

**А.Е. Ферсман по дороге на гранитные пегматиты  
Борщовочного кряжа, Восточное Забайкалье**



Имя

Александра Евгеньевича

Ферсмана

навсегда связано с проблемами

гранитных пегматитов

Все типы гранитных пегматитов - остаточные дифференциаты малого объёма в гранитоидных плутонах, камерные в верхней части гранитных тел или жильные в материнском плутоне и в их кровле в породах рамы, или палингенные, не связанные с массивами гранитоидов, - суть пегматиты по А.Е. Ферсману, т.е. продукты кристаллизации флюидонасыщенного магматического расплава гранитного или лейкогранитного состава

**Э.М. Спиридонов**

**058. МИНЕРАЛОГЕНЕЗ**

**ГРАНИТНЫХ ПЕГМАТИТОВ.**

**Редкометальные  
гранитные пегматиты.**

**1 часть**

# Гранитные пегматиты

Гранитные пегматиты формируются в условиях закрытой системы в обстановке сжатия. Известны гранитные пегматиты двух петрогенетических типов. Их источники : 1) остаточные магматические дифференциаты малого объёма; 2) палингенные расплавы. Гранитные пегматиты возникают при  $P_{H_2O} \geq 1$  кбар и до 6-10 кбар, т.е. на глубинах более 2-3 км и до 25-30 км.

**1 тип.** Гранитные пегматиты – продукты кристаллизации остаточных анхизотических магматических дифференциатов, насыщенных летучими ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $HF$ ,  $HCl$ ,  $H_3BO_3$ ,  $H_3PO_4$ ...). Они тесно сопряжены с интрузивами гранитоидов – внутриинтрузивные (шлировые, камерные, жильные) обычно в верхней эндоконтактовой зоне в куполах и иных выступах кровли плутонов, часто в надинтрузивной зоне (жильные и трубообразные). Изотопный возраст пегматитов близок возрасту материнских гранитоидов: U-Pb возраст пегматитоносных гранитов Колмозеро (Кольский п-ов) 2520 млн. лет, танталлита гранитных пегматитов  $2518 \pm 9$  млн. лет; для Выборгского плутона гранитов-рапакиви гранитов 1631-1634 млн. лет, пегматитов  $1628 \pm 3$  млн. лет. Характерно зональное расположение и зональность состава тел пегматитов относительно материнского гранитного плутона.

Гранитные пегматиты не дифференцированные, наиболее распространены, состоят из графической зоны с или без оторочки жильных гранитов или аплитов, у более глубинных таких оторочек нет.

Гранитные пегматиты дифференцированные состоят из аплитовой оторочки и зон графической, блоковой – блоковых полевых шпатов, кварцевого ядра  $\pm$  различные зоны замещений. обычно на границах блоковых полевошпатовых зон и кварцевого ядра.

# Гранитные пегматиты – зональность относительно плутонов материнских гранитов

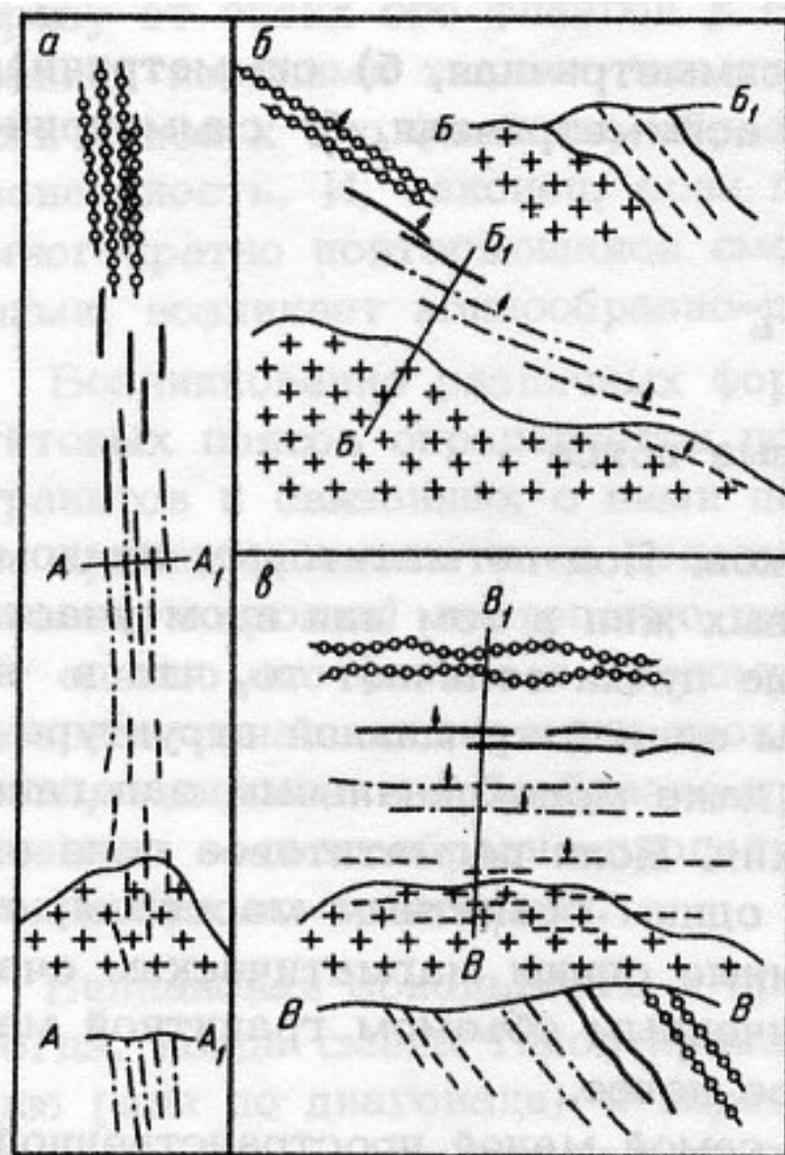


Рис. 17. Схема продольной (а), диагональной (б) и поперечной (в) зональности пегматитовых пучков.

