

Э.М. Спиридонов

Минералогенез  
магматитов.

**Гранитоиды**

# Силикатные магмы

нормальные = низко и умеренно щелочные  
с кислотными флюидами –

$H_2O$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $H_3BO_3$ ,  $H_3PO_4$ ....,

основная форма железа -  $Fe^{2+}$

Продукты их кристаллизации не содержат щелочные пироксены и амфиболы, фельдшпатоиды и иные щелочные минералы

## Гранитоиды

### Средние по составу горные породы 55-65 % $\text{SiO}_2$

Кварцевые габбро-диориты (кварц > 5 объём.%), биотит-роговообманковые кварцевые диориты и кварцевые сиенито-диориты (кварц. монцониты) (кварц 10-20 %), существенно биотит. кварц. диориты = тоналиты (кварц 15-25 %), гранодиориты (кварц 15-25 %, плаг : K-Na пшп >2), адамеллиты (кварц 15-25 %, плаг : K-Na пшп 1-2)

### Кремнекислые горные породы 65-75 % $\text{SiO}_2$

Гранодиориты (плагиаадамеллиты) (кварц 15-25 %, плаг : K-Na пшп >2), адамеллиты (кварца 15-25 %, плаг : K-Na пшп 1-2), граниты (кварц 25-35 %; плаг : K-Na пшп 0.5-2; би+рог.обм.+тмт.. 5-15 %), плагиграниты (кварц 25-45 %; плаг.: K-Na пшп > 2; биотит+ рог.обм. +тмт.. 5-15 %), лейкограниты (кварц 25-35 %; плаг : K-Na пшп 0.5-2; би+ рог.обм. +тмт.. 0-5 %), аляскиты (кварц 25-35 %; плаг : K-Na пшп < 0.5; би+тмт <1 %)

### Ультракремнекислые горные породы 75-80 % $\text{SiO}_2$

Лейкограниты, аляскиты

# Гранитоиды складчатых областей

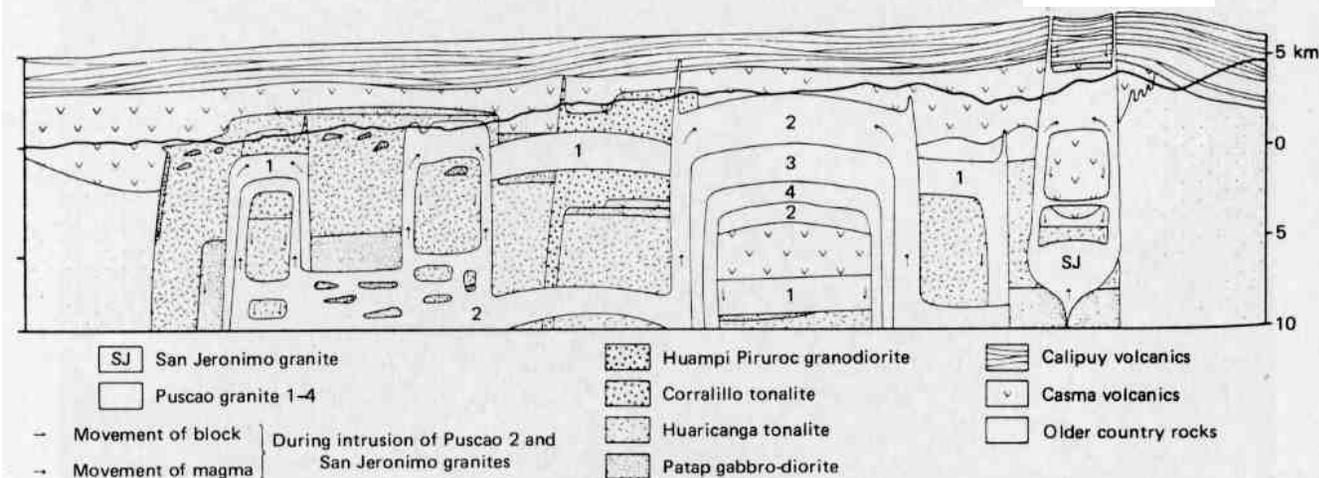
Гранитоиды широко развиты в складчатых областях эвгеосинклинального типа.

Становление офиолитовых формаций завершает внедрение плагиогранитоидов. Плагиогранитоиды завершают формирование многих более поздних габброидных магматических комплексов и в целом океанскую (раннегеосинклинальную) стадию развития складчатых областей. Часто это типичные трондьемиты, т.е. олигоклазовые и альбит-олигоклазовые плагиограниты, богатые натрием – 5-7 масс. %  $\text{Na}_2\text{O}$ . В целом, состав плагиоклаза плагиогранитов варьирует от Са лабрадора до альбит-олигоклаза. Чем более Са состав плагиоклаза, тем богаче кварцем плагиограниты.

Главную геосинклинальную = островодужную стадию развития складчатых областей завершает внедрение тоналитов - гранодиоритов или гранодиоритов - адамеллитов (гранодиоритовая формация). Внедрение гранодиоритов сопровождает и завершает процесс инверсионной складчатости (коллизии), процесс превращения геосинклинали в горно-складчатую (орогенную) область. Количество этих гранитоидов в ряде складчатых областей грандиозно – до половины и более объёма складчатого комплекса, нередко они наряду с небольшими и среднего размера интрузивами слагают и интрузивы батолитового типа площадью в тысячи  $\text{км}^2$  при вертикальной мощности от 2-4 км до 8-12, 20 и более км.

Следующий этап развития складчатых областей – орогенный, - обычно сопровождается массовым внедрением разнообразных гранитоидов. Их стандартная последовательность:

# Формы интрузивных тел гранитоидов



Береговой батолит  
Перуанских Анд -  
система многофазных  
тоналит-гранодиоритовых  
интрузивов. В целом,  
уплощённые тела  
мощностью от 1-3 до 8-12 и  
более км

Интрузивный контакт :  
граниты секут кварц,  
габбро-диориты.  
Акбеит,  
Северный Казахстан



**FIGURE 4-49** Coastal batholith of Peru and simplified cross section showing how, at high levels in the crust, the body consists of numerous small plutons which have been emplaced by repeated caldron subsidence into their own volcanic ejecta. See Prob. 4-10. [After Myers (1975); reprinted by permission of the Geological Society of America.]

# Гранитоиды складчатых областей

монцониты – сиенито-диориты – граносиениты – граниты (монцонитовая формация) → стандартные граниты (гранитная формация) → лейкограниты – аляскиты – литийфтористые граниты (аляскитовая формация) → монцониты – щелочные граниты (щёлочно-гранитная формация). В ряде складчатых областей интрузивы монцонитовой формации образуют небольшие трещинные тела, в других – интрузивы батолитового типа. В многих складчатых областях интрузивы гранитной формации представлены относительно небольшими кольцевыми (цилиндрообразными) телами, в некоторых складчатых областях миогеосинклинального типа развиты гранитные батолиты. Щёлочно-гранитная формация формируется обычно уже в посторогенный этап.

## Петро-геохимические и минеральные типы гранитоидов.

Плагиигранитоиды, магматиты гранодиоритовой и монцонитовой формаций выделены как гранитоиды I – типа (т.е. Igneous, «чисто магматические»); они формируются обычно при повышенной  $f O_2$ , - принадлежат так называемой магнетитовой серии, содержат умеренно железистый биотит, гранитоиды и послегранитоидные образования бедны фтором, низко радиоактивные, бедны Li, Rb, Cs, Nb, Ta, Be, Sn. Эти гранитоиды содержат заметные количества титаномагнетита, апатита, ортита (алланита); при общей низкой щёлочности титанита (сфена) мало; при повышенной общей щёлочности много сфена. Монцонитовые гранитоиды обогащены Ba, Sr, содержат ангидрит.

Граниты и лейкограниты гранитной и аляскитовой формаций выделены как гранитоиды S – типа («sedimentary», «палингенные»); они формируются при пониженной  $f O_2$ , - принадлежат так называемой

# Гранитоиды складчатых областей

ильменитовой серии, содержат железистый биотит, монацит, гранитоиды и послегранитоидные образования богаты фтором, они радиоактивные и высоко радиоактивные, обогащены Li, Rb, Cs, Nb, Ta, Be, Sn. Нередко эти гранитоиды высокоглинозёмистые (плюмазитовые), двуслюдяные, содержат магматические мусковит, гранаты альмандин-спессартинового ряда, кордиерит, андалузит или силлиманит, а изредка топаз и Li-Fe слюды (циннвальдит...) ...

Щелочные граниты выделены как А – тип (alkaline, agpaitic, anorogenic, anhydrous). Они обогащены F, Zr, Nb, Y, U, Th, Be, Zn...

## Гранитоиды активизированных платформ

В пределах активизированных платформ гранитоиды развиты в сравнительно скромных масштабах. В основном это формация гранитов-рапакиви (граносиениты-рапакиви – граниты-рапакиви – лейкограниты) и формация щелочных гранитов. Те и другие содержат высоко железистые и обогащённые марганцем биотиты, амфиболы, пироксены (нередко и фаялит), обогащены фтором и фторофильными редкими элементами - Sn, Nb, Be, Li..., сопровождаются редкометальным оруденением.

Как правило, общий тренд эволюции гранитоидных магматических серий – гомодромный, с нарастанием кремнекислотности.

# Гранитоиды складчатых областей

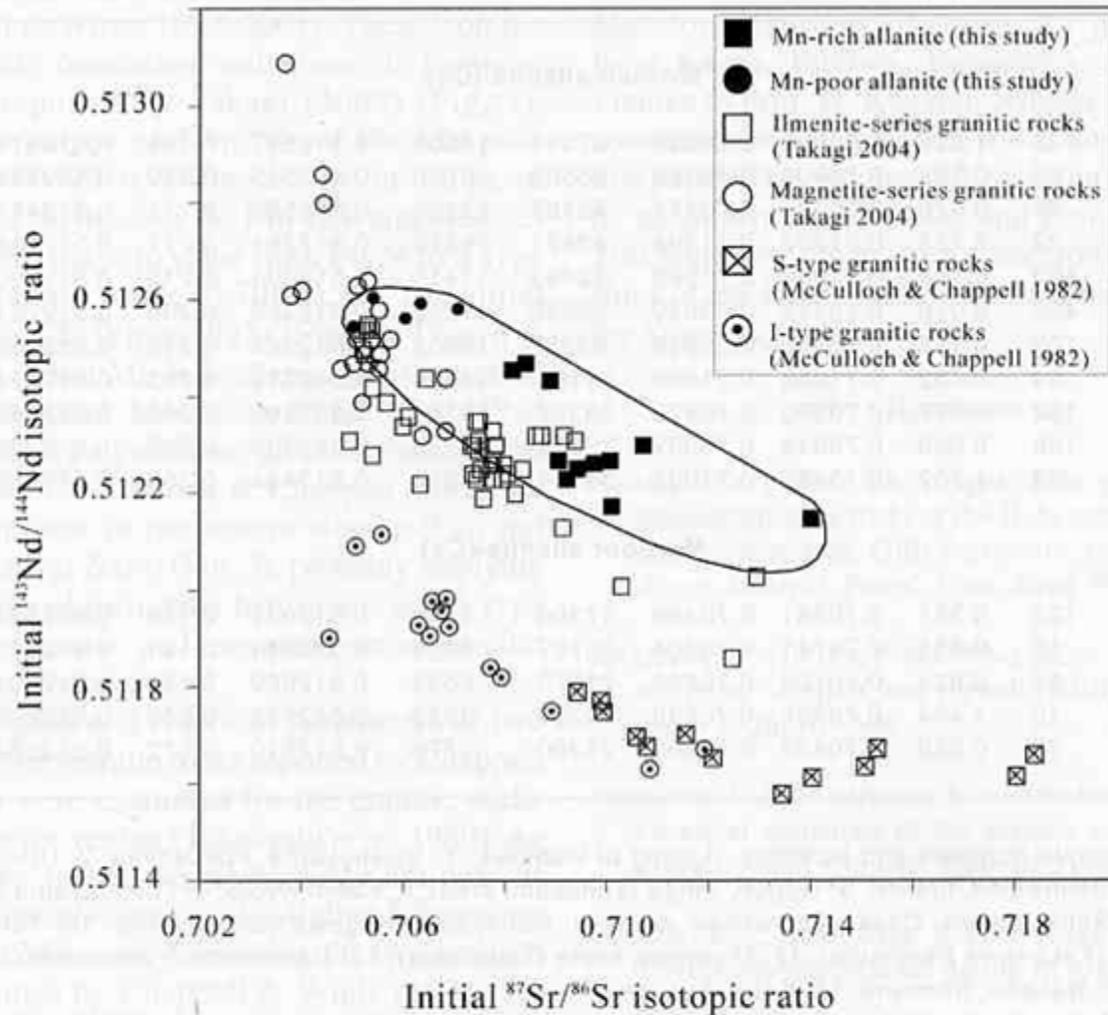


FIG. 3. Relationship between initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotopic ratios and initial  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  isotopic ratios of the present Mn-rich and Mn-poor allanite-(Ce), Japanese granitic rocks (Takagi 2004), and granitic rocks from Lachlan Fold Belt (McCulloch & Chappell 1982). Data are from Table 2 in the present study, from Appendix A in Takagi (2004), and from Table 2 in McCulloch & Chappell (1982). Initial  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  values in McCulloch & Chappell (1982) were recalculated with  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  equal to 1.14185, which corresponds to a  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  value of 0.7219.

По изотопным данным, S-гранитоиды очевидно – палингенные, продукты плавления богатого радиогенным стронцием материала земной коры. I – гранитоиды, вероятно, производные нижней части земной коры



# Гранитоиды складчатых областей

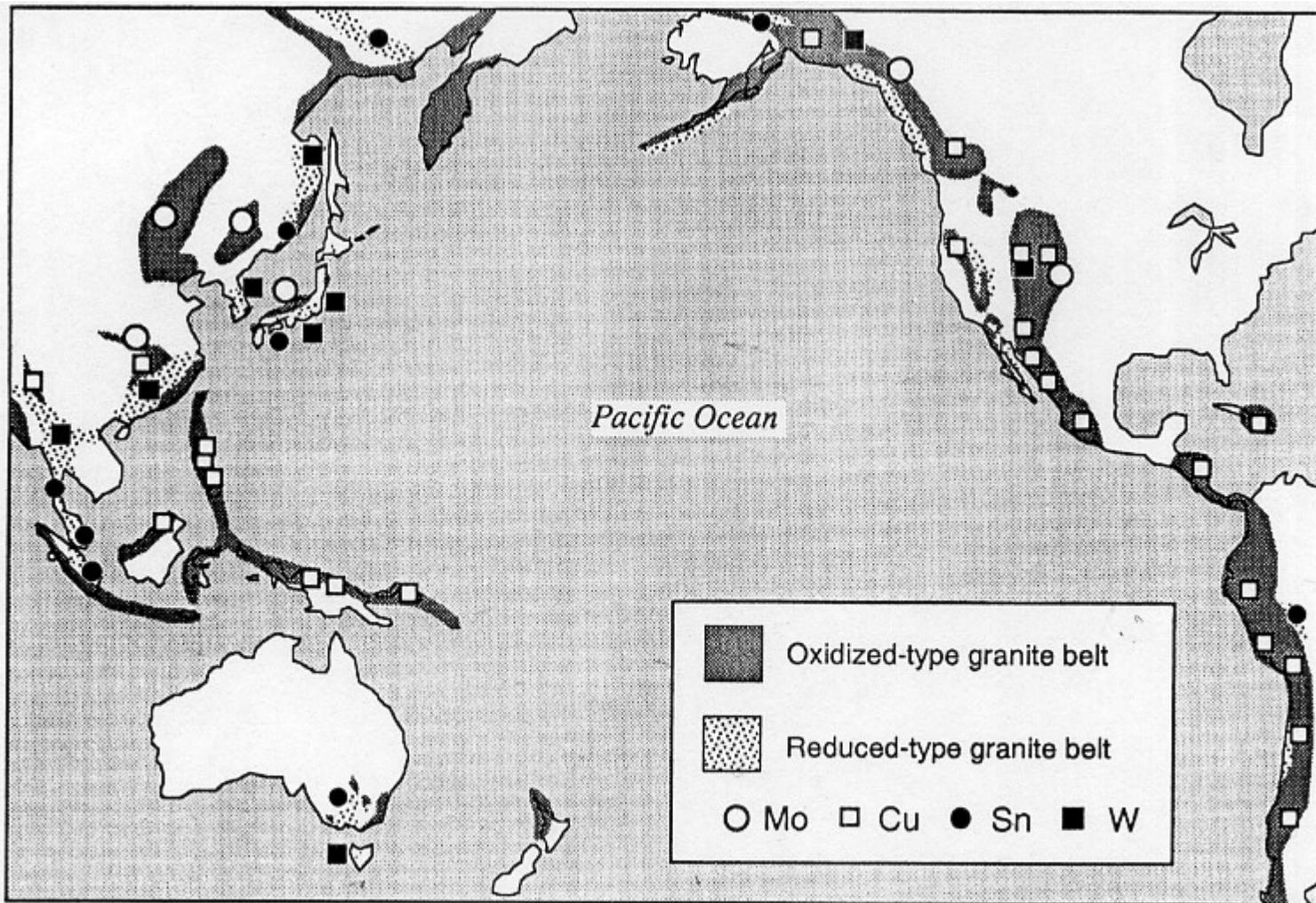
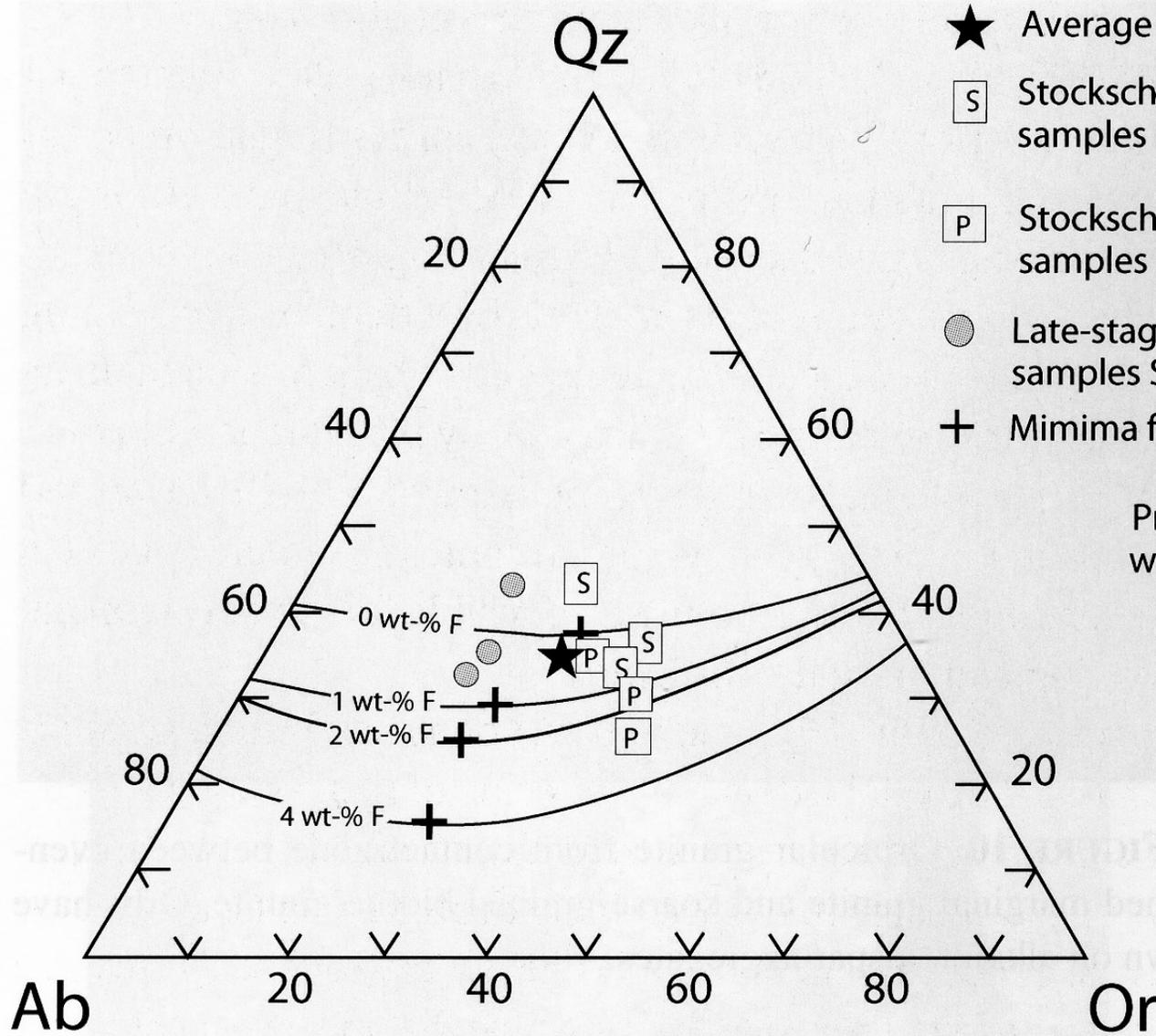


FIG. 1. Distribution of oxidized- and reduced-type (magnetite- and ilmenite series) granite belts and metallogenic provinces in the circum-Pacific region. Map is based on the data from Ishihara (1984), Ague and Brimhall (1988), Tainosho et al. (1988), Gastil et al. (1990), and Blevin and Chappell (1995).

