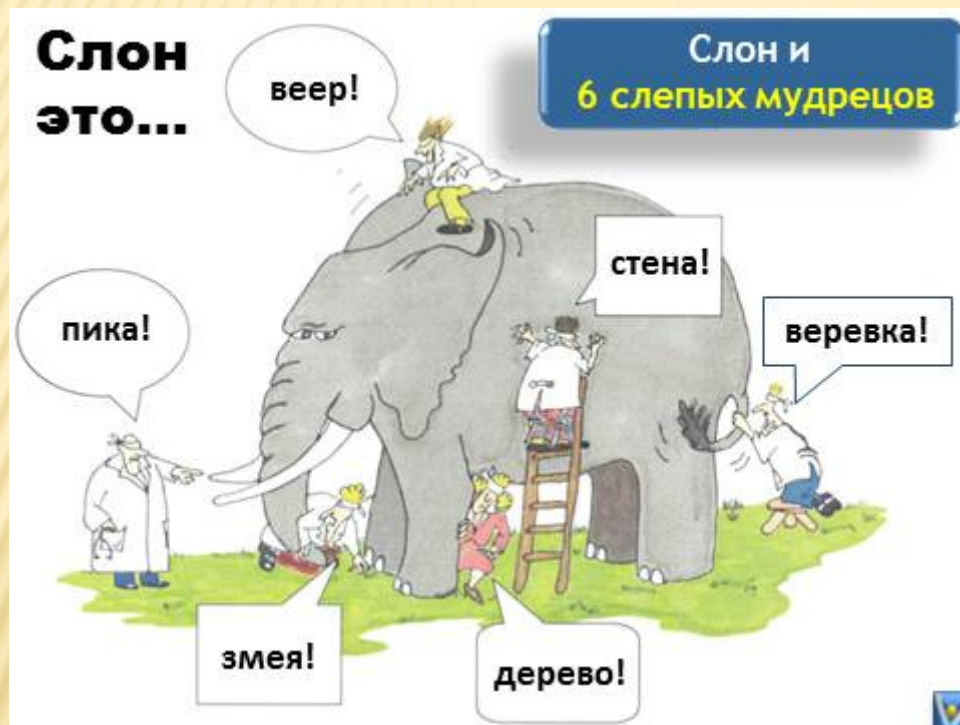


Диаграмма – это всего лишь инструмент всестороннего анализа магматических комплексов.



Целое не равно сумме простых вещей

При анализе данных, вынесенных на любую диаграмму, необходимо проявлять определенную осторожность связывая магматические комплексы с той или иной геодинамической обстановкой, поскольку геохимические особенности гранитных магм прежде всего отражают состав их источника. Более того, вулканические (как и интрузивные) фации являются производными сложного сочетания характеристик внутрикоровых расплавов, базитовых магм и осадочного субстрата.

Никакая диаграмма не может заменить всесторонний анализ данных по составу и изотопным свойствам магматических пород, а также их структурному положению и возрасту для того, чтобы понять их генезис и геодинамические условия формирования.