Пегматиты: 1 – альбит-сподуменовые, 2 – альбитовые, 3 – микроклиноальбитовые и сподумен-микроклиноальбитовые, 4 – микроклиновые и безрудные; 5 – материнские граниты



# Гранитные пегматиты – зональность относительно плутонов материнских гранитов

Материнский плутон гранитов расположен несколько ниже отметки 1500 метров – на дне ущелья

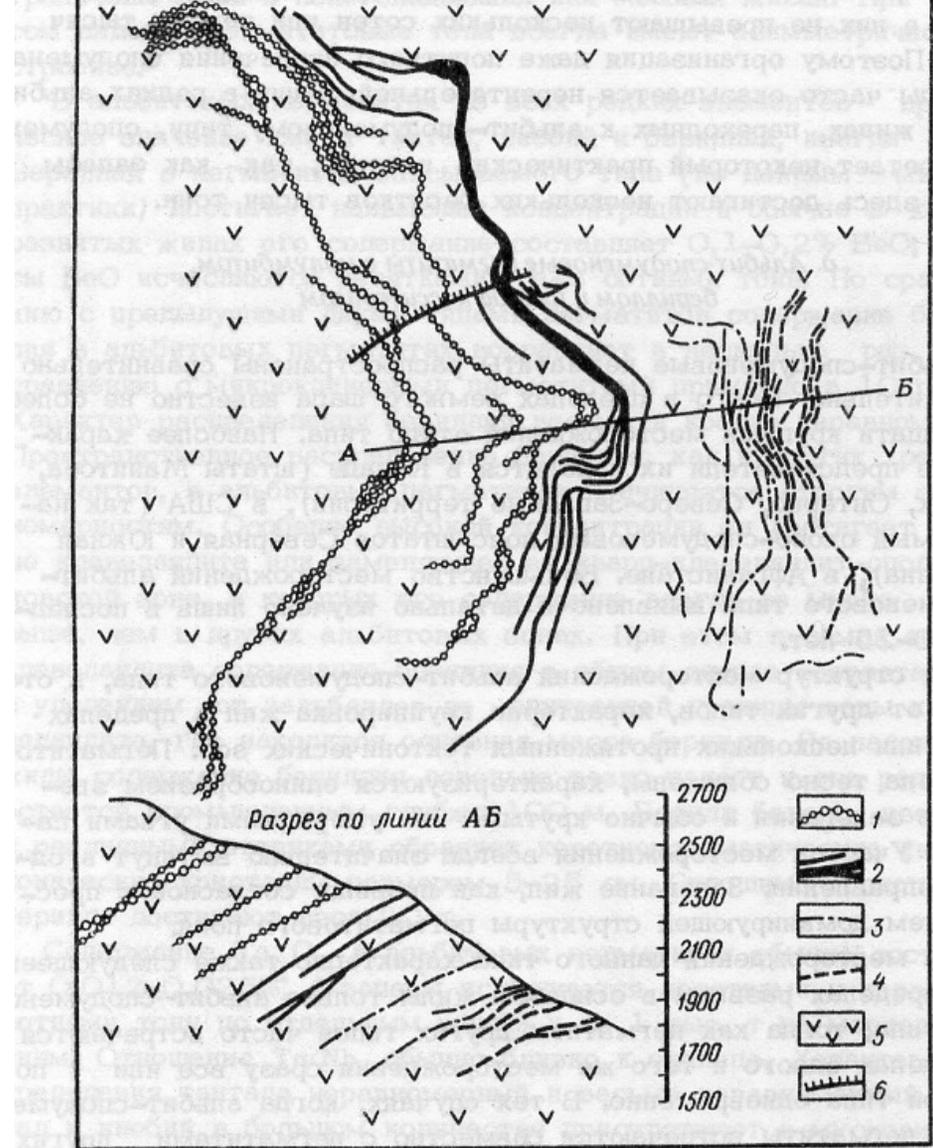


Рис. 14. Схема зональности пегматитового пучка (месторождение Дарае-Пич, Афганистан). По В. М. Народному, Н. А. Солодову и А. В. Трифонову [1964 г.].

Пегматиты: 1 – альбит-сподуменовые с большим количеством микроклина и убогой примесью касситерита, берилла, колумбита, 2 – существенно альбитовые с редким сподуменом, мелкокрапленным бериллом и танталит-колумбитом, 3 – микроклин-альбитовые с рудоразборным бериллом и танталит-колумбитом, 4 – существенно микроклиновые с редким бериллом; 5 – биотит-амфиболовые диориты; 6 – тектонические нарушения