Тихоокеанское кольцо складчатых областей: распределение гранитоидов I - типа с Cu и Mo рудами и гранитоидов S - типа с Sn - W рудами

# Гранитоиды



- ★ Average of main granites of the stock
- S Stockscheider (layered aplite) samples FH-130, FH-114a, FH-114b
- P Stockscheider (miarolitic druse) samples SF-088, SF-041, SF-035
- Late-stage aplite dike samples SF-071, SF-057, SF-083
- + Minima for 0, 1, 2 and 4 wt-% F

Pressure = 1 Kb  
water saturated

Изменения состава гранитных минимумов с ростом фтористости расплавов

# Интрузивные образования

Интрузивные тела = интрузивные массивы = интрузивы = плутоны формируются на глубинах от 1 км до 10-30 км и >. Обычно выделяют интрузивы гипабиссальной фации – глубины становления 1-3 км (гранитоиды таких плутонов нередко миаролитовые, гранитных пегматитов в них нет); интрузивы мезоабиссальной фации – глубины становления 3-5-7 (-10) км (гранитоиды таких плутонов массивные, постоянно содержат то или иное количество гранитных пегматитов, как и гипабиссальные резко отграничены от пород рамы, в которых развиты зональные и широкие ореолы контактового метаморфизма); интрузивы абиссальной фации – глубины становления > 7-10 км и до 30 и более (у глубинных гранитоидных интрузивов нередко пегматоидные структуры, в их контактовых ореолах часто развиты гранито-гнейсы и мигматиты, иногда трудно провести линию контакта интрузивных пород и пород рамы)

# Интрузивные образования

Даже малые по размеру интрузивы гипабиссальной фации окружены ореолами контактового метаморфизма шириной не менее нескольких метров, обычно несколько десятков или сотен м, поскольку, как правило, это не отшнурованные тела, а выступы более крупных интрузивных масс, залегающих глубже. Вокруг более крупных и более глубоких интрузивов развиты ореолы контактового метаморфизма шириной до нескольких км. Длительность остывания обычных по размеру тел гранитоидов около 0.5 млн. лет, наиболее крупных тел гранитоидов менее 3 млн. лет.

Совокупности интрузивных образований одной геолого-структурной зоны, связанные единством возраста, едиными петро-геохимическими особенностями, однотипными сопряжёнными контактово-метаморфическими и рудными образованиями, выделяют как интрузивные комплексы (формации). Например, комплекс познепротерозойских гранитов-рапакиви Северного Приладожья (район Питкяранты): тела гранитов-рапакиви 1 и 2 фазы, лейкогранитов 3 фазы, жильные граниты, гранит-пегматиты, магнезиальные и известковые скарны, цвиттеры и грейзены с бериллий-медно-оловяной минерализацией; все они с возрастом около 1100 млн. лет. Интрузивы могут быть одно- и многофазными. Интрузивная фаза отвечает подаче магматического материала из глубоких или промежуточных очагов.

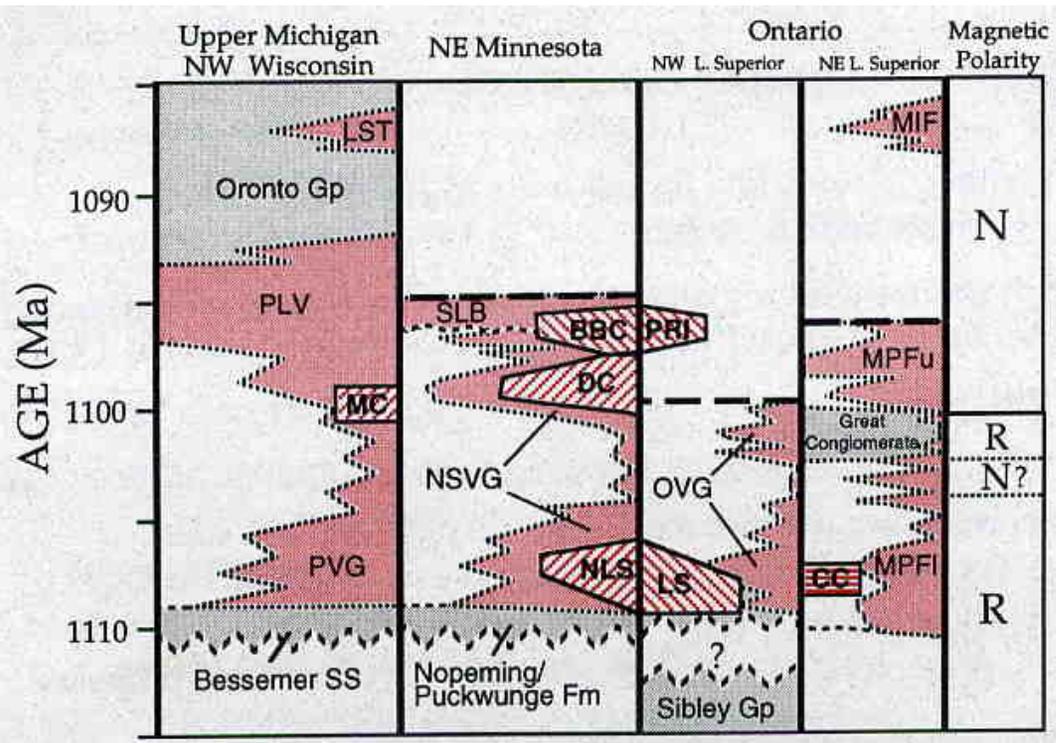
# Интрузивные образования

В интрузивных телах каждой фазы можно выделить центральную (ядерную) и эндоконтактовую фации, дополнительные интрузивы (перемещённые к кровле массива выжимки – дифференциаты центральной фации), жильные образования (в гранитоидных массивах это жильные граниты, аплиты, пегматиты, а также высоко температурные метасоматиты – магнезиальные и известковые скарны, кварц-щёлочно-полевошпатовые = апограниты, цвиттеры, грейзены, кварц-мусковитовые и кварц-турмалиновые, кварцевые жилы. В том числе с редкометальным оруденением). Эти жильные образования В.С. Коптев-Дворников рассматривал как образования 1 этапа.

Становление интрузивных комплексов завершают дайки и малые тела магматитов, внедрённые из промежуточных или глубинных очагов в уже остывшие интрузивные массивы (в гранитоидных комплексах это дайки гранитоид-порфиров с закалёнными эндоконтактами, а также дайки лапрофиров, петрологически гранитоидам чуждые). Их сопровождают средне- и низкотемпературные метасоматиты – калиевые пропилиты с Mo-Si-порфировым оруденением, натровые пропилиты, гумбеиты с W и березиты-листвениты с Au оруденением. В.С. Коптев-Дворников выделял их как образования 2 этапа. Рассматриваемые дайки точнее именовать - дайки глубинного происхождения.

Известны и вулканоплутонические комплексы, особо характерные для орогенной стадии развития складчатых областей. Например, гранит-риолитовые или монзонит-латитовые.

# Длительность формирования интрузивных комплексов

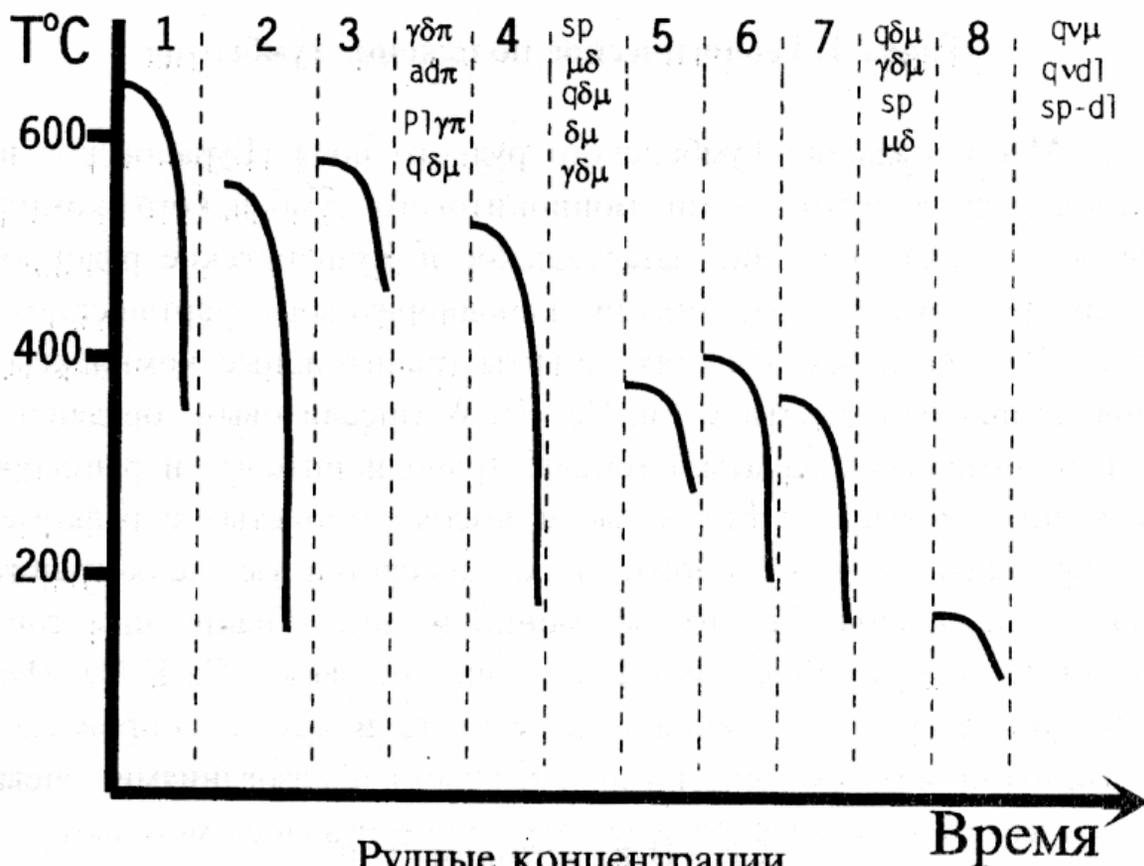


**Chronostratigraphy of Middle Proterozoic rocks of the Lake Superior area**  
 Increased amplitude to the left denotes greater volume and rate of eruption.

<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color: #e91e63; border: 1px solid black;"></span> VOLCANIC ROCKS	<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, #e91e63 2px, #e91e63 4px); border: 1px solid black;"></span> INTRUSIVE ROCKS
PVG - Powdermill Volcanic Group	MC - Mellen Complex
PLV - Portage Lake Volcanics	NLS - Nathan's Layered Series
LST - Lake Shore Traps	DC - Duluth Complex
NSVG - North Shore Volcanic Group	BBC - Beaver Bay Complex
SLB - Schroeder-Lutsen basalts	LS - Logan Sills
OVG - Osler Volcanic Group	PRI - Pigeon River Intrusions
MPPFu - Maminse Point Fm. (upper and lower)	CC - Coldwell Complex
MIF - Michipicoten Island Fm.	<span style="display:inline-block; width:15px; height:15px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black;"></span> SEDIMENTARY ROCKS

Длительность формирования интрузивных комплексов, даже очень сложных, - менее 3 млн. лет

# Последовательность формирования плутогенных гидротермалитов и даек глубинного происхождения тоналит-гранодиоритовых комплексов (Спиридонов, 1995)



- 1 – Mg скарны с гидроксилфлогопитовым и Fe (Cu) оруденением;
- 2 – Ca скарны с Fe (Co-Cu-W) оруденением;
- 3 – кварц-турмалиновые и кварц-серицитовые метасоматиты с турмалино оруденением;
- 4 – K пропилиты с Mo-Cu-порфировым оруденением;
- 5 – Na пропилиты;
- 6 – гумбеиты с шеелитовым оруденением;
- 7 – березиты и листовениты с золотым оруденением;
- 8 – аргиллизиты

1-3 – образования первого этапа  
4-8 – образования второго этапа

# Гранитоиды. Оливин. Пироксены

## Оливин

Железистый оливин – фаялит вполне равновесен с кварцем. Фаялит  $\text{Fa}_{94-98}$  с 1-2 % Mn и следами Ni – характерный минерал гранитов-рапакиви.

## Ромбические пироксены

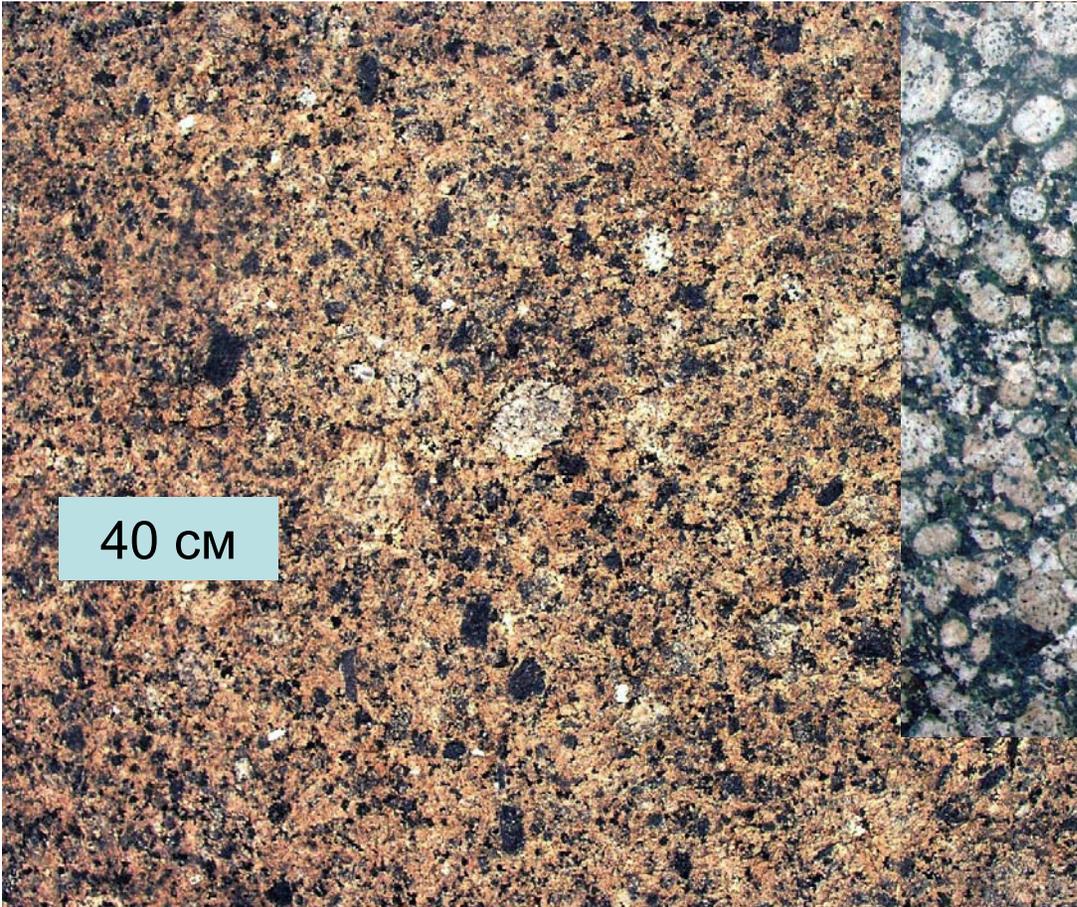
Довольно широко распространены в ядрах кристаллов магматических амфиболов – от плагиогранитов до гранитов-рапакиви, но не в лейкогранитах. В кварцевых габбро-норит-диоритах, тоналитах и гранодиоритах – это обычно железистый бронзит и гиперстен. В гранитах-рапакиви – это феррогиперстен и зулит с 0.5-1.5 % Mn.

## Моноклинные пироксены

Широко распространены в ядрах кристаллов магматических амфиболов – от плагиогранитов до гранитов-рапакиви, но не в лейкогранитах. В кварцевых габбро-диоритах, тоналитах и гранодиоритах – это обычный авгит, бедный Al, Ti, Mn. В гранитах-рапакиви – это ферроавгит до гебенбергита с 0.5 % Mn. Пижонит в гранитоидах не известен.

# Гранитоиды. Плагиоклазы

Магматические Ca плагиоклазы содержат в твёрдом растворе до 1 масс. % FeO и 0.n % TiO<sub>2</sub>. При отжиге за счёт этих элементов возникают тончайшие пластинки распада ильменита (гемоильменита), которые окрашивают плагиоклазы от андезина до лабрадора в чёрный цвет.



Зеленоватый олигоклаз  
вокруг овоидов ортоклаза

Чёрные вкрапленники андезина - Na лабрадора в гранитах-рапакиви. Выборгский плутон, Финский залив

# Гранитоиды. Амфиболы

Ранние магматические амфиболы гранитоидов от кварцевых габбро-диоритов до стандартных гранитов – паргасит с 1-3%  $TiO_2$ . Более поздние – гастингсит, эденит, ферроэденит с 1-2 %  $TiO_2$ . Содержания фтора от следов до 0.7 % (в гранитах-рапакиви), содержания хлора обычно менее 0.5 %. Послемагматические амфиболы – магнезиогорнблендит, феррогорнблендит, до актинолита, бедные алюминием, титаном, натрием. Содержание алюминия в магматических амфиболах ( в ассоциации с биотитом, титаномагнетитом, ильменитом, кварцем и К-На полевым шпатом) – хороший геобарометр (примерно от 0.5 до 8 кбар):

5 масс. %  $Al_2O_3$  - ~ 1 kb,

8.5 масс. %  $Al_2O_3$  - ~ 3 kb,

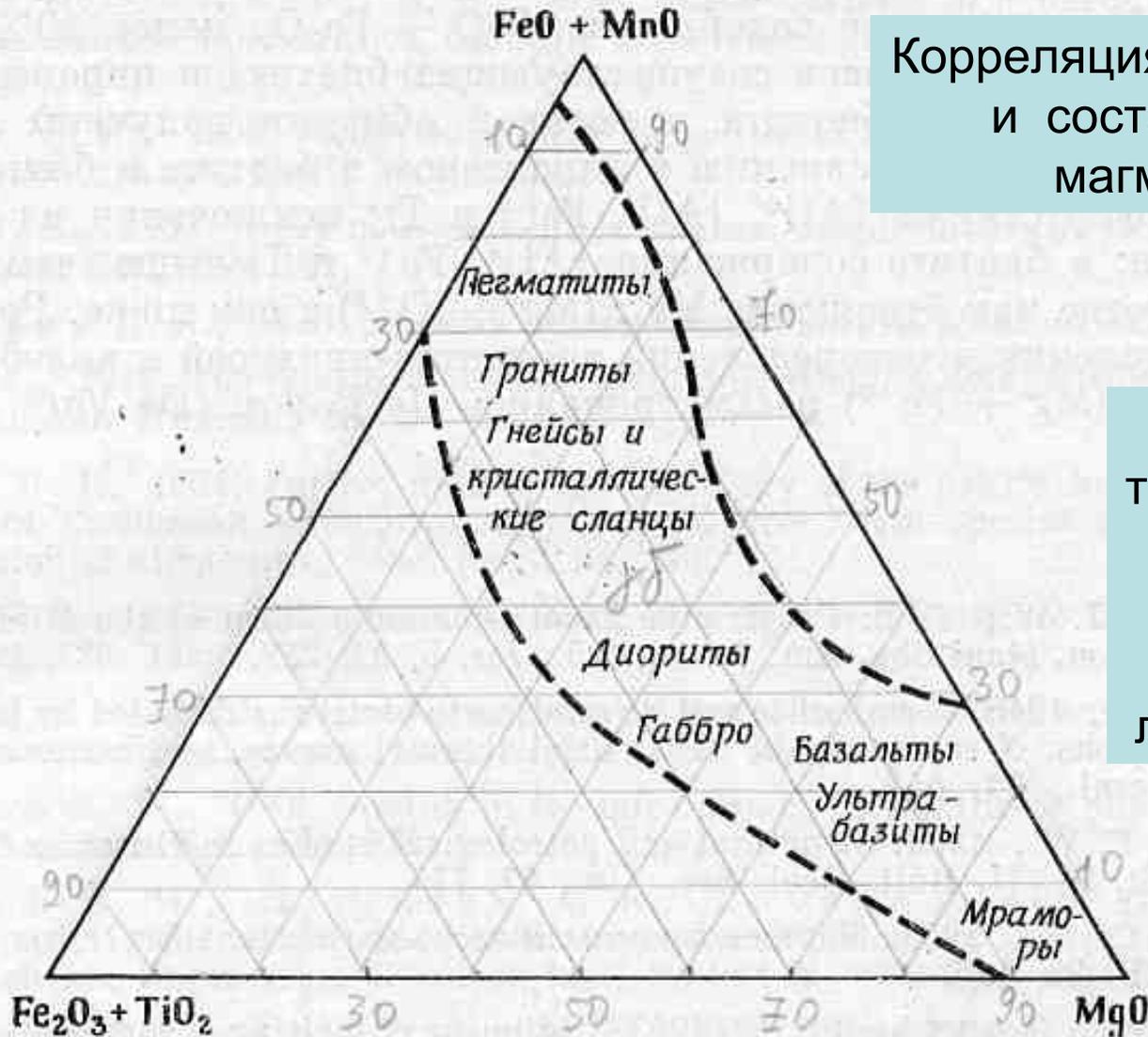
12 масс. %  $Al_2O_3$  - ~ 5 kb,

15 масс. %  $Al_2O_3$  - ~ 7 kb.