# Гранитные пегматиты – зональность относительно плутонов материнских гранитов

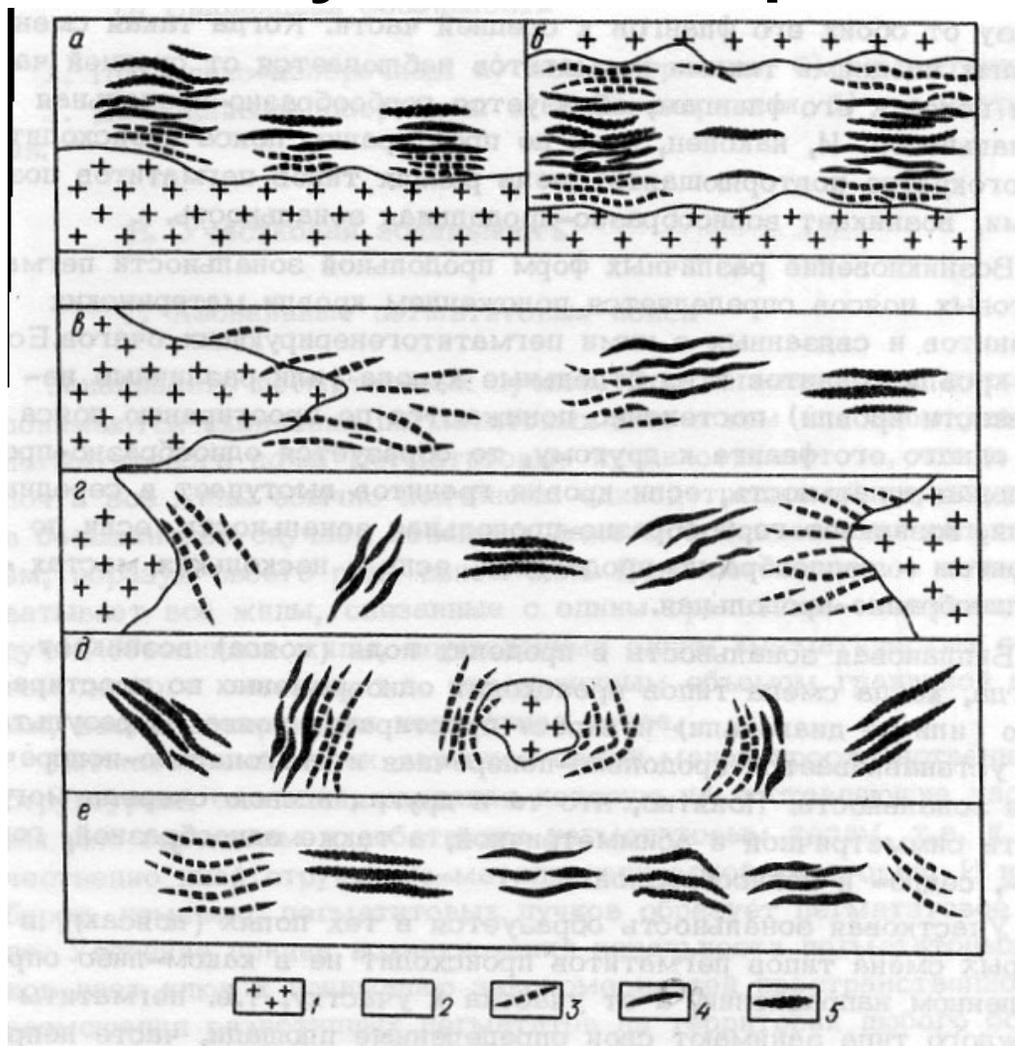
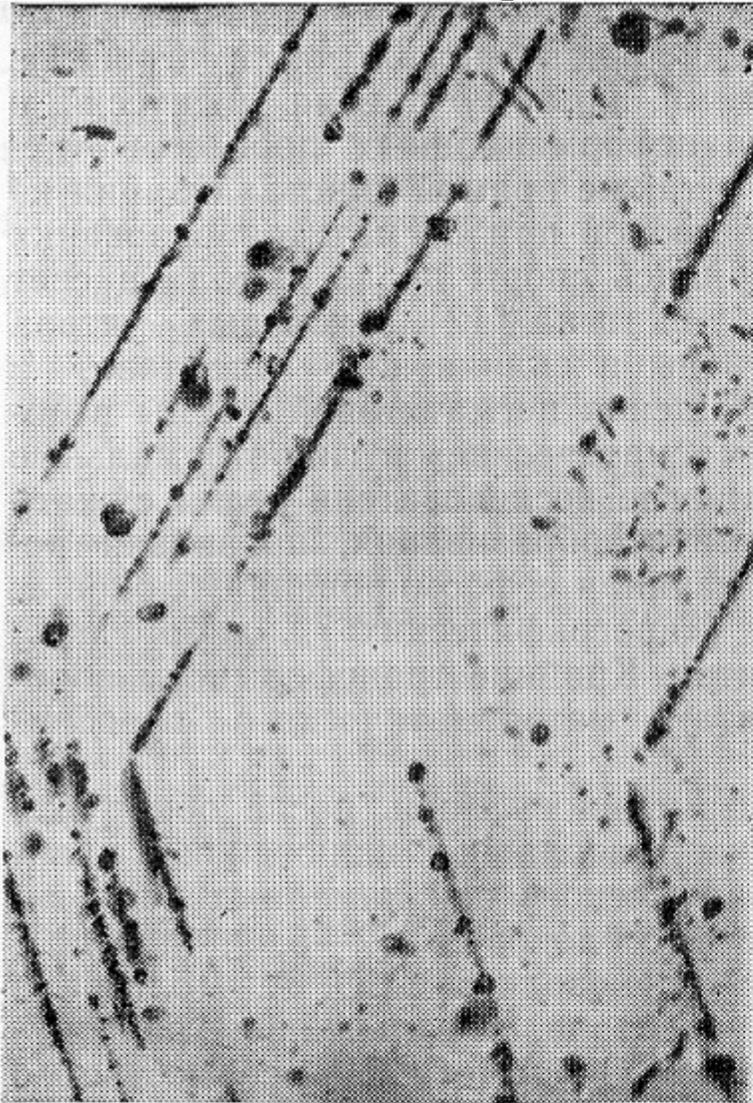


Рис. 16. Типы зональности пегматитовых поясов и полей:

*а* – асимметрично-поперечная, *б* – симметрично-поперечная, *в* – однообразно-продольная, *г* – седлообразно-продольная, *д* – горбообразно-продольная, *е* – волнообразно-продольная.

1 – материнские граниты; 2 – вмещающие породы; 3 – безрудные и микроклиновые пегматиты; 4 – микроклин-альбитовые и сподумен-микроклин-альбитовые пегматиты; 5 – альбит-сподуменовые пегматиты

# Гранитные пегматиты



Раскристаллизованные расплавные включения в кварце гранитных пегматитов (Бакуменко, 1983)

*Рис. 1.* Расположение раскристаллизованных включений по зонам роста пегматоидного кварца. Камерные пегматиты гранитного массива Бектау-ата (Прибалхашье). Ув. 76.

*Рис. 2.* Азонально расположенная группа раскристаллизованных включений в ихтиоглипте кварца. Зона графических агрегатов в камерных пегматитах Кыринского гранитного массива (Читинская обл.). Ув. 480.

# Гранитные пегматиты – природные автоклавы

На магматической “автоклавной” стадии при формировании графической, блоковых зон и кварцевого ядра тела гранитных пегматитов - закрытые системы, в значительной степени термостатированные. Небольшой термический градиент всё же был, что создавало возможности для химических транспортных реакций с небольшим количеством вещества растворителя – переносчика. Наличие газовых пустот обеспечивало некоторый градиент давлений внутри пегматитового «автоклава», дополнительный фактор движения флюидов. Концентрация солей в  $H_2O$  и  $H_2O - CO_2$  флюидах составляла 40 и более масс. %, это – хлориды K, Na, Fe, Ca, фториды и алюмофториды K и Na, бораты K, Na, Li, борофториды K и Cs... Крупные до огромных размеры кристаллов полевых шпатов (до 25 м), кварца (до 15 м), сподумена (до 12 м), берилла (до 18 м), мусковита (до 6 м), топаза (до 1.5 м) и их исключительные качества свидетельствуют о чрезвычайно медленной скорости их кристаллизации. Термостатирование и фракционная кристаллизация пегматитовых расплавов-растворов обеспечили поразительную степень дифференциации вещества. Собственные минералы образуют даже те химические элементы, которые в стандартных процессах полностью маскированы в минералах распространённых элементов: гафнон  $Hf[SiO_4]$ , поллуцит  $Cs[AlSi_2O_6]$ , рубиклин  $Rb[AlSi_3O_8]$ , черниит  $Cu_2CdSnS_4$ . Яркий пример – аммониевый полевой шпат баддингтонит в пегматитах. Кларк азота в гранитах первые г/т. Азот ( $NH_4^+$ ) должен был рассеяться в калишпатах и слюдах. Ан нет !

# Классификация гранитных пегматитов

Поскольку главное в генезисе пегматитов – поведение летучих, постольку ведущий параметр их классификации – давление (глубинность формирования).

I. Гранитные пегматиты относительно низких давлений при начальном минералообразовании – 1-2 кбар, - миароловые или кристаллоносные.

**II. Гранитные пегматиты умеренных давлений при начальном минералообразовании – 2-4 кбар, - редкометальные.**

III. Гранитные пегматиты повышенных давлений при начальном минералообразовании – 4-6 кбар, - редкометально-мусковитовые.

IV. Гранитные пегматиты высоких давлений при начальном минералообразовании – 6-10 кбар, - мусковитовые,  
уран-редкоземельные,  
керамические.

С ростом давления заметно меняется состав кварц-полевошпатовых котектик: кварц - К-На полевой шпат – 1 кб ~ 40 % кварца, 2 кб ~ 35 % кварца, 4 кб ~ 30 % кварца; кварц – олигоклаз – 1 кб ~ 47 % кварца, 2 кб ~ 43 % кварца, 5 кб ~ 40 % кварца, 10 кб ~ 25 % кварца.

# Классификация гранитных пегматитов. Černý, 2002

## Геологический класс :

Умеренных глубин редкометальные пегматиты, квазиконформные до секущих тела среди метаморфитов андалузит - силлиманитового типа;

$T \sim 550 - 650^{\circ} C$ ,  $P \sim 2-4$  кб.

## Главное петрогенетическое семейство редкоэлементных гранитных пегматитов :

Литий - цезий - танталовые, генерируемые умеренно-глиноземистыми до крайне высокоглинозёмистыми гранитами S-типа синорогенные и позднеорогенные.

В составе их флюидной фазы масса фтора, бора, фосфора, лития, рубидия, цезия... Флюидные включения в минералах редкометальных пегматитов содержат микрокристаллы сассолина (борной кислоты)  $H_3BO_3$ ,

.....раманита-(Rb)  $RbB_5O_8 \cdot 4H_2O$ ,

раманита-(Cs)  $CsB_5O_8 \cdot 4H_2O$

# **Классификация гранитных пегматитов. Černý, 2002**

**5 типов редкоэлементных гранитных пегматитов :**

- 1. Редкоземельный тип, ортитовый и гадолинитовый подтипы  
(REE, Y, U, Th, Be, Nb > Ta, Ti, Zr, F).**
- 2. Берилловый тип, берилл - колумбитовый и берилл – колумбит - фосфатный подтипы  
(Be, Nb ~ Ta, P ± Sn, B, Li).**
- 3. Комплексный тип, сподуменовый, петалитовый, лепидолитовый, амблигонитовый, эльбаитовый подтипы  
(Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ta > Nb, P, B, F).**
- 4. Альбит - сподуменовый тип (Li, Sn, Be, Ta ~ Nb, B).**
- 5. Альбитовый тип (Ta ~ Nb, Be ± Li, Sn, B).**

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ



114x70 мм.

Урал.