Последняя оценка типична для глубинных гранитоидов повышенной основности, в которых не редок магматический эпидот (с или без ядер ортита). Магматические амфиболы – одни из основных минералов-носителей редкоземельных элементов в амфибол-содержащих гранитоидах.

# Магматические тёмные слюды

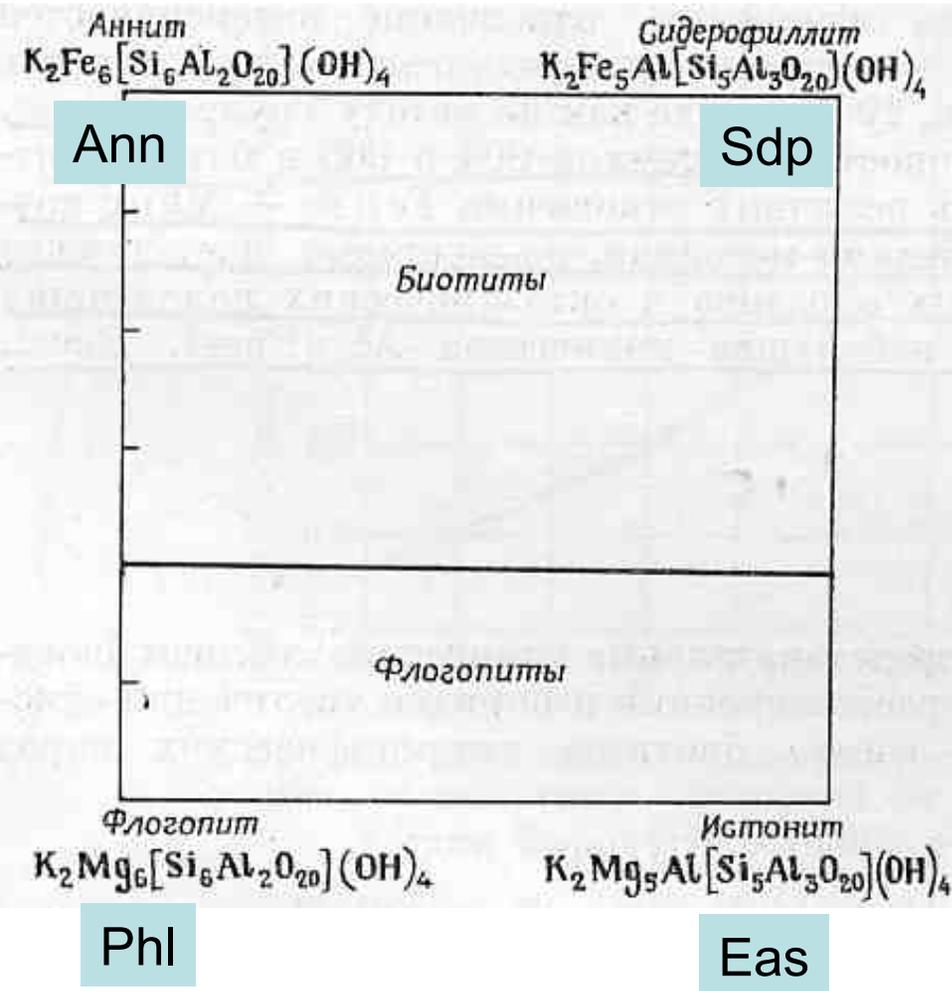
Корреляция состава тёмных слюд и состава содержащих их магматических пород



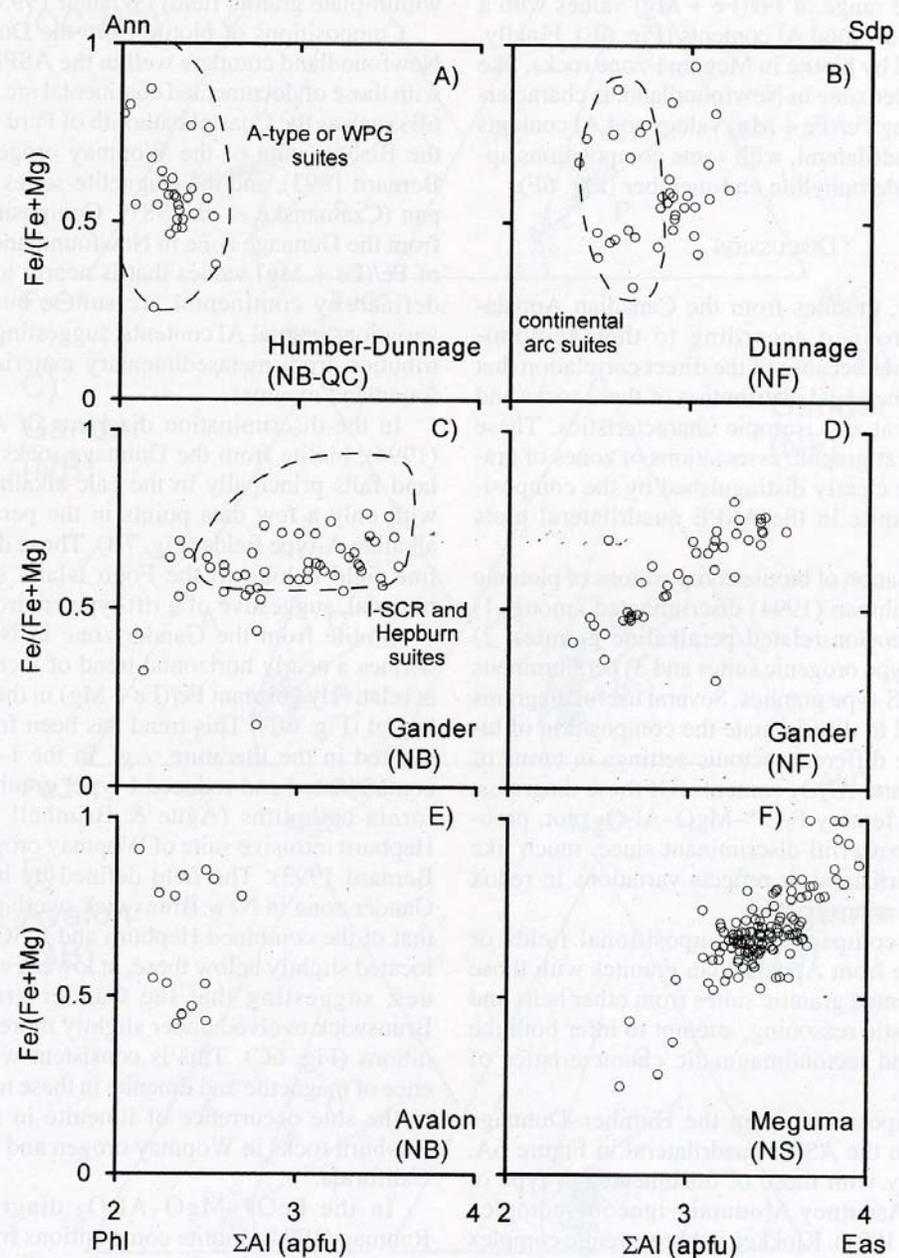
Биотит  
тоналитов-гранодиоритов  
содержит в среднем  
около 0.03% F,  
гранитов - 0.75 % F,  
лейкогранитов - 2.2 % F

Ф И Г. 21. Колебания химического состава флогопитов и биотитов в зависимости от типа материнских пород [построено по данным диаграмм Хейнриха (Heinrich, 1946)] (Engel, Engel, 1960).

# Магматические тёмные слюды



Поля состава биотита - флогопита



Состав биотита гранитов Канадских Кордильер

# Магматические тёмные слюды

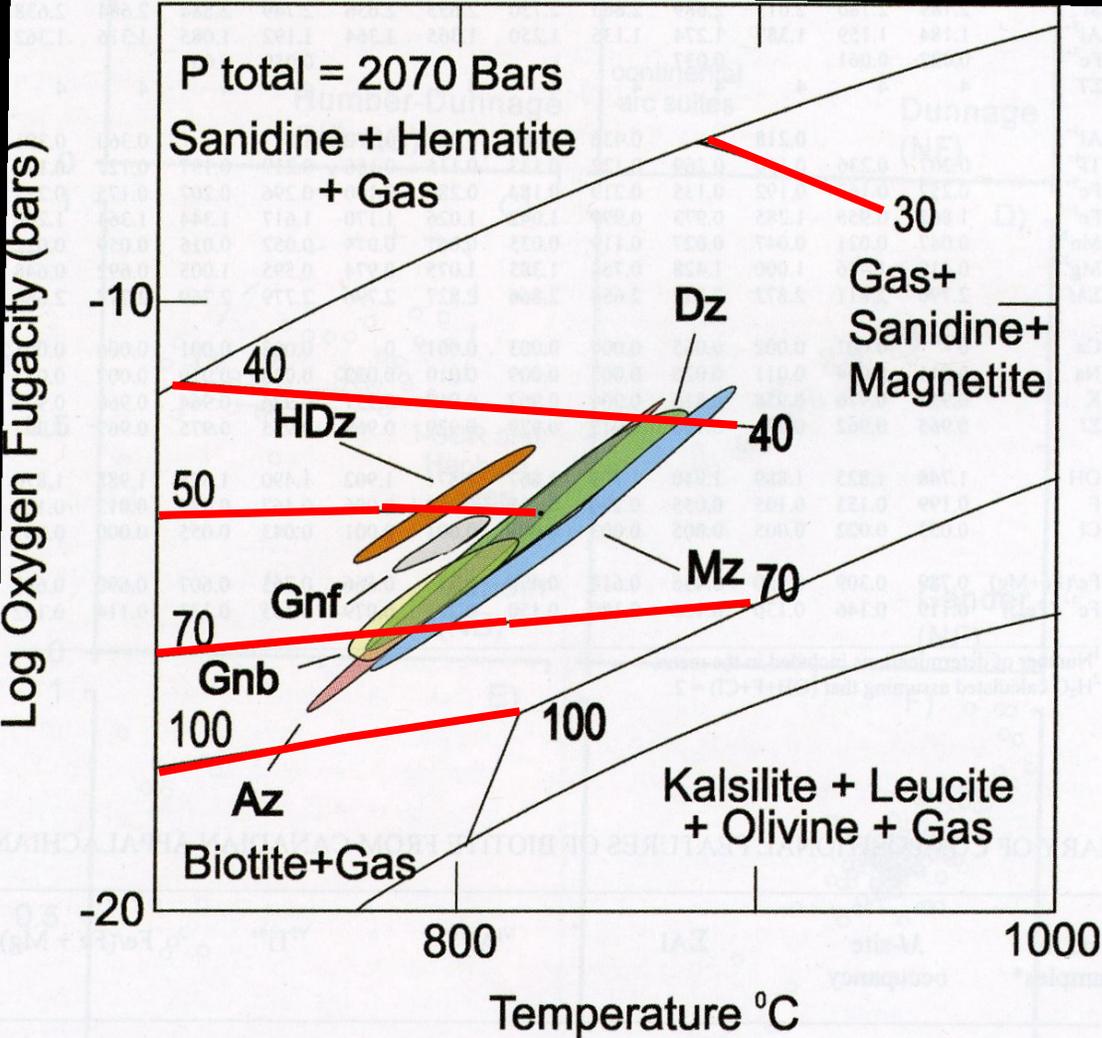


FIG. 5.  $\log f(\text{O}_2)$  - T diagram for the biotite + sanidine + magnetite + gas equilibrium at  $P_{\text{total}} = 2070$  bars (Wones & Eugster 1965). Illustrated are  $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$  isopleths. Labeled fields represent the range of oxygen fugacity for samples from the different tectonic zones in the Canadian Appalachians, assuming an equilibrium temperature of 750–900°C. Symbols as follows: Az: Avalon zone, Gnb: Gander zone, New Brunswick, Gnf: Gander zone, Newfoundland, HDz: Humber-Dunnage zone, New Brunswick and Québec, Dz: Dunnage zone, Newfoundland, Mz: Meguma zone. This diagram represents the central portion of the original diagram of Wones & Eugster (their Fig. 4), enlarged to better illustrate the fields defined by the biotite from the different tectonic zones.

Поля составов биотита гранитоидов Канадских Кордильер. Красные линии – железистость тёмных слюд. Диаграмма даёт возможность оценить температуру кристаллизации биотита.

Для канадских биотитов – это ~ 900 – 750° C

# Магматические тёмные слюды

Содержание титана в биотите – флогопите - геотермометр

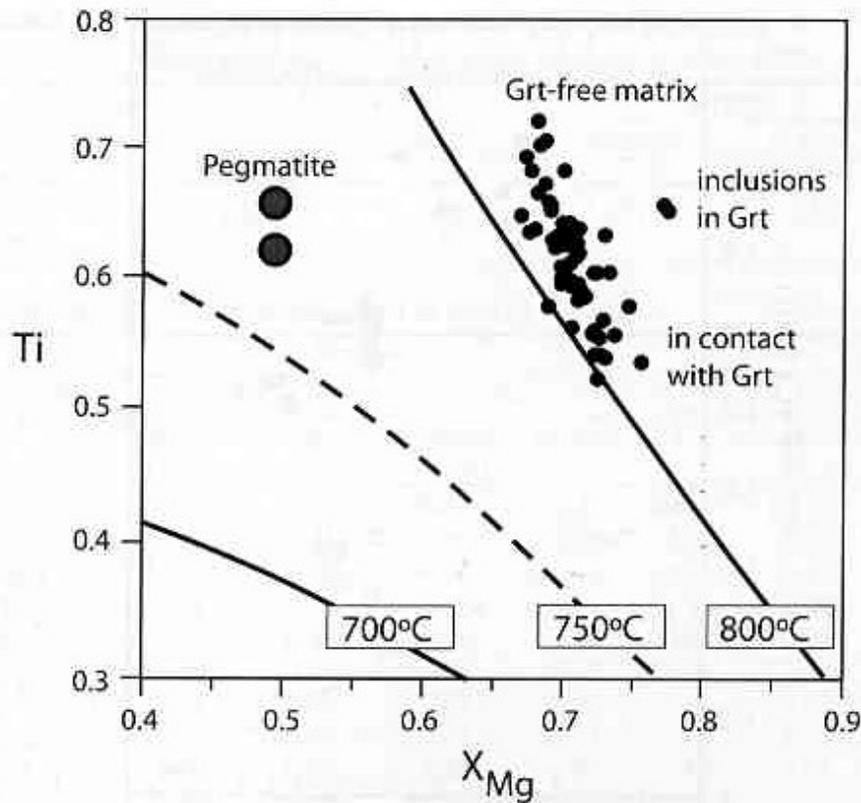
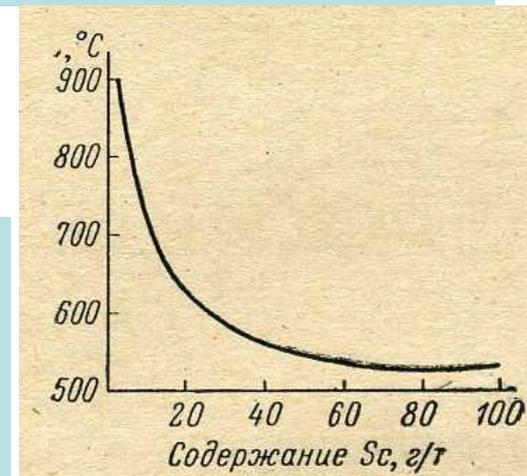


FIGURE 10. Ti vs.  $X_{Mg}$  plot for the biotites, with isotherms from Henry et al. (2005). Ti atoms are twice the values in Table 3, for comparison with the thermometer of Henry et al. (2005).

Обычно магматические биотиты гранитоидов содержат более 2.5 и до 6, чаще 3-4 масс. %  $TiO_2$ . Поэтому магматические биотиты густо окрашены. При послемагматическом отжиге нередко титан покидает биотит, - биотит бледнеет, формируются ильменит или титанит.

Содержание скандия в биотите – геотермометр Офтедаля



# Магматические тёмные слюды

Высокотемпературные биотиты и флогопиты представлены политипами 2M<sub>1</sub> и менее 3T, более низкотемпературные – политипом 1 M.

Общий тренд состава тёмных слюд :  $Mg^{2+} \rightarrow Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} \rightarrow Zn^{2+}$

Содержание цинка в обычном биотите гранитоидов около 0.1% = 1000 г/т.

Индикаторы степени дифференциации :

железистость, Mn, Zn, F, K/Rb, Rb/Ba, K/Cs, Tl...

K/Rb – индикатор геотектонической позиции гранитоидов и их рудоносности: в биотитах океанских плагиогранитоидов K/Rb более 500 и до 1000, в обычных гранитоидах 100-350, в редкометальных гранитоидах и пегматитах менее 100 и до 10.

F – индикатор рудоносности, биотиты гранитоидов с редкометальным оруденением содержат 2-6 масс. % фтора и менее 0.3 масс. % хлора.

Li-F-слюды – образования редкометальных гранитов и пегматитов.

Cl – биотиты, содержащие 0.1 масс. % хлора и более и менее 1.5 % F, характерны для гранитоидов с магнетитовым и медным оруденением.

Биотит оловоносных гранитоидов обычно содержит более 100 г/т Sn.

Особняком стоят биотиты гранитов-рапакиви, которые крайне железисты f = 71-99, богаты фтором, но содержат до 1.2 масс. % хлора, до 0.4 % Ba.

# Гранитоиды. Кварц

Магматический кварц гранитоидов всегда непрозрачный содовый, т.к. претерпел фазовый переход. При высоких температурах кварц растворяет довольно много алюминия и титана. Будучи облучены алюминиевые центры, обусловили дымчатую до чёрной окраску кварца. Поэтому цвет кварца – индикатор степени радиоактивности гранитоидов.

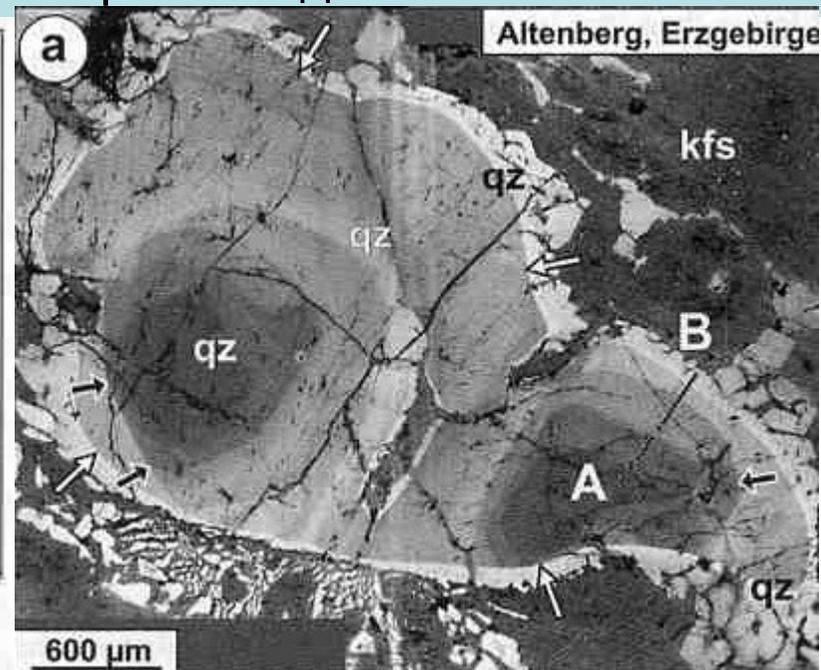
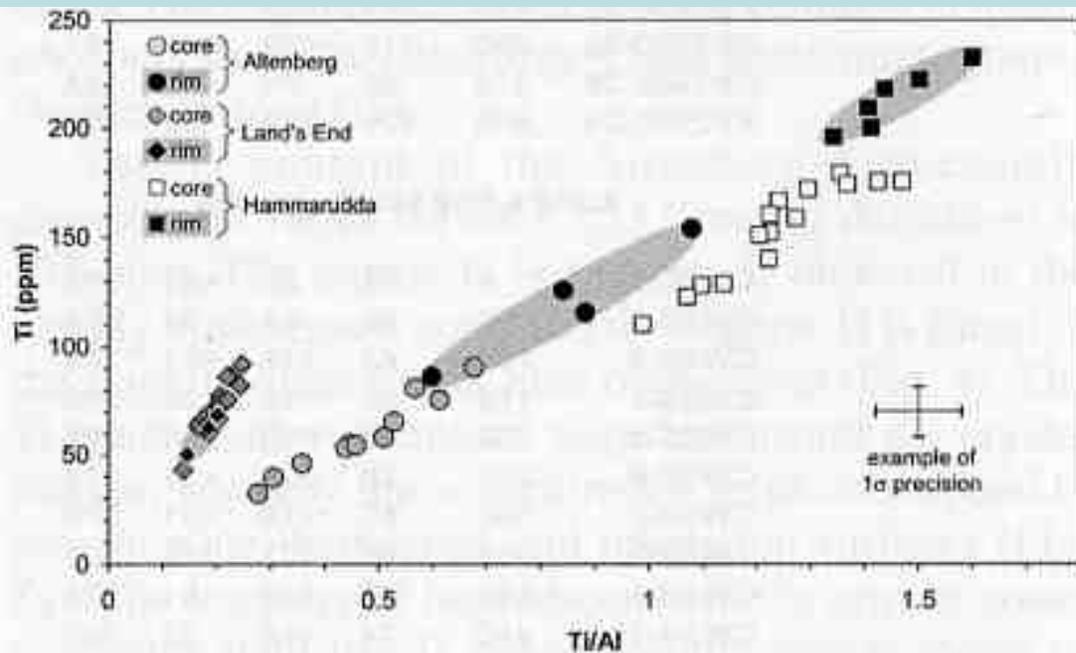


FIG. 9. Ti/Al versus Ti diagram for quartz phenocrysts associated with rapakivi feldspars. Concentrations were determined with an electron microprobe. Grey areas enveloping black symbols indicate the composition of the marginal growth-zone.

Зональность  
вкрапленников кварца  
в порфиридных гранитах  
Рудных Гор.  
Катодолюминесценция

# Гранитоиды. Кварц

ВысокоТ магматический кварц гранитоидов макроскопически нередко голубоватый, т.к. содержит тонкие волокна распада рутила

Юг Балтийского щита



7x5 см



Чарнокитовые граниты.  
Антарктида

# Гранитоиды. Титаномагнетит - ильменит

Титаномагнетит - один из наиболее распространённых акцессорных минералов гранитоидов. В гранитоидах повышенной основности главная масса титаномагнетита образуется при замещении ромбо- и клинопироксенов паргаситом, гастингситом и эденитом; следующая существенная порция титаномагнетита образуется при замещении магматических амфиболов биотитом. Обычно титаномагнетит гранитоидов содержит 7-12, изредка до 20 масс. %  $\text{TiO}_2$ , т.е. около 15-30 % и до 55 % минала ульвошпинели. Практически постоянно совместно с титаномагнетом кристаллизуется ильменит, что позволяет оценить температуру их совместной кристаллизации и фугитивность кислорода. Титаномагнетитовый твёрдый раствор в гранитоидах содержит не много магния и алюминия, поэтому в структурах окислительного распада – отжига титаномагнетита мало телец шпинели, это решётка ильменита в матрице магнетита. Титаномагнетит гранитоидов относительно беден марганцем и цинком, в отличие от ильменита. Акцессорный ильменит (гемоильменит до ильменогематита) гранитоидов в гранитоидах повышенной основности содержит первые %% марганца, в стандартных гранитах до 10-15 масс. % Mn. В лейкогранитах и аляскитах наряду с богатым марганцем и цинком ильменитом развиты железистый и цинкистый пирофанит  $(\text{Mn,Fe,Zn})\text{TiO}_3$  и экандрюссит  $(\text{Zn,Mn,Fe})\text{TiO}_3$ .

# Титаномагнетит – гематит-ильменитовый термометр

$$k_D = \frac{x_{ульво}}{(1-x_{ульво}) \cdot (1-x_{ильм})} \cdot \frac{x_{ильм}}{x_{ульво} \cdot x_{гем} / x_{мт} \cdot x_{ильм}}$$

$$\ln k_D = -8155/T^\circ K + 4.59$$

$$\ln a_{O_2} = \ln \left[ \frac{(x_{мт}^2 \cdot x_{ильм}^6 / x_{ульво}^6) \cdot (x_{ульво} \cdot x_{гем} / x_{мт} \cdot x_{ильм})^{10.703}}{1} \right] - 4.94$$

Powell & Powell, 1977

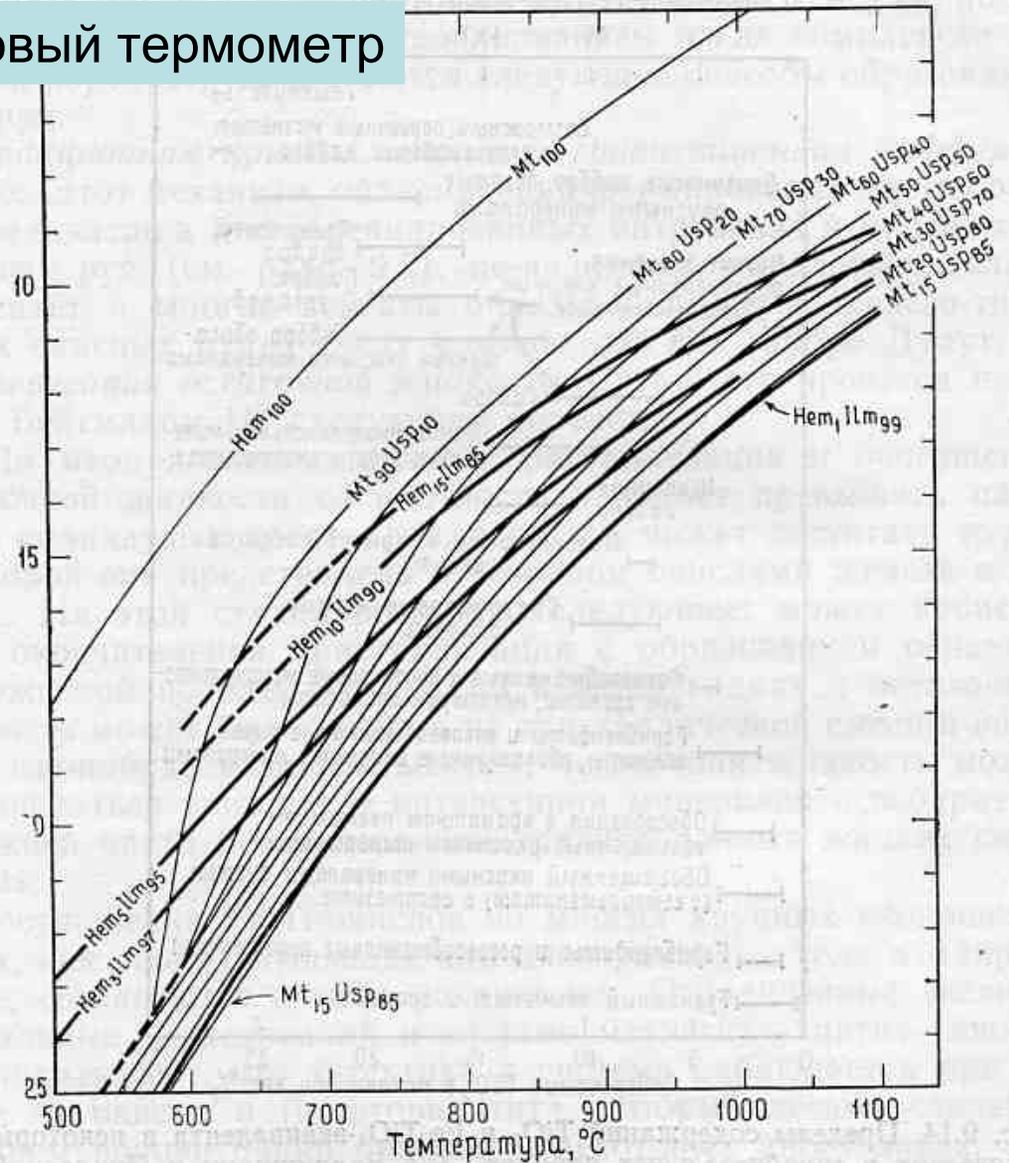
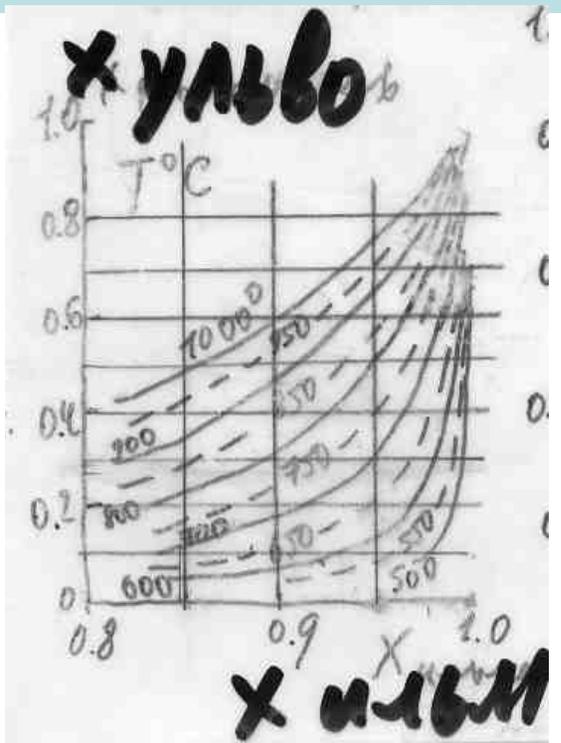
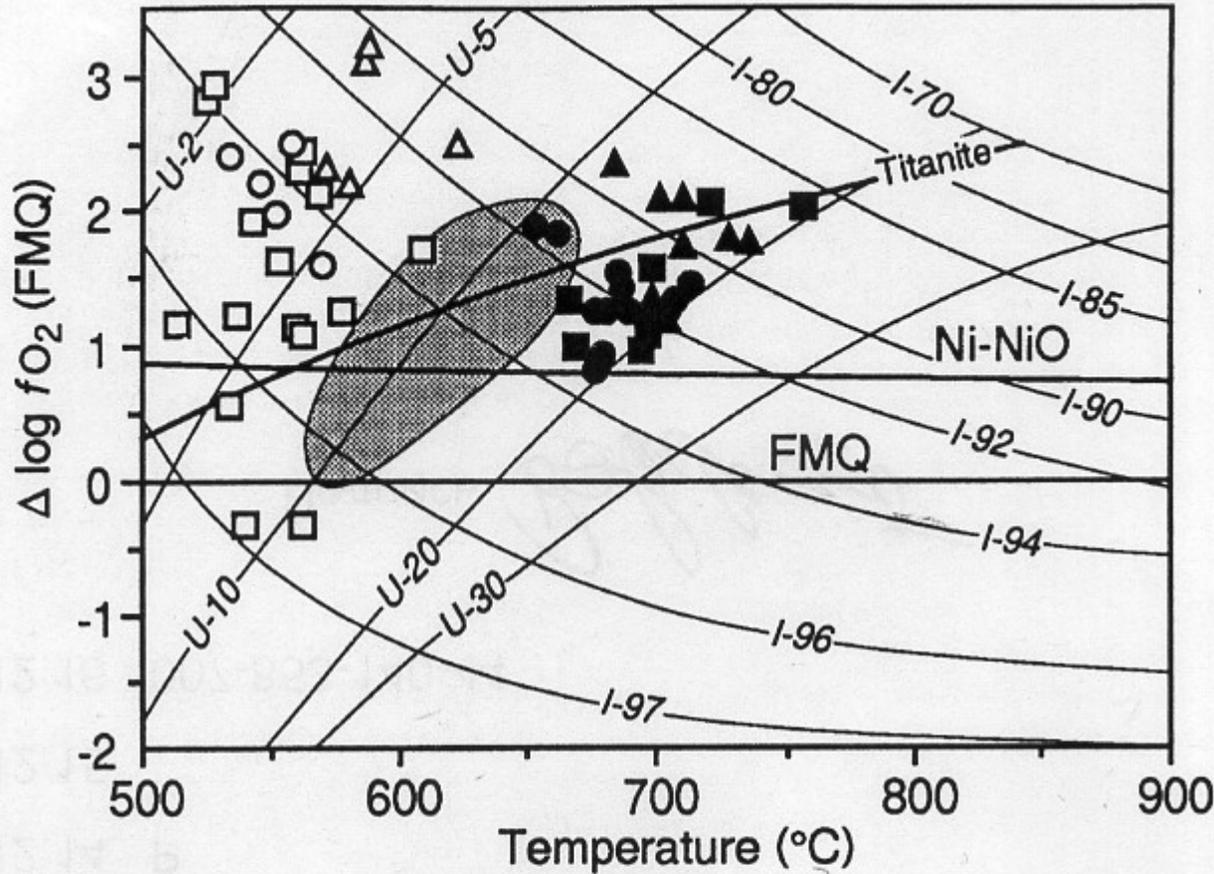


Рис. 9.13. Проекция на плоскость  $f_{O_2}-T$  сопряженных поверхностей в  $f_{O_2}-T-X$ -пространстве. Проекция параллельна двум осям состава магнетит — ульвошпинель<sub>55</sub> и гематит — ильменит<sub>55</sub> таким образом, что пересекающиеся контуры представляют собой проекцию коннод сопряженных пар. Соотношения температура — состав магнетит-ульвошпинелевого сольвуса показаны тонкими сплошными линиями. Гематит-ильменитовый сольвус (не показан) расположен между кривыми Hem<sub>100</sub> и Hem<sub>15</sub>Ilm<sub>85</sub>. Составы приведены в мольных процентах (по Баддингтону и Линдсли [2], использовано с разрешения издательства).



# Гранитоиды. Титаномагнетит - ильменит



*Magnetite-1 + ilmenite pairs*

*Magnetite-2 + ilmenite pairs*

■ Tonalite-1

□ Tonalite-2

● Quartz monzodiorite-1

○ Quartz monzodiorite-2

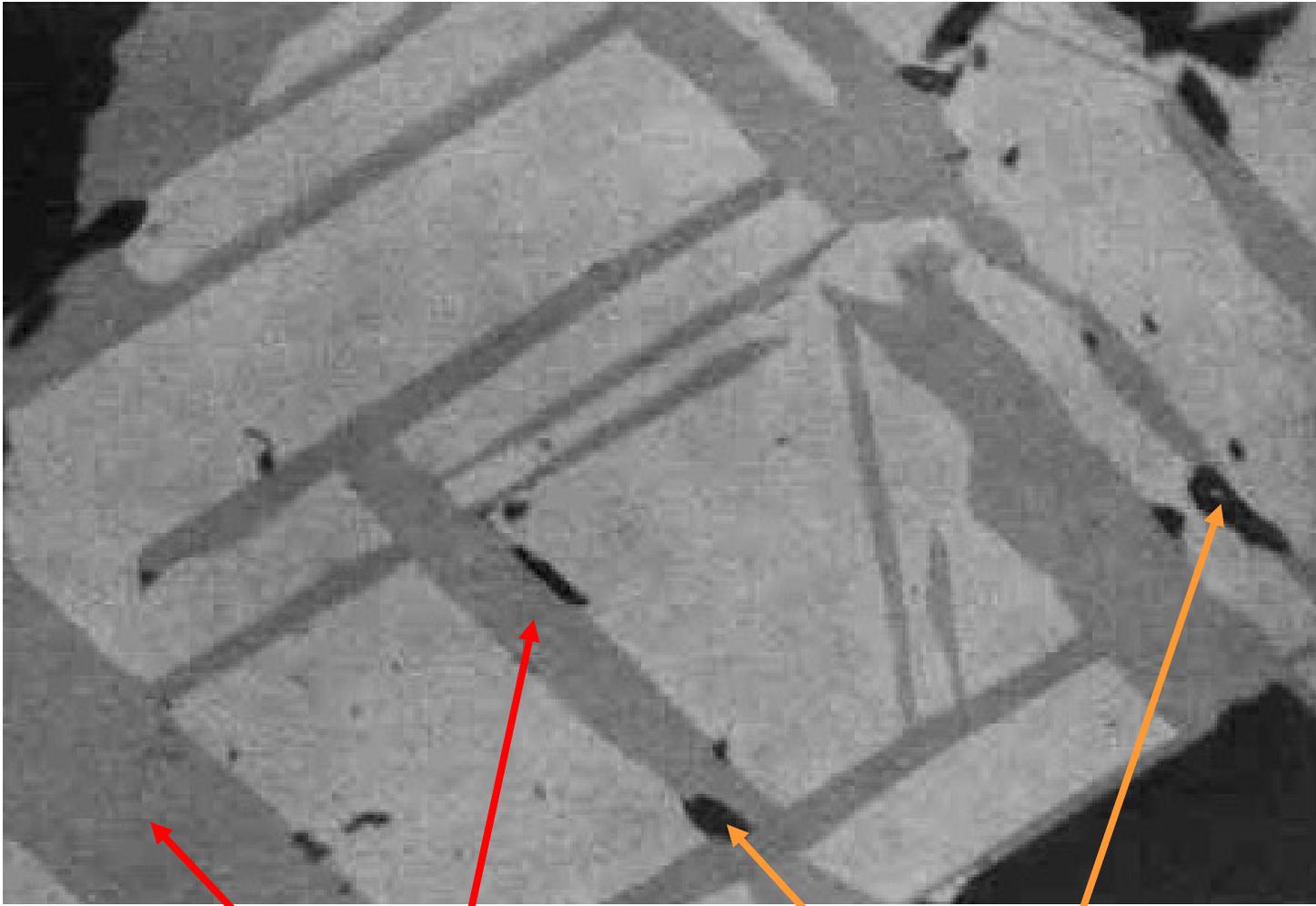
▲ Monzogranite

△ Quartz monzonite

Два поколения – две генерации титаномагнетита и ильменита в гранитоидах Японии.

FIG. 9. Diagram showing  $\Delta \log f(\text{O}_2)$  – temperature (Andersen & Lindsley 1988) for the Myoken-zan Fe–Ti oxides. Dotted area: distribution of plots for primary magnetite-2 – ilmenite pairs (proposed).

# Титаномагнетит – окислительный распад



Стандартные структуры распада (окислительного отжига) титаномагнетита гоналитов - матрица магнетит (светло-серый), ламелли – ильменит (серый), тельца шпинели (чёрные)

# Распад ильменит - гематит

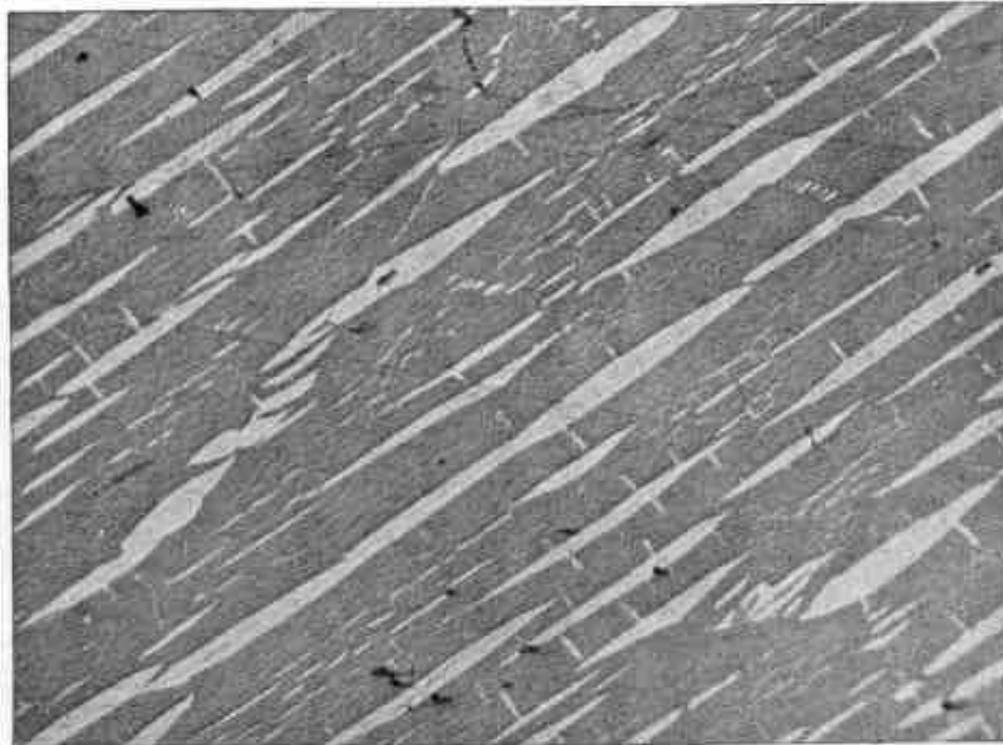


Abb. 566 Vergr. 520mal, Immersion RAMDOHR  
Ekersund, Norwegen

*Ilmenit*, ähnlich wie Abb. 564. Die Menge an Hämatit ist aber viel geringer. Die auf den basalen Disken senkrecht stehenden Gebilde bestehen aus feinsten Neubildungen von Magnetit und Rutil

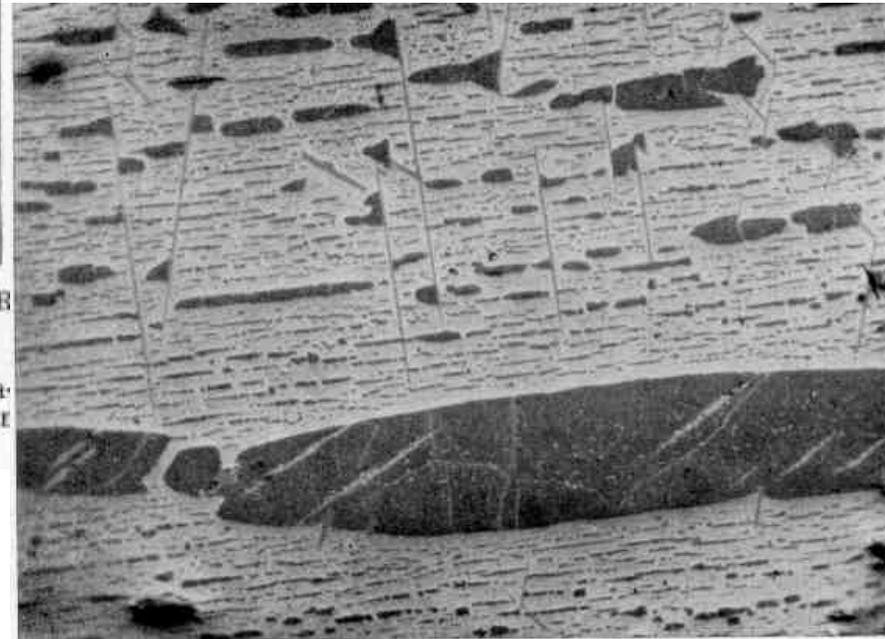


Abb. 569 Vergr. 250mal, Immersion RAMDOHR  
Gräne, Wester Götland

*Ilmenithämatit*. Hämatit vorherrschend, mit (0001) Entmischung von *Ilmenit* in zwei (evtl. drei) Größenklassen. Rutilentmischung in dünnen „Nadeln“ (Querschnitte von Tafeln) // (2243)

# Гранитоиды. Титанит (сфен)



Один из характернейших акцессорных минералов гранитоидов повышенной кальциевости. Не образуется при очень низкой щёлочности. Как только щёлочность увеличивается, титанит – сфен охотно замещает или сменяет титаномагнетит и ильменит, при этом количество сфена может возрасти в сотни раз и более. В некоторых типах гранодиоритов и адамеллитов количество сфена превышает 1 % их объёма. Нередко в гранодиорит-порфирах сфен образует и вкрапленники.