89x59 мм



# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ



Средний Урал. Колл. О.К. Иванова. Фото Н.Н. Жукова

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Амазонит типичен для многих гранитных пегматитов с редкометальной минерализацией



Фото ЭМС



Nissedal,  
Норвегия

Ортит в кварце



49x38 мм



Пегматиты с амазонитом и крупными кристаллами ортита. Перевальное, Прибайкалье

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Амазонит (щелочной полевой шпат). Редкометальные пегматиты содержат поделочный амазонит (Россия, Бразилия, Индия, США, Канада...). Амазонит образуется только в кислой среде, когда практически нет  $Fe^{3+}$ , - причины стандартной красной окраски K-Na полевых шпатов. Самое крупное в России месторождение амазонита – Западно-кейвское расположено в центре Кольского полуострова. Это серия мощных крутопадающих жил пегматитов зонального строения (г. Парус, г. Плоская). Полевошпатовая зона этих пегматитов сложена ярким зелёным и синевато-зелёным амазонитом. Нередки большие  $> 1 \text{ м}^3$  кристаллы амазонита с крупными лейстами снежно-белого альбита (структуры распада твёрдого раствора и продукты их переотложения).

Замечательным синеватым амазонитом богаты некоторые тела пегматитов Ильменских гор; из этого камня изготовлены вазы, он широко использован при создании “каменной” карты Советского Союза в Эрмитаже.

# Амазонит

Особый интерес представляет содержание в щелочных полевых шпатах свинца. Эти минералы – главные носители свинца в земной коре, его среднее содержание в полевых шпатах около 30 г/т. Поздние полевые шпаты гранитов и гранитных пегматитов – амазониты содержат от 100 до 500 г/т свинца и более. Именно свинец – причина амазонитовой окраски.

**Интенсивно окрашенные амазониты – всегда образования эпигенетические, - продукты процесса амазонитизации.** Это впервые установил акад. А.Н. Заварицкий по наблюдениям в Ильменском заповеднике. Мне представляется, что амазонит возникает путем высокоТ ионного обмена, внедрения ионов свинца в структуру пол.шп.

Тонкие физические исследования показали, что голубая – синеватая окраска амазонита обусловлена наличием ионов трёхвалентного свинца, а зелёная окраска амазонита обусловлена наличием ионов одновалентного свинца (Julg, 1998). Таким образом, зелёный амазонит – индикатор высокой кислотности = восстановленности среды минералообразования. Минералогические наблюдения хорошо коррелируются с этим, - с зелёным амазонитом часто ассоциируют топаз или фенакит.

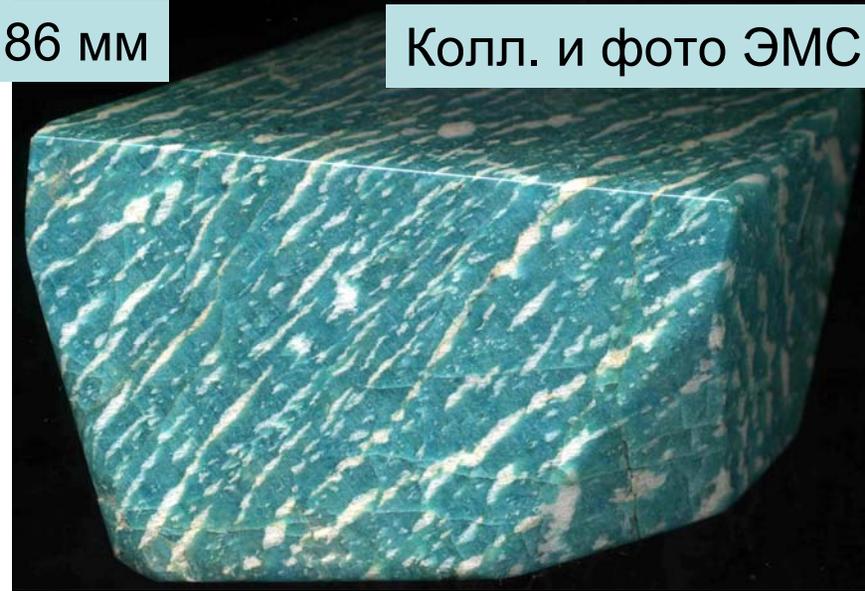
# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Амазонит



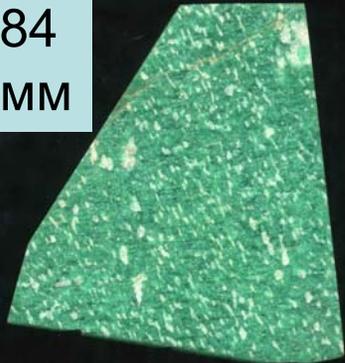
86 мм

Колл. и фото ЭМС

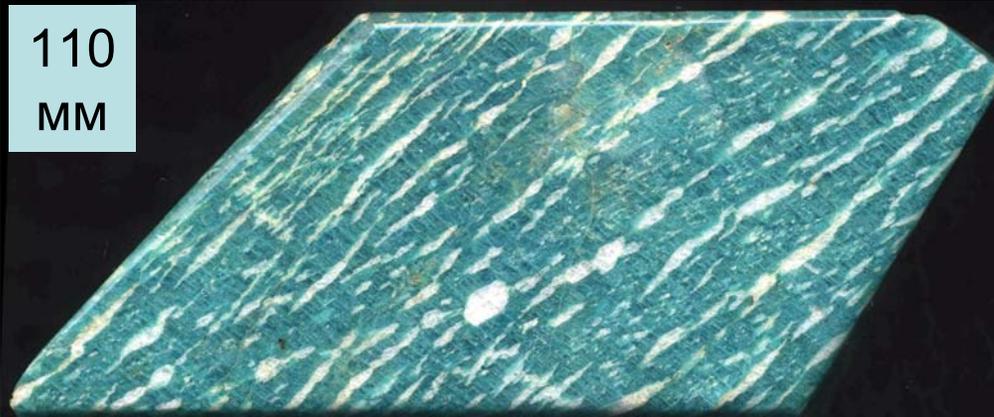


Пегматиты с гигантскими до первых м<sup>3</sup> кристаллами амазонита. Гора Парус, Кейвы, Кольский полуостров

84  
мм



110  
мм

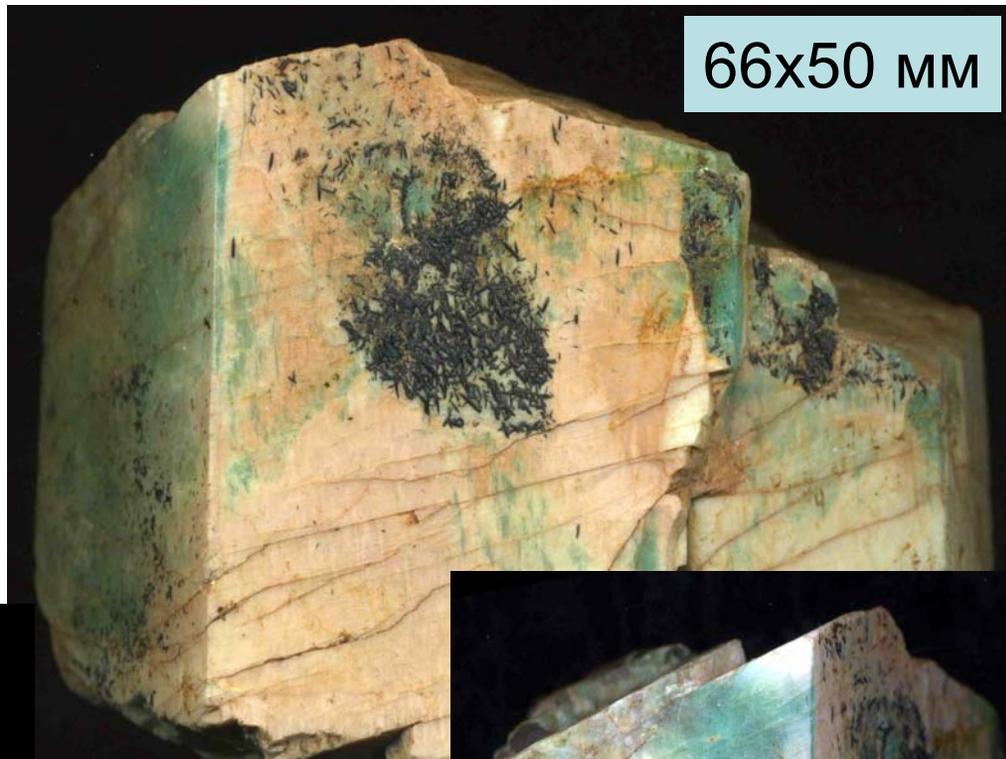


15 мм

# Амазонитизация



Микроклин локально  
amazonитизирован.  
Мадагаскар



66x50 мм

Микроклин  
частично  
amazonитизирован.  
Ильмены,  
Блюмовская копь.  
Колл. И фото  
Э.М.  
Спиридонова