Титанит – сфен гранитоидов является минералом-концентратором и носителем редкоземельных элементов как лёгких (цериевых) (их обычно в 2-3 раза больше), так и тяжёлых (иттриевых). Содержания REE в сфене от десятых долей % до 3 масс. %. Обычные соотношения Ce : La : Nd ~ 2 : 1 : 1. Иногда количество Sm равно или превышает количество Nd. Сфен гранитоидов нередко содержит заметные количества иттрия, олова, ниобия, тория и урана. Любопытны парные изоморфные замещения, характерные для сфена  $\text{Ti} + \text{O} \leftrightarrow \text{Al} + \text{F} (\text{OH})$ .

Обильный сфен возникает при послемагматическом отжиге гранитоидов – за счёт титана магматических амфиболов и биотита, а также при замещении титаномагнетита и ильменита.

# Гранитоиды. Апатит

Апатит кристаллизуется совместно с ранним плагиоклазом (такой апатит беден фтором ~ 1 масс. %), с более поздними плагиоклазом и роговой обманкой (такой апатит несколько богаче фтором ~ 2 % F), с наиболее поздними биотитом, кварцем и K-Na полевым шпатом (такой апатит обогащён фтором ~ 3-6 % F).

Апатит обычных гранитоидов содержит 0.0n % Cl. Апатит гранитоидов повышенной кальциевости нередко обогащён хлором, иногда до 3 масс. %. Установлена корреляция между содержаниями хлора в апатите гранитоидов и масштабом связанных с ними железорудных концентраций в скарнах: 0.5 масс. % хлора в апатите – 5 млн. тонн руд; 2.5 масс. % хлора в апатите – 1000 млн. тонн железных руд.

Апатит в гранитоидах – основной минерал-концентратор и носитель редкоземельных элементов. Их содержание в апатите обычно 0.1-1 масс. %, изредка до 2 %, в гранитах-рапакиви до 3 %. Резко преобладают лёгкие редкоземельные элементы с более или менее стабильными соотношениями Ce : La : Nd ~ 3-2 : 2-1 : 1.

Апатит обычных гранитоидов беден стронцием и кремнезёмом. Лишь в наиболее высокотемпературных гранитах-рапакиви установлен апатит с 0.5-2.5 и до 10.5 % SiO<sub>2</sub> (твёрдые растворы апатит – бритолизит).

# Гранитоиды. Циркон

Характернейший акцессорный минерал гранитоидов от кварцевых габбро-диоритов до гранитов – лейкогранитов - аляскитов. Поскольку температура плавления циркона очень высока –  $1700^{\circ}\text{C}$ , постольку в большинстве гранитоидов (кроме щелочных гранитов) в той или иной мере сохраняются древние цирконы субстрата (гнейсы, гранито-гнейсы, граниты...), из которого были выплавлены данные граниты. Именно эти реликтовые зёрна циркона нередко служили затравками, на которых выросли новые кристаллы циркона, сингенетичные вмещающим гранитоидам. Циркон в гранитоидах кристаллизуется, начиная с самых ранних высокотемпературных стадий и до конечных. При этом, формируются правильные кристаллы размером от первых микрон до первых мм (обычно десятые доли мм) и метасоматические выделения неправильной формы с массой включений реликтов замещённых минералов – амфиболов, плагиоклаза...

Для цирконов характерны размеры и форма кристаллов (типы огранки и удлинение), цвет, цвет люминесценции, состав (содержание Hf, Y, U, Th, P, REE, OH), степень метамиктности. Морфология кристаллов циркона обусловлена множеством факторов, важнейшие – щелочность среды и температура кристаллизации. При высокой температуре и низкой щёлочности образуются удлинённые копьевидные кристаллы, на которых

# Гранитоиды. Циркон



При 1 николе

Николи х



# Гранитоиды. Циркон

из граней призмы преобладают (100), из граней пирамид наряду с (111) широко развиты более острые (311) и иные. При более низких температурах начинают преобладать грани призмы (110) и пирамиды (111). При позднемагматических температурах около 600° С из граней призмы развиты только грани (110). Чем выше щёлочность среды и ниже температура, тем всё более коротко призматичны кристаллы циркона, вплоть до почти полного исчезновения граней призмы, - кристаллы приобретают облик тетрагональных бипирамид с гранями (111).

Окраски циркона – бесцветная; палевая, табачная, жёлтая – соломенно-жёлтая (жаргоны); оранжево-жёлтая до интенсивной красно-коричневой (гиацинты); коричневая, бурая... В значительной степени окраски обусловлены наличием и обилием редкоземельных элементов, урана и тория.

Главная особенность химического состава циркона – величина Zr/Hf, которая заметно снижается в ходе магматической дифференциации. В большинстве плагиогранитоидов и гранитов не высокой щёлочности Zr/Hf составляет 60-40, в лейкогранитах – аляскитах около 30, в гранитных пегматитах снижается до 20-10 и ниже.

Циркон – главный минерал-концентратор и носитель иттриевых редких земель, урана и тория во многих типах гранитоидов. Циркон

# Гранитоиды. Циркон

обычных гранитоидов содержит до 1 % редкоземельных элементов, из которых преобладает иттербий, и заметное количество иттрия. Почти любой кристалл (кристаллик) циркона в гранитоидах содержит тонкие или широкие зоны, обогащённые ураном и/или торием до n %.

Высокотемпературные цирконы гранитоидов – по составу твёрдые растворы циркон  $ZrSiO_4$  – ксенотим  $YPO_4$  – торит  $ThSiO_4$  – коффинит  $USiO_4$ ... Такие цирконы особо характерны для высоко радиоактивных гранитов, которые обычно сопровождаются разнообразным редкометальным оруденением. Богатые Th и U цирконы метамиктные, не прозрачные, бурого и красно-бурого цвета. Кристаллы таких цирконов нередко неправильной формы, искривлённые (расщеплённые) , - это так называемые циртолиты.

Для циркона характерно и замещение гидрогранатного типа  $SiO_4 \leftrightarrow H_4O_4$ . Степень замещения кремнекислородного тетраэдра достигает 0.8; такой циркон иногда называют «аршиновит».

# Гранитоиды. Циркон

## Редкометалльные граниты Южного Китая

TABLE 4. COMPOSITION OF SELECTED ZIRCON CRYSTALS FROM THE XIHUASHAN GRANITIC COMPLEX

	G-a					G-b						G-c	
	1	2	3	4	5	6a	6b	7a	7b	8a	8c	9a	9b
						R	C	R	C	R	C	R	C
SiO <sub>2</sub> wt%	32.16	32.03	32.23	30.18	27.64	29.00	31.10	29.06	29.96	30.80	31.89	29.25	30.85
ZrO <sub>2</sub>	63.97	62.13	66.70	56.95	51.10	47.62	61.58	48.44	55.22	56.37	61.69	49.64	61.75
HfO <sub>2</sub>	1.91	3.68	1.64	5.28	1.55	20.29	5.02	19.50	5.06	11.19	4.16	19.64	4.76
UO <sub>2</sub>	0.30	0.81	0.18	0.97	4.81	0.57	0.29	0.45	3.07	0.27	0.37	0.27	0.41
ThO <sub>2</sub>	0.10	0.01	0.14	0.68	1.41	0.16	0.03	0.19	0.41	0.02	-	0.09	0.11
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47	0.34	0.26	3.10	1.51	1.14	0.74	1.19	2.36	0.80	0.67	0.70	0.83
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0.00	-	0.02	-	-	-	-	-	-
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.02	0.03	0.06	0.00	0.07	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.26	0.30	2.10	1.18	1.08	0.64	0.93	1.06	0.54	0.48	0.85	0.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0.04	0.14	-	-	-	-	-	-	0.01	-
Total	99.21	99.29	101.48	99.36	89.34	99.93	99.44	99.80	97.18	100.02	99.29	100.47	99.49
Si apfu	0.998	1.001	0.981	0.953	0.981	0.970	0.978	0.971	0.979	0.986	0.996	0.970	0.970
Zr	0.968	0.947	0.990	0.877	0.884	0.777	0.944	0.789	0.880	0.880	0.940	0.802	0.947
Hf	0.017	0.033	0.014	0.048	0.016	0.194	0.045	0.186	0.047	0.102	0.037	0.186	0.043
U	0.002	0.006	0.001	0.007	0.038	0.004	0.002	0.003	0.022	0.002	0.003	0.002	0.003
Th	0.001	0.000	0.001	0.005	0.011	0.001	0.000	0.001	0.003	0.000	-	0.001	0.001
Y	0.008	0.006	0.004	0.052	0.028	0.020	0.012	0.021	0.041	0.014	0.011	0.012	0.014
La	-	-	-	-	0.000	-	0.000	-	-	-	-	-	-
Ce	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P	0.006	0.007	0.008	0.056	0.035	0.030	0.017	0.026	0.029	0.015	0.013	0.024	0.020
Al	-	-	-	0.002	0.006	-	-	-	-	-	-	0.000	-
Total	2.001	2.000	1.999	2.001	1.999	1.997	1.998	1.997	2.001	1.999	2.000	1.997	1.998
#Hf	1.7	3.4	1.4	5.2	1.7	20.0	4.6	19.1	5.1	10.4	3.8	18.8	4.3

Состав зональных кристаллов циркона, богатого гафнием, ураном, торием, иттрием

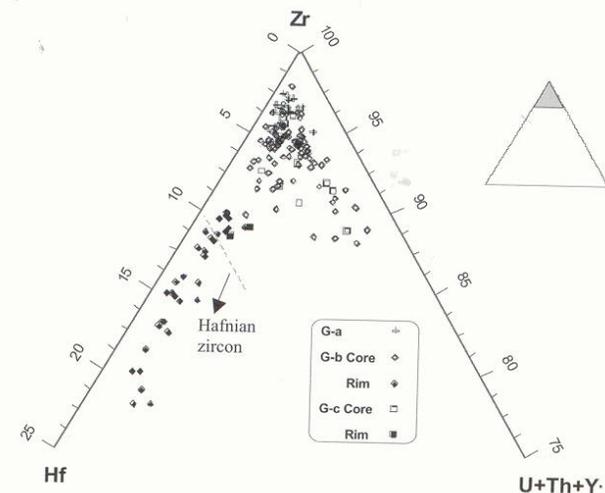


Fig. 7. Plot of compositions of zircon in the triangular diagram Zr - Hf - (U + Th + Y + REE) (atom %).

R: rim, C: core. Structural formulae were calculated based on O = 4 atoms per formula unit (apfu). -: below detection limits. #Hf = 100 × Hf/(Zr + Hf). Electron-microprobe data.

# Гранитоиды. Циркон

Редкометалльные граниты Южного Китая

Состав  
зональных  
кристаллов  
циркона,  
богатого  
гафнием,  
ураном,  
торием,  
иттрием

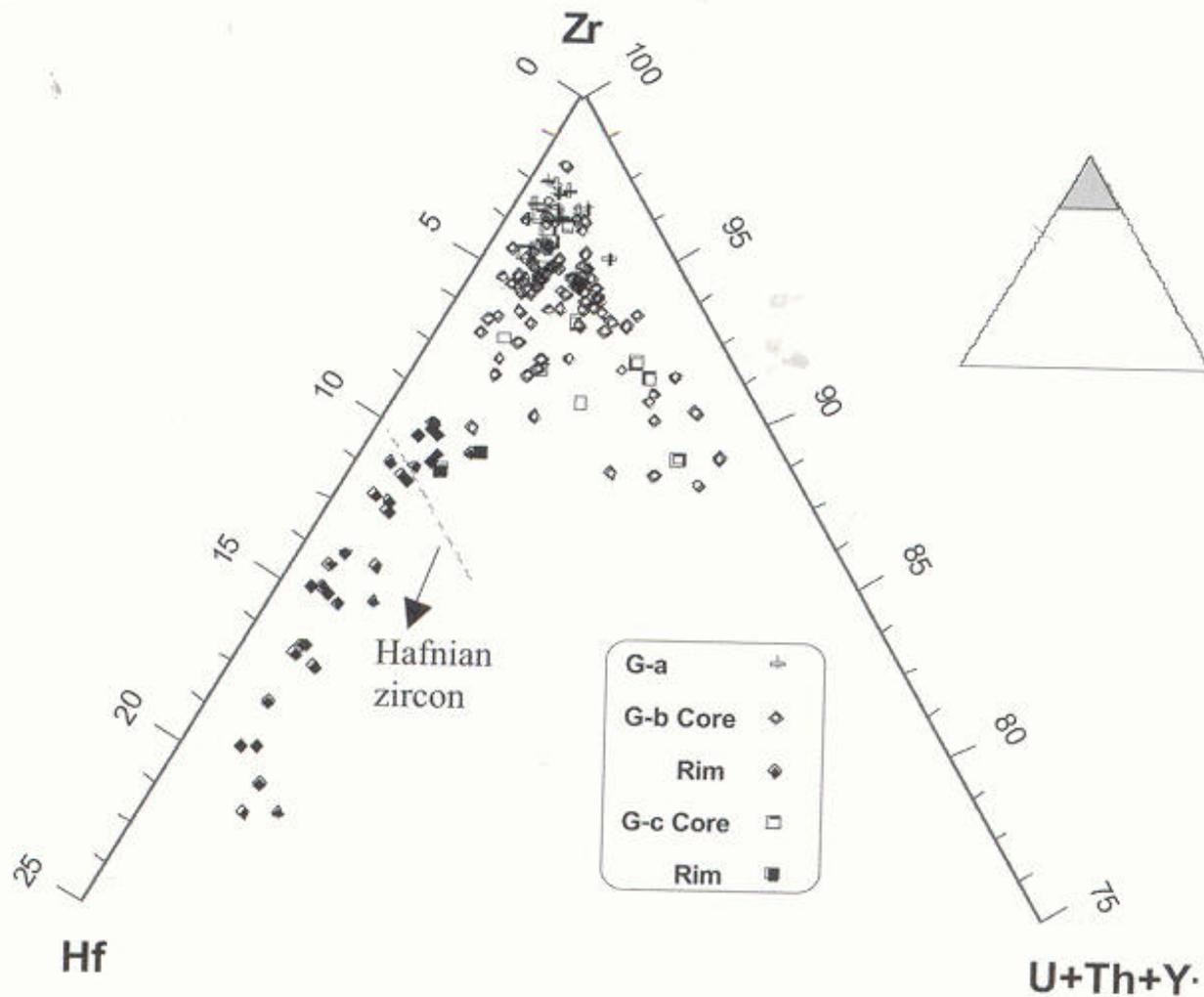


FIG. 7. Plot of compositions of zircon in the triangular diagram Zr - Hf - (U + Th + Y + REE) (atom %).



# Гранитоиды. Ортит = алланит



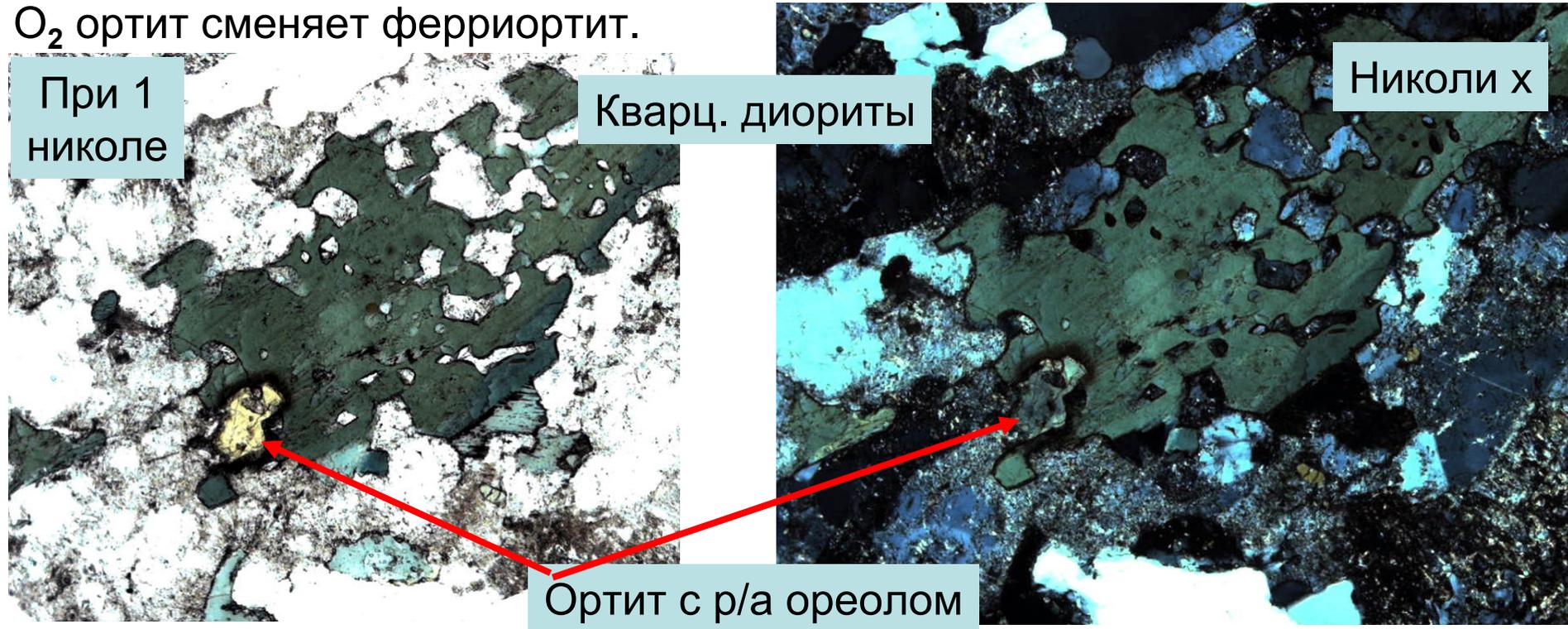
Широко распространённый акцессорный минерал гранитоидов повышенной кальциевости, в них ортит – основной минерал-концентратор и носитель лёгких (цериевых) редкоземельных элементов. Ортит часто слагает единые зональные кристаллы с магматическими эпидотом или клиноцоизитом (индикаторы высокого давления – абиссальных фаций гранитоидов). Ортит – чуткий индикатор щёлочности и величины окислительного потенциала при магматических процессах. При высокой  $f_{O_2}$  ортит сменяет ферриортит.