32  
мм



Амазонитиз. микроклин.  
Lake George, Колорадо

53x41 мм

14x11 мм



53x39 мм

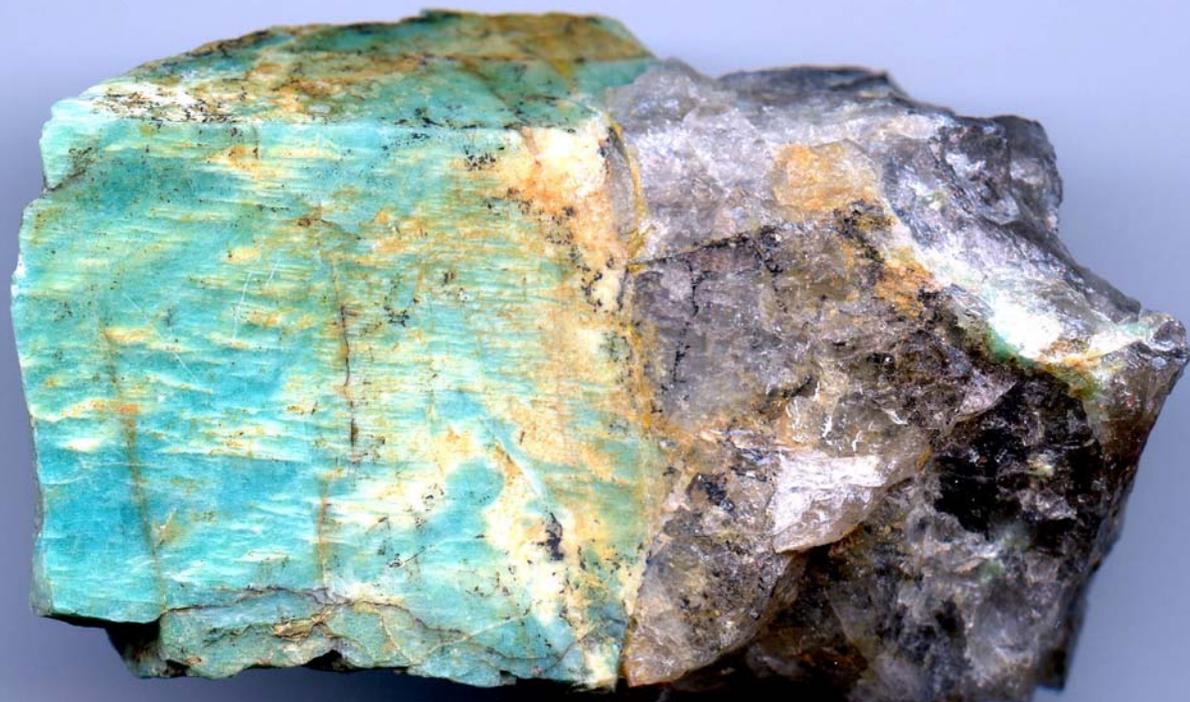


49x33 мм

# Амазонити- зация

Колл. и фото  
Э.М. Спиридонова

77x46 мм



Микроклин-пертит,  
частично  
амазонитизированный.  
Ильмены,  
Блюмовская копь

# Амазонитизация



Графические пегматиты. Микроклин частично амазонитизирован. Ильмены

# Амазонитизация

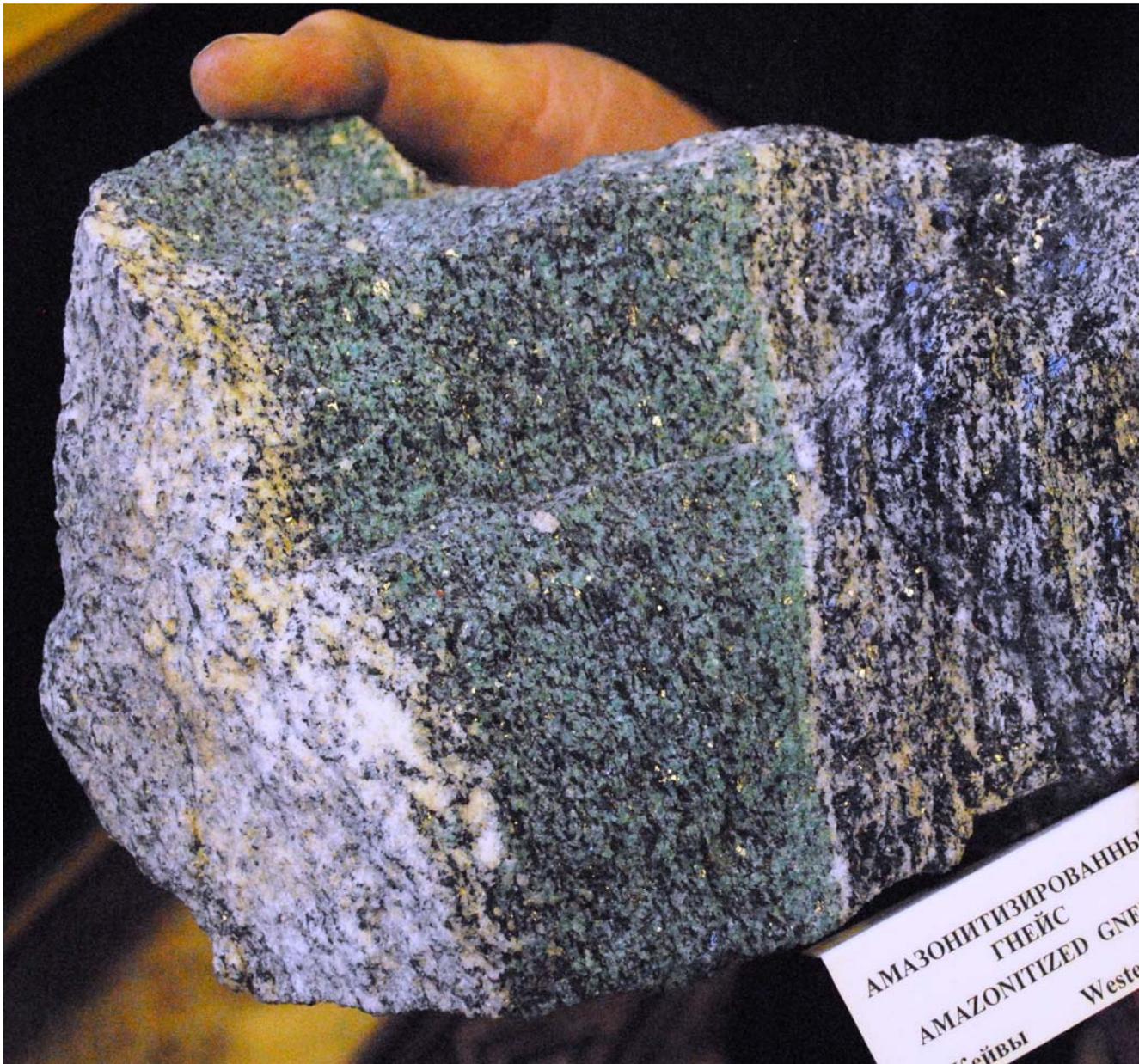
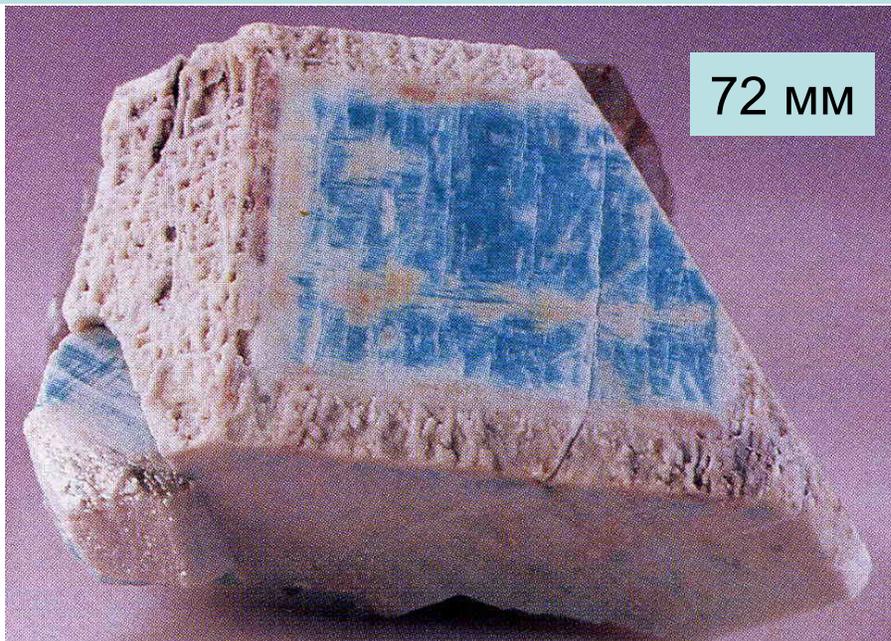