При 1  
николе

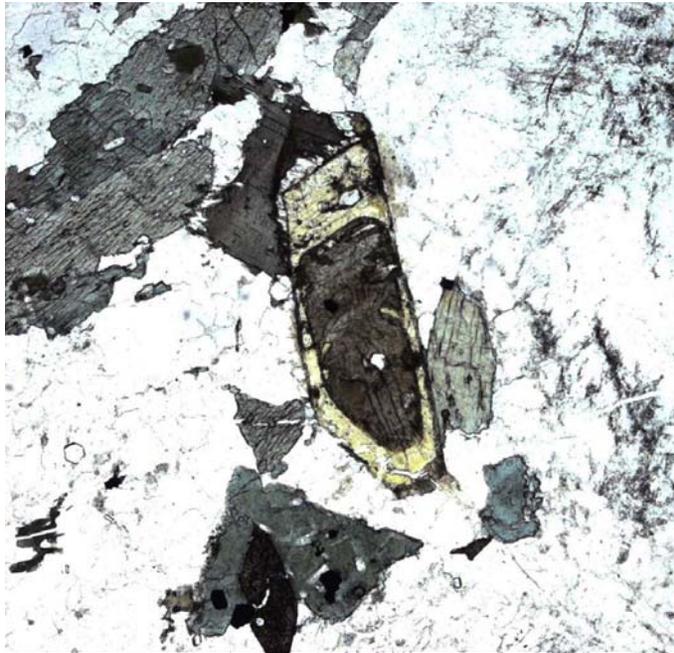
Кварц. диориты

Николи х

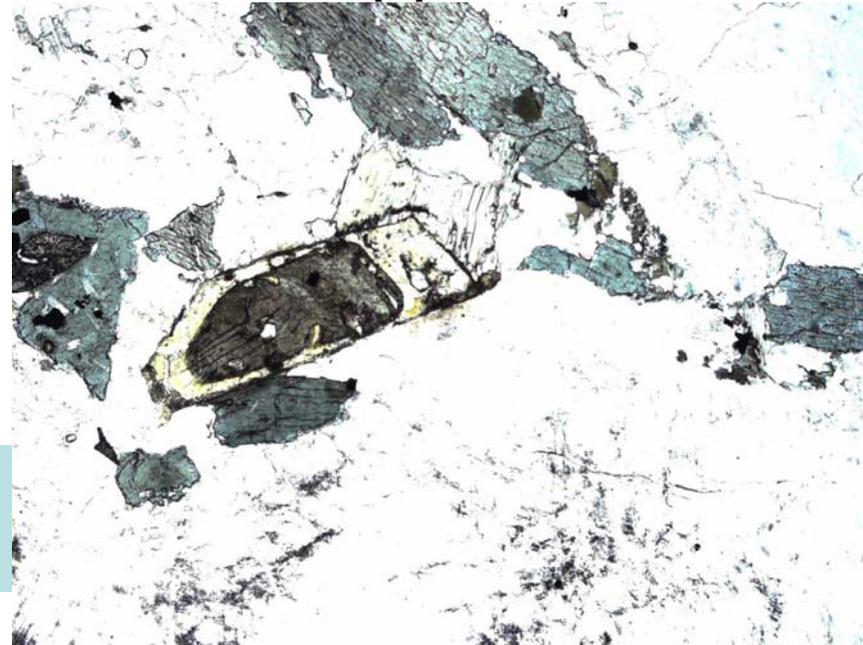
Ортит с р/а ореолом



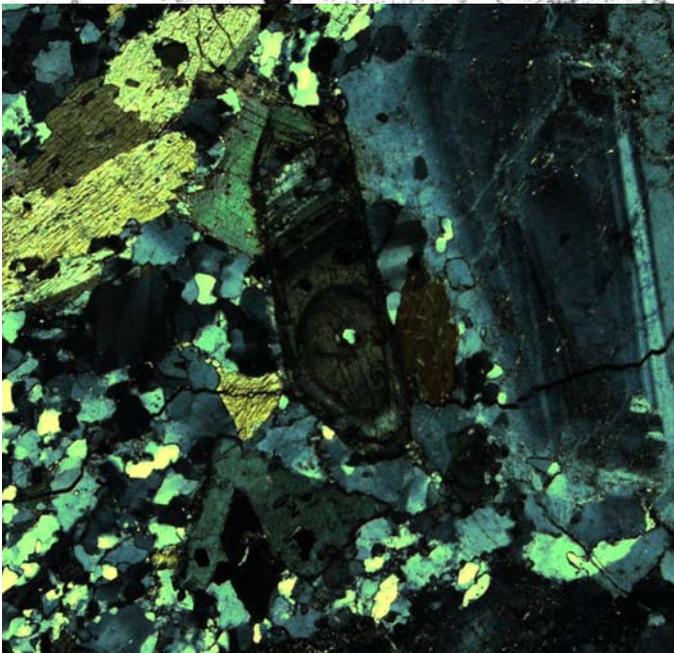
# Гранитоиды. Ортит и эпидот



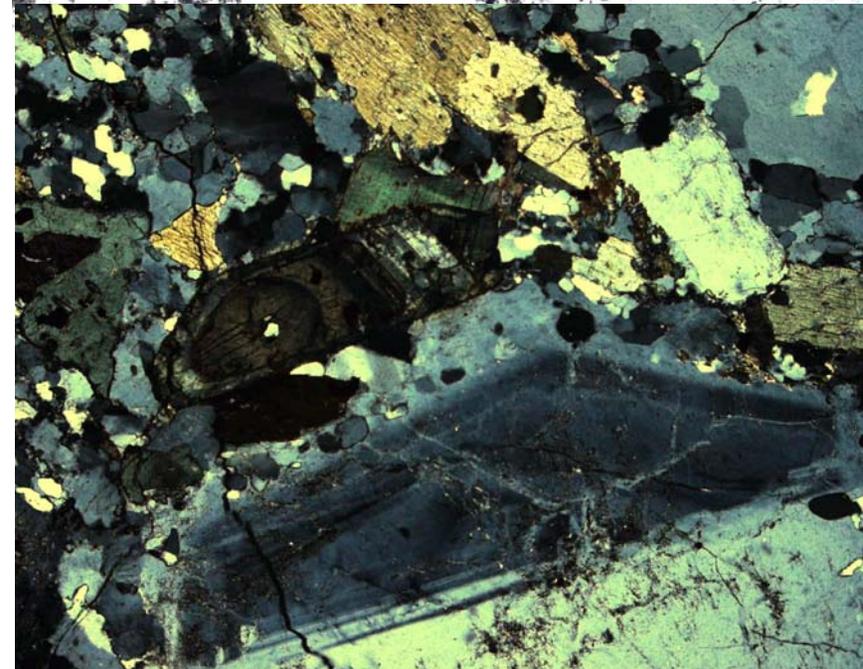
Кварцевые  
диориты



При 1  
николе



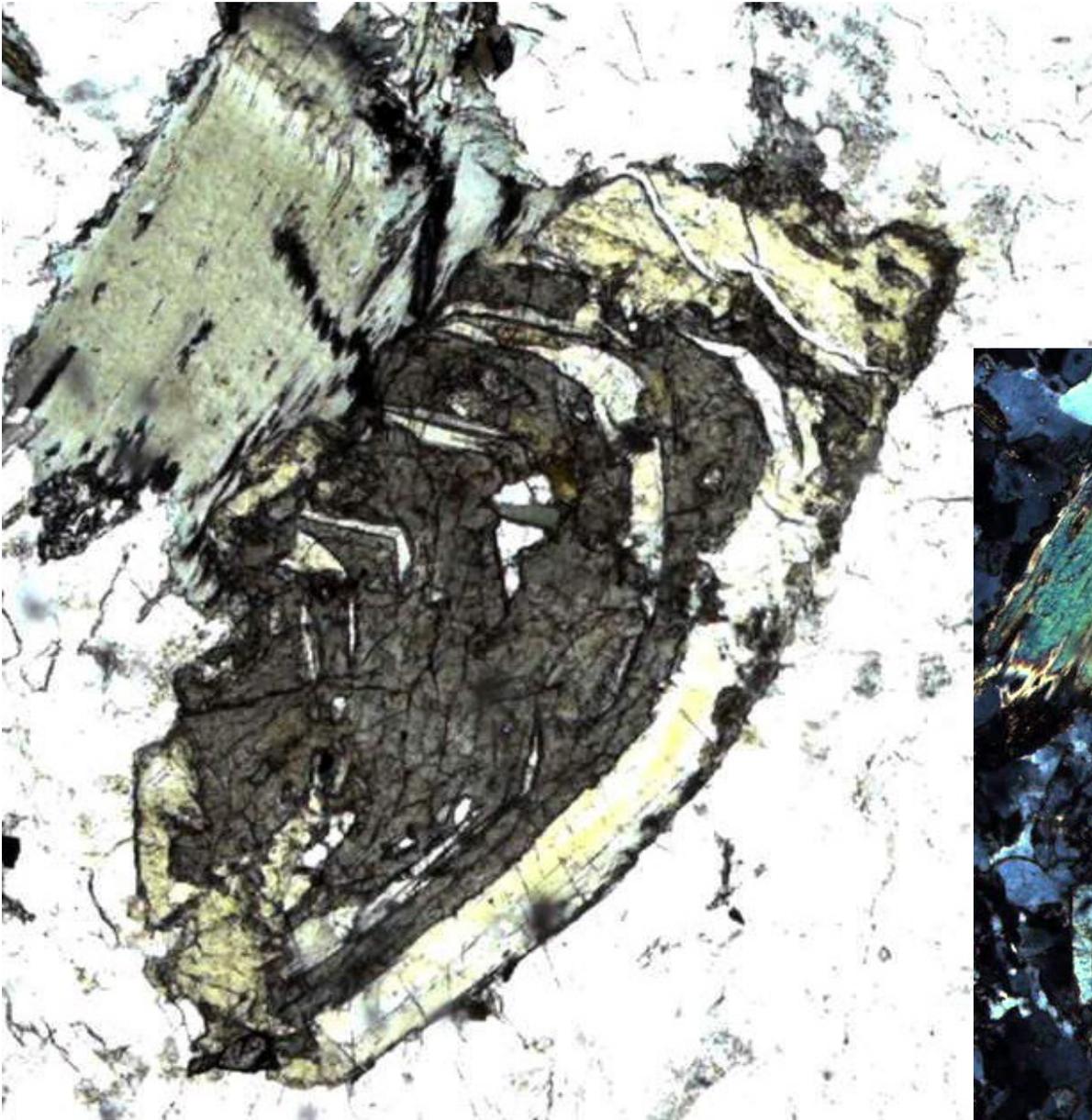
Николи х



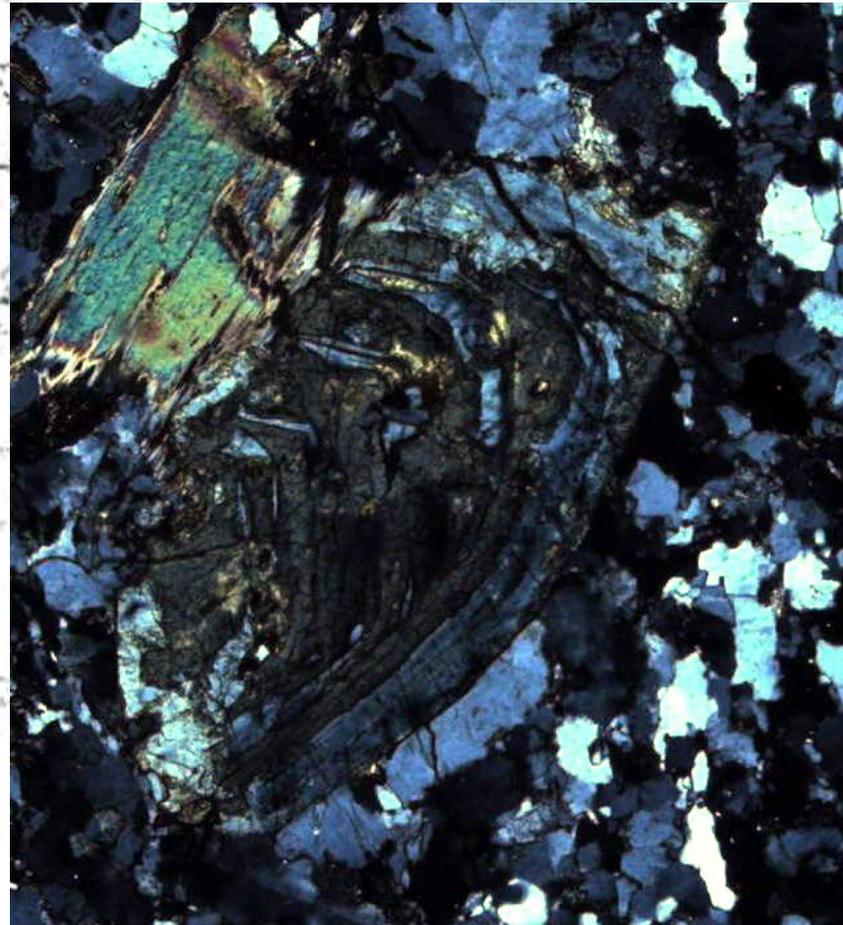
# Гранитоиды. Ортит и эпидот

Кварцевые  
диориты

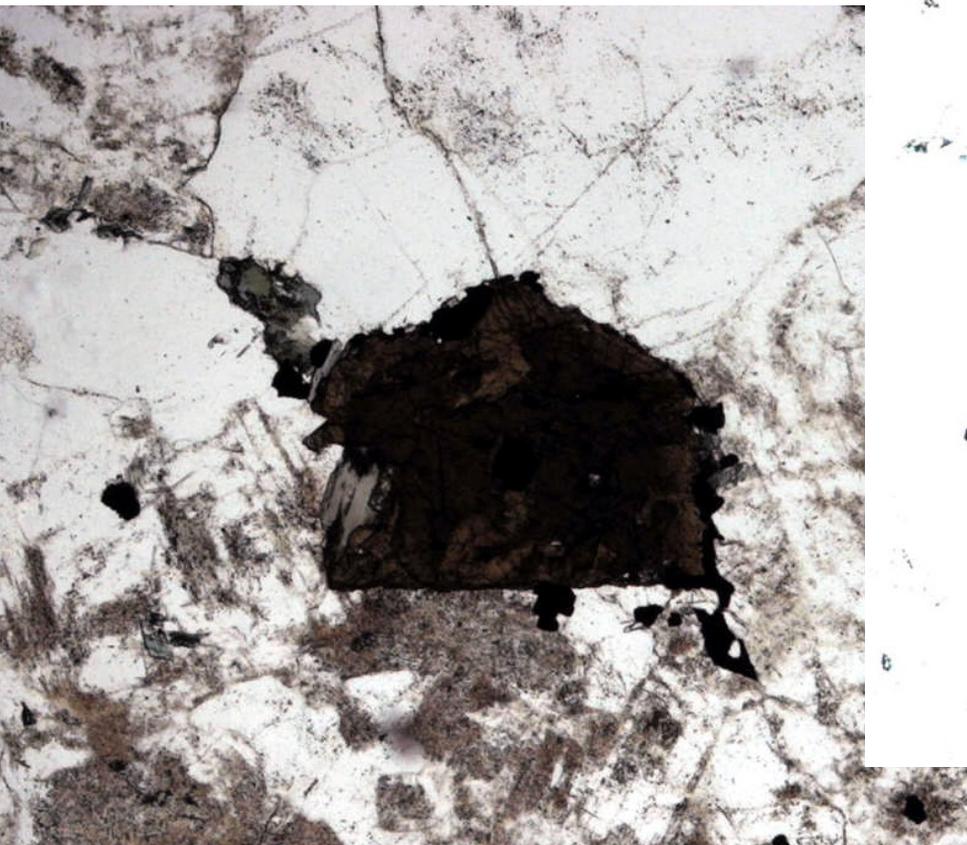
Николи х



При 1 николе

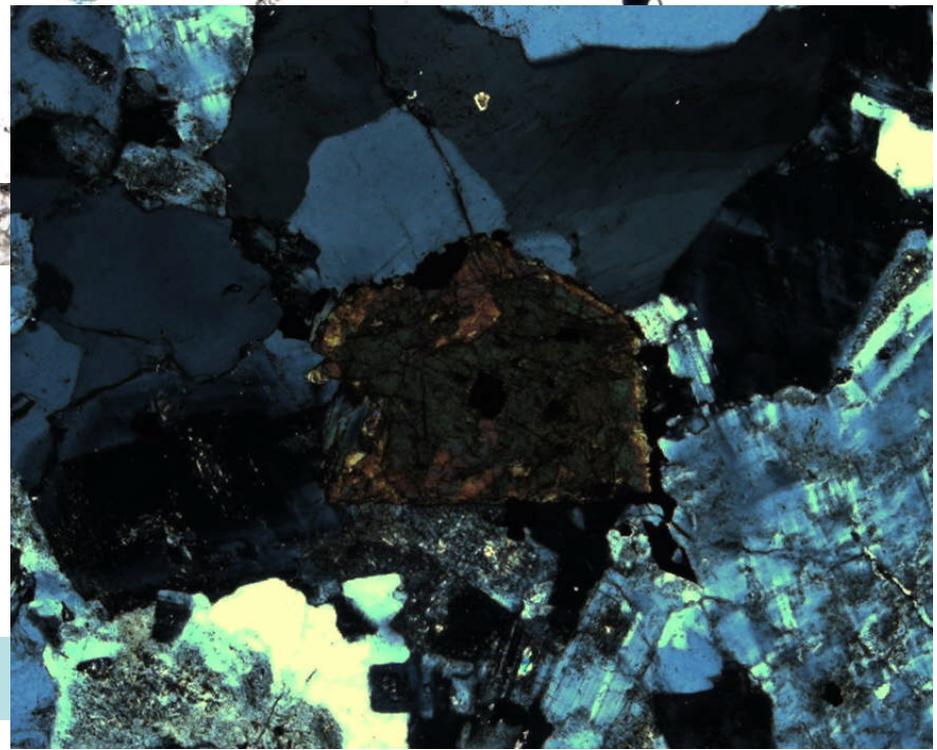
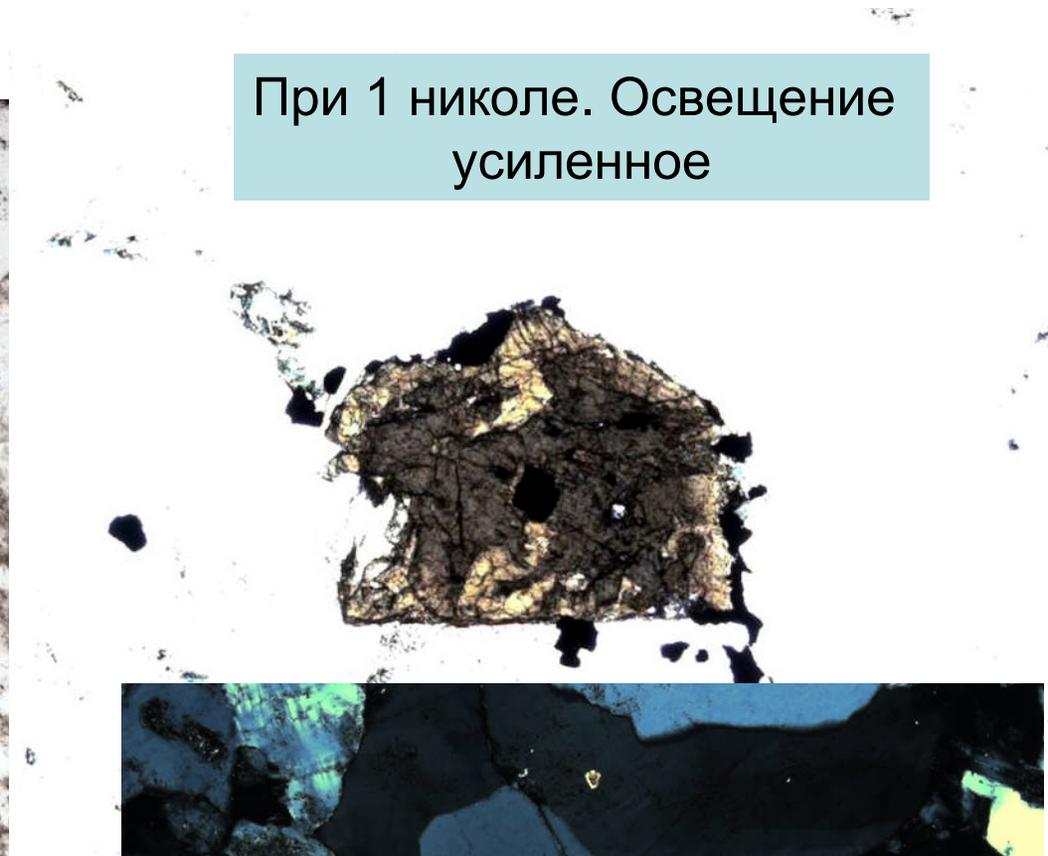


# Граниты. Ортит



При 1 николе. Освещение обычное

При 1 николе. Освещение усиленное



Николи х

# Граниты. Ортит



При 1 николе.  
Освещение обычное



При 1 николе.  
Освещение  
усиленное

ИЛЬМЕНИТ

# Гранитоиды. Ортит = алланит

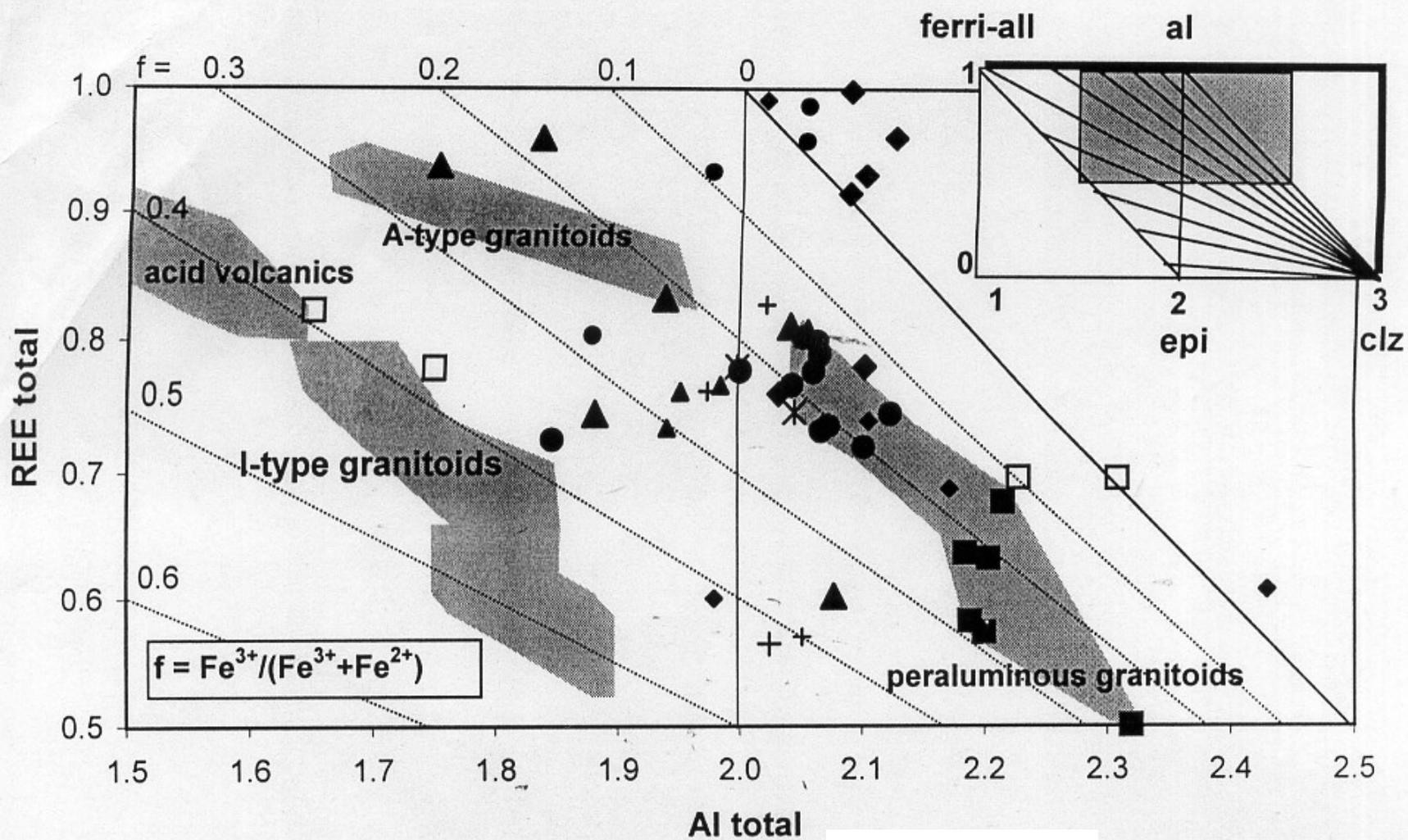


FIGURE 6. Allanite compositions plotted in terms of REE vs. total Al (cations  $13 \phi.e. O$  after Petrik et al. (1995). Different symbols refer to allanite in individual inclusions. The dark field in the range of Al from 2 to 2.5 outlines the range of spot analyses of discrete allanite grains (circles represent analyses from sample T87 tonalite and squares, T18 biotite granodiorite). Other noted fields of allanite compositions are based upon the compilation in Petrik et al. (1995). The A-type field is based upon the data of Buda and Nagy (1995).

# Гранитоиды. Ортит = алланит

## Состав акцессорного ортита в гранитоидах Японии

TABLE 3. REPRESENTATIVE COMPOSITIONS OF ALLANITE-(Ce)  
FROM MIYAMORI, SUISHYOYAMA, KITATOSAWA AND SHIODAIRA LOCALITIES

Sample	a) Miyamori			b) Suishyoyama		c) Kitatosawa		d) Shiodaira	
	Location	1	2	3	1	2	1	2	1
n	5	5	5	5	6	5	5	3	3
SiO <sub>2</sub>	33.93(0.50)	33.80(0.30)	33.51(0.15)	31.65(0.28)	31.21(0.51)	32.63(0.27)	32.44(0.29)	33.10(0.11)	31.93(0.02)
TiO <sub>2</sub>	1.26(0.03)	1.20(0.03)	1.54(0.02)	<0.003	<0.003	0.88(0.02)	0.92(0.02)	0.04(0.00)	0.10(0.02)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.07(0.19)	14.85(0.09)	14.22(0.08)	15.36(0.13)	15.31(0.04)	17.64(0.06)	17.45(0.04)	21.21(0.01)	20.32(0.03)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.21(0.11)	11.30(0.10)	11.55(0.06)	9.93(0.19)	9.30(0.11)	11.60(0.09)	11.55(0.16)	8.76(0.13)	9.56(0.02)
FeO	4.10(0.11)	4.34(0.10)	4.34(0.06)	5.40(0.05)	7.16(0.10)	3.76(0.08)	3.84(0.14)	3.65(0.13)	3.51(0.02)
MnO	0.54(0.01)	0.51(0.01)	0.54(0.00)	7.00(0.05)	7.64(0.06)	0.74(0.02)	0.76(0.01)	1.42(0.05)	1.94(0.07)
MgO	1.35(0.02)	1.27(0.12)	1.52(0.02)	<0.002	<0.002	0.37(0.01)	0.36(0.01)	0.10(0.01)	0.15(0.01)
CaO	11.79(0.03)	11.47(0.04)	11.12(0.08)	3.59(0.06)	3.67(0.02)	11.83(0.06)	11.90(0.02)	12.47(0.05)	11.02(0.01)
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.10	<0.10	<0.10	1.61(0.06)	1.56(0.02)	0.67(0.04)	0.70(0.03)	<0.10	<0.10
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.14(0.08)	5.28(0.12)	5.68(0.06)	2.75(0.10)	3.00(0.00)	4.30(0.09)	4.14(0.08)	2.63(0.03)	3.16(0.04)
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.65(0.05)	7.97(0.07)	8.16(0.13)	7.38(0.24)	7.74(0.27)	7.02(0.15)	6.80(0.06)	6.01(0.01)	6.10(0.44)
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.29(0.07)	1.26(0.04)	1.30(0.01)	1.45(0.06)	1.55(0.04)	1.11(0.05)	1.08(0.05)	1.18(0.01)	1.34(0.06)
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.21(0.03)	3.22(0.00)	3.26(0.03)	4.93(0.06)	5.39(0.00)	3.55(0.02)	3.56(0.07)	3.87(0.01)	4.25(0.06)
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.82(0.02)	0.80(0.02)	0.81(0.01)	1.79(0.03)	1.86(0.04)	0.70(0.01)	0.76(0.08)	2.85(0.07)	3.05(0.01)
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.22	<0.22	<0.22	1.46(0.06)	1.55(0.00)	0.76(0.01)	0.79(0.04)	2.09(0.04)	1.98(0.04)
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.22	<0.22	<0.22	<0.22	<0.22	<0.22	<0.22	<0.22	<0.22
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11
ThO <sub>2</sub>	2.41(0.04)	2.65(0.04)	2.75(0.08)	1.62(0.04)	1.48(0.02)	1.48(0.00)	1.40(0.02)	0.24(0.00)	0.28(0.02)
Na <sub>2</sub> O	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
K <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Total	99.77	99.92	100.30	95.92	98.42	99.04	98.45	99.62	98.69

# Граниты. Монацит $(\text{Ce,La,Nd,Th,Ca})[\text{PO}_4,\text{SiO}_4,\text{SO}_4]$

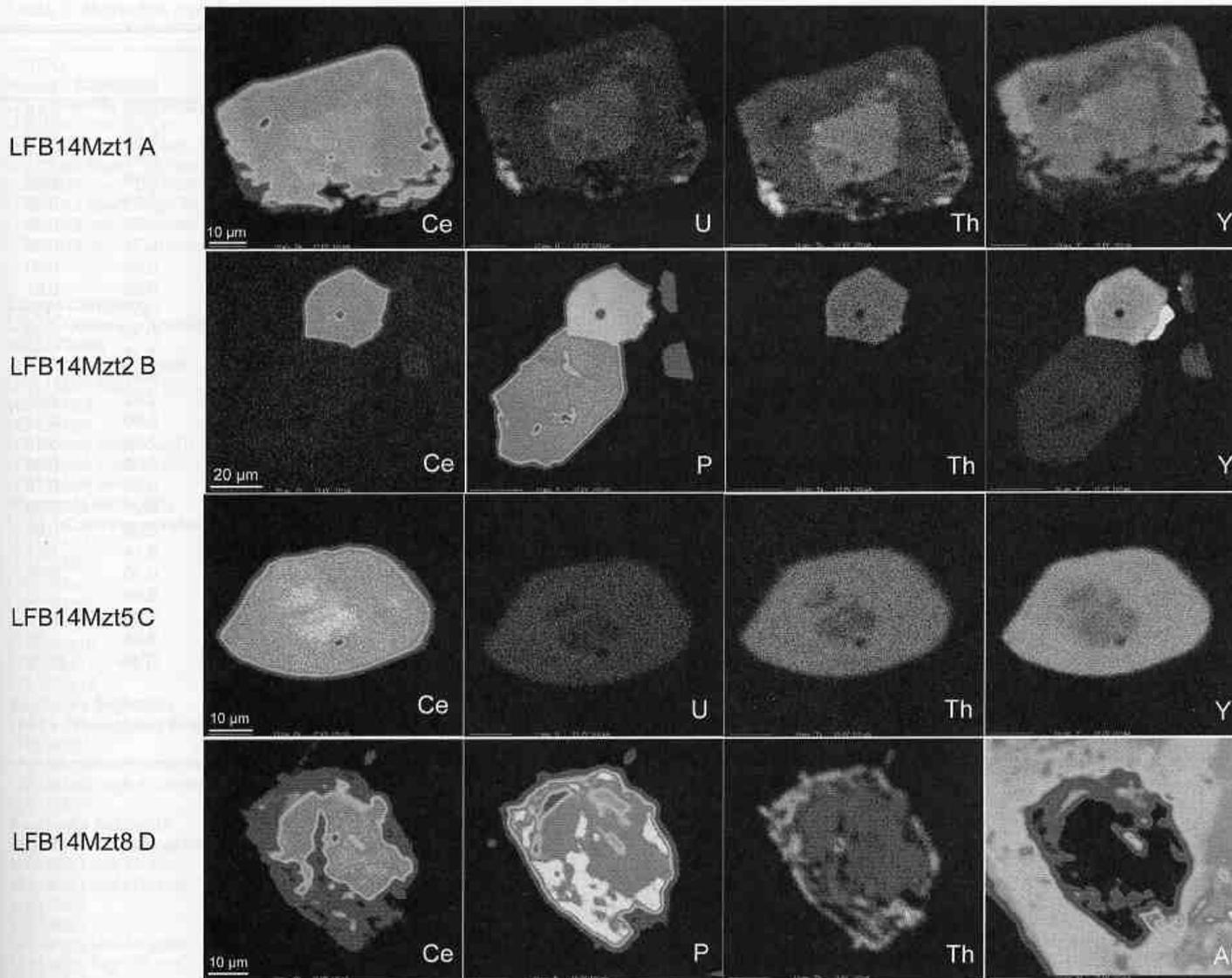
Типоморфный акцессорный минерал гранитов- лейкогранитов нормальной и повышенной щёлочности, член изоморфных серий  $(\text{Ce,La,Nd})[\text{PO}_4]$  (собственно монацит) –  $\text{CaTh}[\text{PO}_4]_2$  -  $\text{CaCe}_2\text{Th}[\text{PO}_4]_4$  (чералит) -  $\text{Th}[\text{SiO}_4]$  (хаттонит). В таких гранитах монацит – основной минерал-концентратор и носитель редкоземельных элементов и тория. Обычные соотношения  $\text{Ce} : \text{La} : \text{Nd} \sim 2 : 1 : 1$ . Содержания Th нередко достигают 10-15 масс. %.

TABLE 7. REPRESENTATIVE COMPOSITIONS OF MONAZITE-(Ce)  
FROM THE G-a GRANITE AT XIHUASHAN, CHINA

	1	2	3	4	5	6
$\text{P}_2\text{O}_5$ , wt%	30.55	29.23	28.33	26.83	28.11	28.53
$\text{SiO}_2$	0.65	1.03	1.40	2.06	1.73	0.74
$\text{ThO}_2$	4.06	6.95	7.87	10.73	6.87	6.57
$\text{UO}_2$	0.26	0.43	0.31	0.40	0.20	0.30
$\text{Y}_2\text{O}_3$	0.95	0.98	0.80	0.99	1.74	0.69
$\text{La}_2\text{O}_3$	13.26	12.79	14.53	9.97	12.35	12.22
$\text{Ce}_2\text{O}_3$	28.83	25.30	28.18	23.06	27.15	25.31
$\text{Pr}_2\text{O}_3$	0.78	0.65	0.58	-	-	-
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	12.85	11.99	10.68	14.20	12.68	11.70
$\text{Sm}_2\text{O}_3$	2.82	3.06	2.23	4.72	2.51	4.78
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	2.12	2.26	1.76	2.34	1.43	2.69
$\text{Tb}_2\text{O}_3$	0.12	0.00	0.01	0.09	0.02	0.19
$\text{Dy}_2\text{O}_3$	0.54	0.63	0.50	0.84	0.69	0.74
$\text{Ho}_2\text{O}_3$	0.28	0.00	0.07	-	0.11	-
$\text{Er}_2\text{O}_3$	0.15	0.07	0.01	0.13	0.30	-
$\text{Tm}_2\text{O}_3$	0.32	0.04	0.12	0.21	0.04	0.40
$\text{Yb}_2\text{O}_3$	0.11	0.04	0.21	0.68	0.02	-
$\text{Lu}_2\text{O}_3$	0.01	-	0.02	-	-	-
$\text{CaO}$	0.24	0.32	0.31	0.16	0.12	0.83
$\text{PbO}$	0.08	-	0.11	0.10	0.04	-
Total	98.98	95.77	98.02	97.50	96.11	95.69

Состав монацита  
в  
редкометалльных  
гранитах  
Южного Китая

# Граниты. Монацит $(\text{Ce,La,Nd,Th,Ca})[\text{PO}_4,\text{SiO}_4,\text{SO}_4]$



Строение  
зональных  
кристаллов  
монацита  
и его  
ассоциации  
в  
редкометальных  
гранитоидах

**FIGURE 1.** False-color high-resolution X-ray maps for representative monazites (warm colors indicate higher concentrations; cold colors indicate lower concentrations). (a) Ce-U-Th-Y X-ray maps for zoned monazite no. 1 in Minnegans granodiorite. The monazite is included in biotite and with a high-Th core, low-Th intermediate, and a high-Th rim. (b) Ce-P-Th-P X-ray maps show co-existing monazite, apatite, and xenotime. (c) Ce-U-Th-Y X-ray maps for zoned monazite no. 5 in Minnegans granodiorite. The monazite is included in biotite and has a low-Th core. (d) Ce-P-Th-Al X-ray maps show a monazite mantled by apatite, the whole grain is included in K-feldspar.

# Гранитоиды. Ксенотим

Высокотемпературный ксенотим гранитоидов – по составу твёрдый раствор  $YPO_4$  (собственно ксенотим) –  $ZrSiO_4$  (циркон) –  $ThSiO_4$  (торит) –  $USiO_4$  (коффинит)..

TABLE 6. REPRESENTATIVE COMPOSITIONS OF XENOTIME-(Y)  
FROM THE XIHUASHAN GRANITIC COMPLEX, CHINA

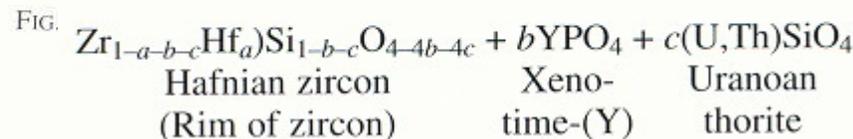
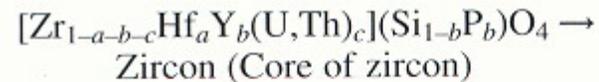
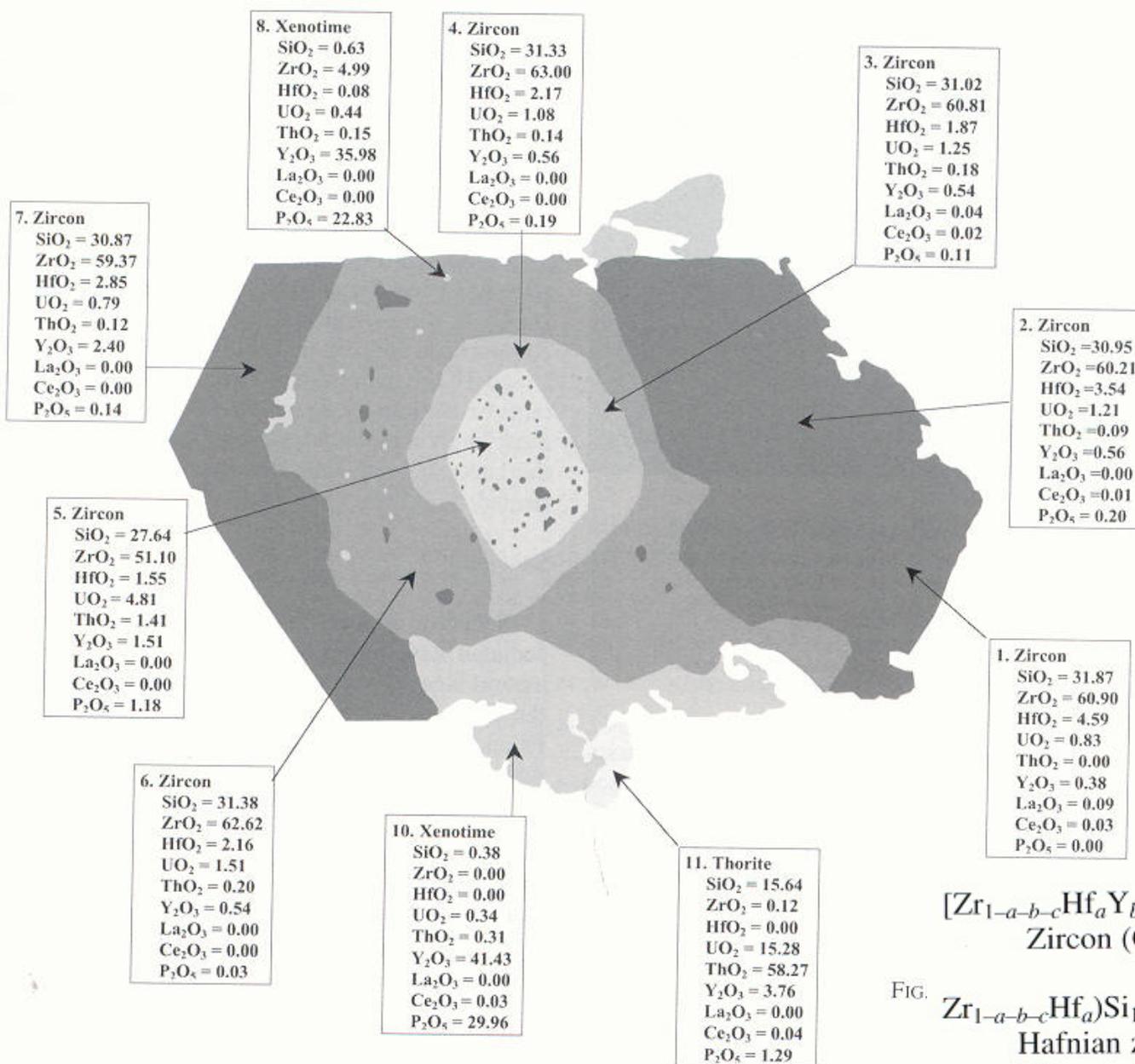
	G-b						G-c			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> wt%	34.3	33.75	34.87	34.45	33.68	35.42	33.17	34.62	34.87	35.06
SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	0.45	-	0.29	0.51	-	0.02
ThO <sub>2</sub>	0.08	0.39	-	0.14	0.69	0.04	2.04	0.15	-	0.47
UO <sub>2</sub>	0.68	0.48	-	0.87	1.10	0.22	2.57	0.68	-	0.4
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40.35	39.39	40.46	41.44	41.04	46.06	33.67	44.59	40.46	43.29
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	-	0.32	0.09	-	0.02	-	0.08	0.32	-
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.11	0.58	0.07	0.15	0.20	0.03	0.01	0.58	0.08
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.66	0.48	-	0.17	-	-	0.31	-	-	0.28
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.91	0.79	0.06	1.09	0.52	0.47	0.95	-	0.06	0.35
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.60	5.43	4.5	4.645	4.63	2.24	3.00	0.91	4.41	4.01
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.74	0.69	0.74	0.66	0.59	0.47	1.13	0.29	0.74	0.58
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.95	7.15	6.25	5.61	5.52	3.56	6.60	2.74	5.625	4.70
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.37	0.96	0.69	0.61	1.17	1.01	1.05	0.75	0.69	-
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.43	5.18	5.09	3.85	4.24	3.92	6.38	4.25	5.09	4.87
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.44	0.44	0.45	0.53	0.40	0.81	0.34	0.84	0.45	0.64
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.43	4.15	4.44	4.35	3.97	4.90	6.32	6.03	4.44	4.17
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	0.91	0.08	0.35	-	0.16	0.35	0.08	0.08	0.48
CaO	-	0.06	0.01	-	0.01	0.06	0.05	0.07	0.01	0.04
PbO	0.35	0.32	0.46	0.32	0.67	0.30	0.46	1.81	0.46	0.38
Total	100.73	100.68	99.00	99.25	98.83	99.86	98.73	98.41	98.29	99.82

Состав  
ксенотима  
в  
редкометальных  
гранитах  
Южного Китая

# Гранитоиды. Ксенотим

Срастание ксенотима, циркона, торита в редкометалльных гранитах Южного Китая

Реакция образования ксенотима



# Граниты. Уранинит (U,Th,Ce)O<sub>2</sub>

Характерный акцессорный минерал гранитоидов, член изоморфных серий UO<sub>2</sub> (собственно уранинит) – ThO<sub>2</sub> (торианит) - Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -CeO<sub>2</sub> (церианит). Как правило, богат и весьма богат торием.

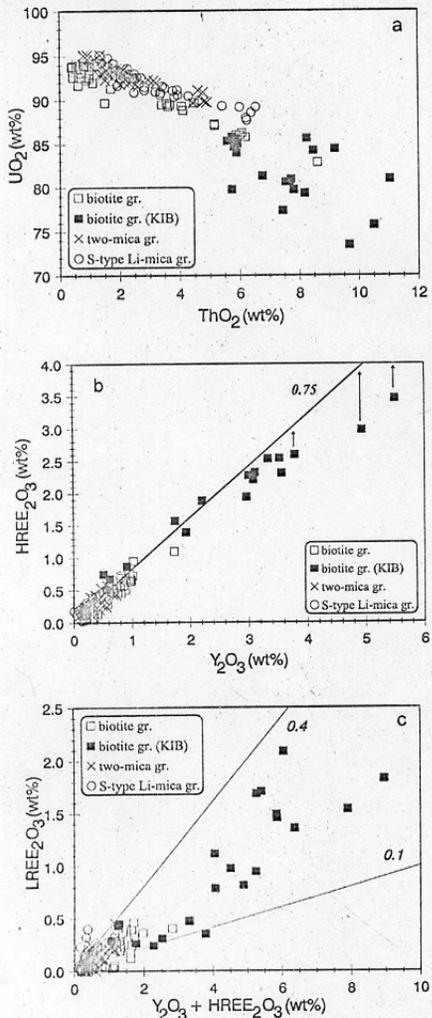


FIG. 3. Uraninite compositions (in wt%) in terms of UO<sub>2</sub> vs. ThO<sub>2</sub> (a), HREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b), and LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. the sum of HREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. KIB - Kirchberg.

TABLE 8. REPRESENTATIVE COMPOSITIONS OF URANINITE FROM THE XIHUASHAN GRANITIC COMPLEX, CHINA

	G-b							G-c			
	WF	WN	WF	WZ	WF	WF	WF	IZ	WZ	WZ	WZ
UO <sub>2</sub> wt%	79.90	83.69	83.27	80.77	83.81	80.64	84.18	75.00	83.51	86.62	84.01
ThO <sub>2</sub>	8.33	7.43	5.45	6.93	5.58	6.99	6.89	6.37	5.66	7.27	5.96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.40	0.97	2.83	3.87	2.25	3.13	1.49	6.33	1.24	0.41	1.74
PbO	2.11	1.99	2.04	1.90	2.22	2.12	2.21	1.94	2.02	1.96	2.10
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.36	0.07	0.03	0.00	0.14	0.03	0.06	0.13	0.37	0.15	0.27
Total	94.10	94.17	93.63	93.53	94.00	92.91	94.82	89.76	92.80	96.43	94.08
U <i>apfu</i>	0.844	0.901	0.889	0.852	0.897	0.866	0.899	0.809	0.911	0.915	0.901
Th	0.090	0.082	0.059	0.075	0.061	0.077	0.075	0.070	0.063	0.078	0.065
P	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Y	0.086	0.025	0.072	0.098	0.058	0.080	0.038	0.163	0.032	0.010	0.045
Pb	0.027	0.026	0.026	0.024	0.029	0.027	0.028	0.025	0.027	0.025	0.027
Ce	0.006	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001	0.002	0.007	0.003	0.005
Total	1.053	1.036	1.047	1.049	1.047	1.051	1.041	1.069	1.04	1.031	1.043

Structural formula calculated on the basis of O = 2 atoms per formula unit (*apfu*). -: below detection limits. WF: intergrown with fergusonite-(Y); WZ: intergrown with zircon; IZ: inclusion in zircon. Electron-microprobe data.

Состав уранинита  
в редкометалльных  
гранитах  
Рудных Гор, Германия

Состав акцессорного  
уранинита в гранитах  
Южного Китая

# Граниты. Уранинит $(U,Th,Ce)O_2$ и торит $(Th,U,Ce)[SiO_4]$

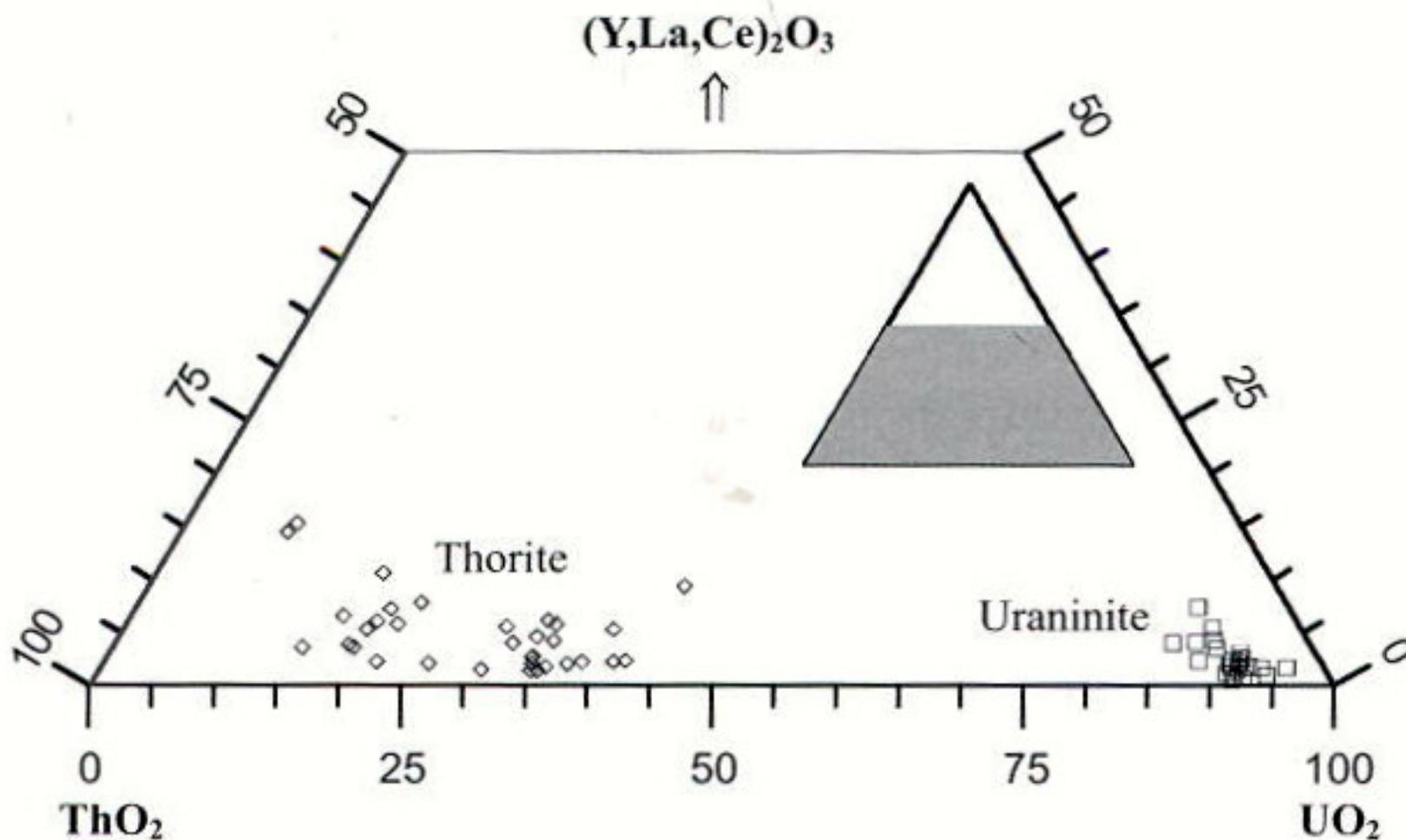


FIG. 10. Plot of compositions of thorite and uraninite in the triangular diagram  $ThO_2 - UO_2 - (Y,La,Ce)_2O_3$  (wt%).

Состав акцессорных уранинита и торита в высокорadioактивных гранитах Южного Китая

# Граниты. Торит (Th,U,Ce)[SiO<sub>4</sub>]

TABLE 5. REPRESENTATIVE COMPOSITIONS OF THORITE FROM THE XIHUASHAN GRANITIC COMPLEX, CHINA

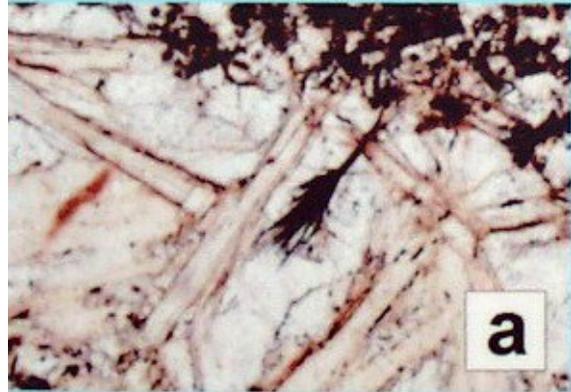
	G-a			G-b														G-c
	1 IZ	2 D	3 D	4 D	5 WZ	6 IZ	7 IZ	8 WZ	9 D	10 D	11 IZ	12 IZ	13 IZ	14 Sec	15 Sec	16 Sec	17 Sec	18 IZ
SiO <sub>2</sub> wt%	16.53	14.38	14.82	14.82	14.41	16.56	17.41	15.64	15.90	15.50	16.82	16.02	14.97	16.52	16.64	18.22	16.72	15.48
UO <sub>2</sub>	25.00	15.59	16.69	15.05	25.01	27.55	29.91	15.28	11.48	15.27	26.30	32.83	30.96	26.22	26.47	24.49	25.58	22.58
ThO <sub>2</sub>	49.88	61.68	55.06	61.38	51.78	50.61	48.44	58.27	60.68	53.35	48.18	45.45	43.23	47.09	46.13	45.14	46.98	49.74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.89	1.49	2.72	1.35	2.98	1.71	1.19	1.29	1.42	2.11	2.32	1.46	3.32	1.28	1.37	0.25	1.18	0.93
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10	2.90	4.17	2.82	4.41	2.19	1.59	3.76	2.62	5.30	3.54	1.79	4.03	1.02	1.29	1.84	1.02	1.03
PbO	1.08	0.21	0.28	0.16	0.20	1.10	1.10	0.18	0.22	0.17	0.33	1.08	0.80	0.13	0.21	0.14	0.18	0.30
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0.02	-	-	-	0.08	0.06	-	0.03	-	0.06	-	0.01	-	-	-
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0.24	0.19	0.09	0.04	0.03	0.24	0.01	0.01	-	-	0.04	0.04	-	0.04	-	0.03
CaO	0.17	0.38	0.36	0.37	0.31	-	0.07	0.39	0.59	0.40	0.78	0.56	0.45	0.24	0.25	0.15	0.23	2.09
Total	97.65	96.63	94.33	96.16	99.19	99.75	99.73	95.13	92.97	92.11	98.28	99.19	97.85	92.53	92.36	90.28	91.90	92.18
Si <i>apfu</i>	0.903	0.833	0.833	0.855	0.787	0.899	0.943	0.889	0.916	0.878	0.901	0.896	0.815	0.949	0.953	1.043	0.963	0.942
U	0.304	0.201	0.209	0.193	0.304	0.333	0.361	0.193	0.147	0.192	0.314	0.409	0.375	0.335	0.337	0.312	0.328	0.306
Th	0.620	0.812	0.703	0.805	0.643	0.624	0.597	0.753	0.795	0.687	0.587	0.578	0.535	0.616	0.600	0.588	0.615	0.688
P	0.087	0.073	0.129	0.066	0.138	0.079	0.054	0.062	0.069	0.101	0.105	0.069	0.153	0.062	0.066	0.012	0.057	0.048
Y	0.090	0.089	0.125	0.087	0.128	0.063	0.046	0.114	0.080	0.160	0.101	0.053	0.117	0.031	0.039	0.056	0.031	0.033
Pb	0.016	0.003	0.004	0.002	0.003	0.016	0.016	0.003	0.003	0.003	0.005	0.016	0.012	0.002	0.003	0.002	0.003	0.005
La	-	-	-	0.001	-	-	-	0.002	0.001	-	0.000	-	0.001	-	0.000	-	-	-
Ce	-	-	0.005	0.004	0.002	0.001	0.001	0.005	0.000	0.000	-	-	0.001	0.001	-	0.001	-	0.001
Ca	0.010	0.024	0.021	0.023	0.018	-	0.004	0.023	0.036	0.024	0.045	0.034	0.026	0.015	0.015	0.009	0.014	0.136
Total	2.030	2.035	2.029	2.036	2.023	2.015	2.022	2.044	2.047	2.045	2.058	2.055	2.035	2.011	2.013	2.023	2.011	2.159
USiO <sub>4</sub>	31.06	18.46	20.36	17.92	28.42	33.63	36.94	18.33	14.65	18.73	31.63	40.23	37.16	34.26	34.73	32.77	33.84	30.08
ThSiO <sub>4</sub>	60.18	73.44	67.27	73.73	59.53	60.21	58.51	70.40	77.38	65.93	58.31	54.72	51.42	62.49	61.25	61.29	62.95	66.61
YPO <sub>4</sub>	8.76	8.10	12.37	8.35	12.05	6.16	4.55	11.27	7.97	15.35	10.06	5.05	11.42	3.24	4.03	5.94	3.21	3.31

Structural formula calculated on the basis of O = 4 atoms per formula unit (*apfu*). -: below detection limits. IZ: inclusion in zircon; D: discrete grain, WZ: associated with zircon, Sec: Secondary crystal. Electron-microprobe data.

Состав акцессорного торита в  
высокорadioактивных гранитах Южного Китая

# Граниты. Колумбит $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}) (\text{Nb}, \text{Ti}, \text{W}, \text{Ta})_2\text{O}_6$

## MAGMATIC ORES



**a**



**b**

**c**

	TiO <sub>2</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	WO <sub>3</sub>
42	4,79	12,32	54,39	6,40
43	4,32	10,47	54,56	8,16
44	2,67	16,23	48,15	9,13
45	3,03	11,55	50,88	10,33
46	2,90	17,17	48,84	9,04
47	3,58	11,13	49,30	11,31
48	2,68	11,70	39,59	18,06

Texture and chemistry of columbite in the UST proves its magmatic origin. Fan-like aggregate of columbite grows from the older mica-rich zone to the melt (a).

While solubility of Nb and Ta depends on Li-content of the melt (Linnen 1998), crystallisation of zinnwaldite promoted saturation of Nb and Ta in melt and rapid crystallisation of columbite.

Состав колумбита в богатых F и P редкометальных гранитах Рудных Гор, Чехия

Size of the aggregate is 1.5 mm.

Редкометальные граниты Абу-Булакского интрузива (Сибирь) содержат Та-Mn колумбит с 7-9.5 и до 24 масс. % WO<sub>3</sub>

**Высокоглинозёмистые граниты.  
Мусковит, кордиерит – секанинаит (феррокордиерит)  
 $(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_3[\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$  и Mn - альмандин**



Варисциды Центральной Европы

# Высокоглинозёмистые граниты.

Мусковит, кордиерит – секанинаит (феррокордиерит)

$(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_3[\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$  и Mn - альмандин



Варисциды Центральной Европы

# Высокоглинозёмистые граниты.

Мусковит, кордиерит – секанинаит (феррокордиерит)

$(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_3[\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$  и Mn - альмандин



Варисциды Центральной Европы

# Высокоглинозёмистые граниты. Акцессорный гранат альмандин - спессартин

TABLE 3. COMPOSITION OF ZONED SPESSARTINE CRYSTALS FROM THE G-c GRANITE AT XIHUASHAN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
MgO wt%	-	-	-	0.01	-	-	-	-	0.04	-	-	-	0.01	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.55	19.38	20.46	19.36	20.58	19.06	20.92	20.61	18.93	20.33	18.75	19.91	19.12	20.87
SiO <sub>2</sub>	36.21	35.43	36.01	35.09	36.33	35.23	35.92	36.22	35.06	36.33	34.65	35.60	35.07	36.01
CaO	0.76	1.37	0.62	1.37	0.77	1.46	0.62	0.66	1.76	0.66	2.22	1.14	1.54	0.63
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	0.02	0.03	-	0.03
MnO	22.35	21.01	22.40	22.79	22.78	22.24	22.54	22.25	22.31	23.43	21.99	22.25	23.26	23.24
FeO	20.86	20.40	20.62	17.92	19.95	18.34	20.40	21.12	17.64	20.56	18.23	19.59	17.55	19.73
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.29	1.58	0.18	2.14	0.12	1.99	0.05	0.06	2.32	0.06	2.17	0.91	1.71	0.21
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	-	0.12	0.11	0.18	0.18	-	-	-	-	0.17	-	0.26	-
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.04	0.04	0.35	-	0.08	-	0.09	0.13	0.04	-	0.15	0.25	0.15
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.13	0.09	0.26	-	0.28	-	-	0.19	-	0.19	0.09	0.15	0.06
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	0.53	-	0.79	0.03	0.54	0.10	0.18	0.84	0.10	0.48	0.13	0.39	0.20
Total	101.61	99.88	100.54	100.17	100.74	99.41	100.55	101.19	99.21	101.49	98.87	99.81	99.31	101.14
Mg <i>apfu</i>	-	-	-	0.001	-	-	-	-	0.005	-	-	-	0.001	-
Al	1.985	1.917	1.991	1.921	1.993	1.899	2.030	1.993	1.892	1.963	1.883	1.958	1.907	2.020
Si	2.967	2.973	2.973	2.953	2.985	2.977	2.958	2.972	2.972	2.977	2.952	2.971	2.967	2.956
Ca	0.067	0.123	0.055	0.123	0.068	0.132	0.055	0.058	0.160	0.058	0.202	0.102	0.139	0.056
Cr	-	-	-	-	-	0.001	-	-	-	-	0.002	0.002	-	0.002
Mn	1.551	1.493	1.567	1.624	1.586	1.592	1.572	1.546	1.602	1.626	1.587	1.573	1.667	1.616
Fe	1.429	1.431	1.424	1.261	1.371	1.296	1.405	1.449	1.250	1.409	1.299	1.368	1.241	1.355
Y	0.013	0.070	0.008	0.096	0.005	0.089	0.002	0.003	0.104	0.003	0.099	0.040	0.077	0.005
Gd	0.004	-	0.003	0.003	0.005	0.005	-	-	-	-	0.005	-	0.007	-
Dy	0.006	0.001	0.001	0.009	-	0.002	-	0.002	0.003	0.001	-	0.004	0.007	0.004
Er	0.001	0.004	0.002	0.007	-	0.007	-	-	0.005	-	0.005	0.002	0.004	0.002
Yb	0.005	0.013	-	0.020	0.001	0.014	0.002	0.004	0.022	0.002	0.012	0.003	0.010	0.005
Total	8.028	8.025	8.024	8.018	8.014	8.014	8.024	8.027	8.015	8.039	8.046	8.023	8.027	8.025
Sps	50.90	49.00	51.43	53.97	52.43	52.71	51.85	50.65	53.09	52.58	51.40	51.70	54.67	53.40
Alm	46.90	46.96	46.75	41.91	45.34	42.91	46.34	47.46	41.44	45.55	42.05	44.94	40.72	44.76
Pyr	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
Grs	2.20	4.04	1.80	4.09	2.23	4.37	1.80	1.89	5.30	1.87	6.55	3.36	4.57	1.84

Ядра  
кристаллов  
граната  
обогащены  
иттрием и  
иттербием

Состав акцессорного граната в  
высокорadioактивных гранитах Южного Китая

**Золотая  
осень**