Фото Н.Н.  
Жукова  
и  
Э.М.  
Спиридонова

Амазонитизированные гнейсы на контакте с пегматитом. Кейвы

# Голубой амазонит и амазонитизация

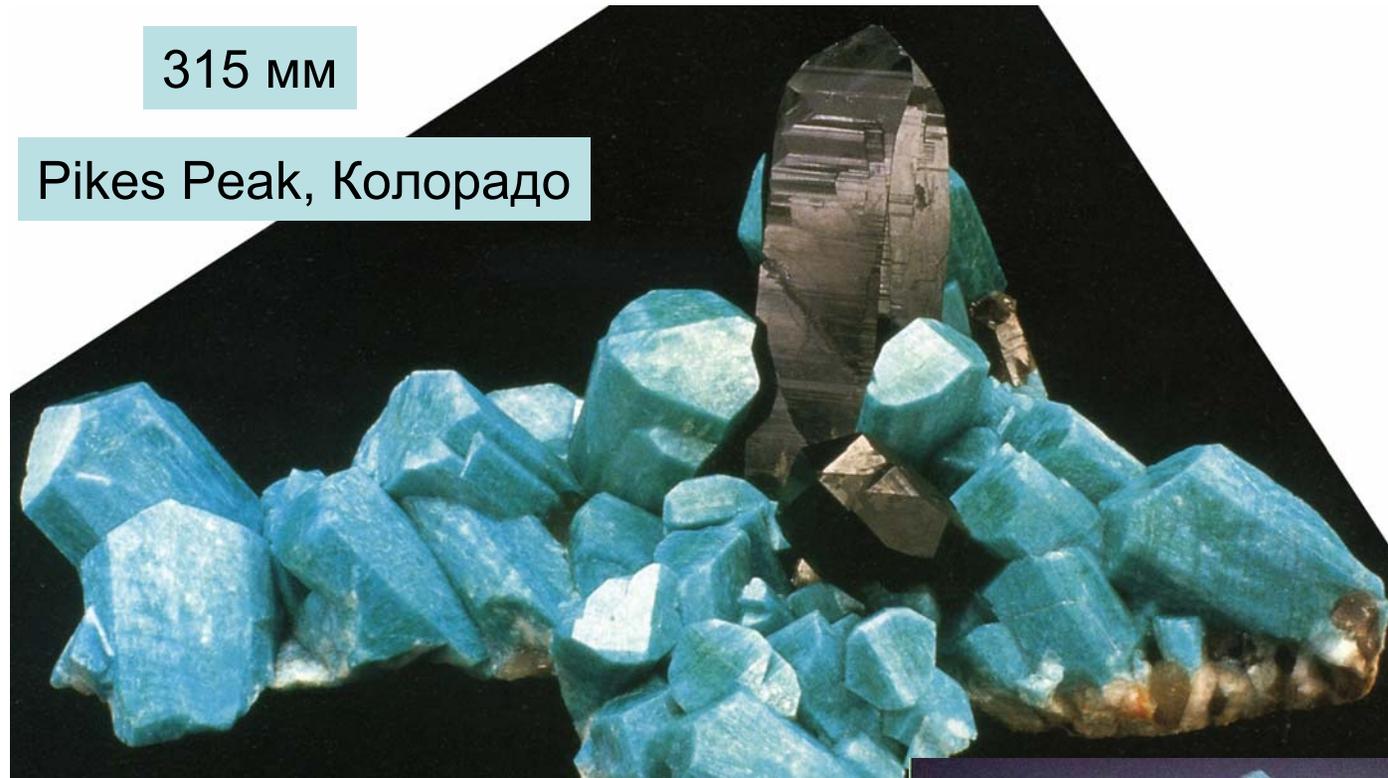
Гранитные пегматиты в батолите Pikes Peak, Колорадо, США



# Голубой амазонит

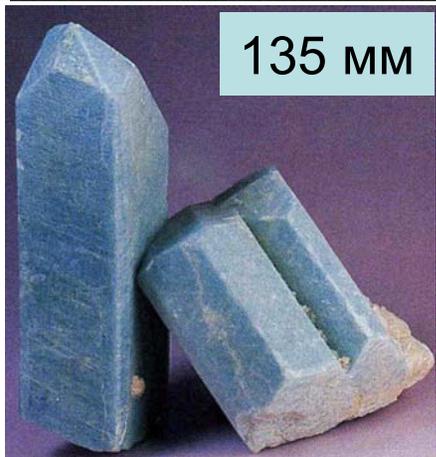
315 мм

Pikes Peak, Колорадо



Амазонит содержит 1.2 масс. % Pb

135 мм



Голубой амазонит окрашен  $Pb^{3+}$



Figure 3. Amazonite, smoky quartz, and albite, 8 × 3 × 6.5 inches Florissant, Teller County, Colorado

# Голубой амазонит



Mantena area,  
Минас Жераис, Бразилия

**Голубой  
амазонит  
окрашен  
 $Rb^{3+}$**



Амазонит, раухкварц и альбит. 140 мм.  
Lake George, Колорадо

Эфиопия, Консо-2



# Голубой амазонит

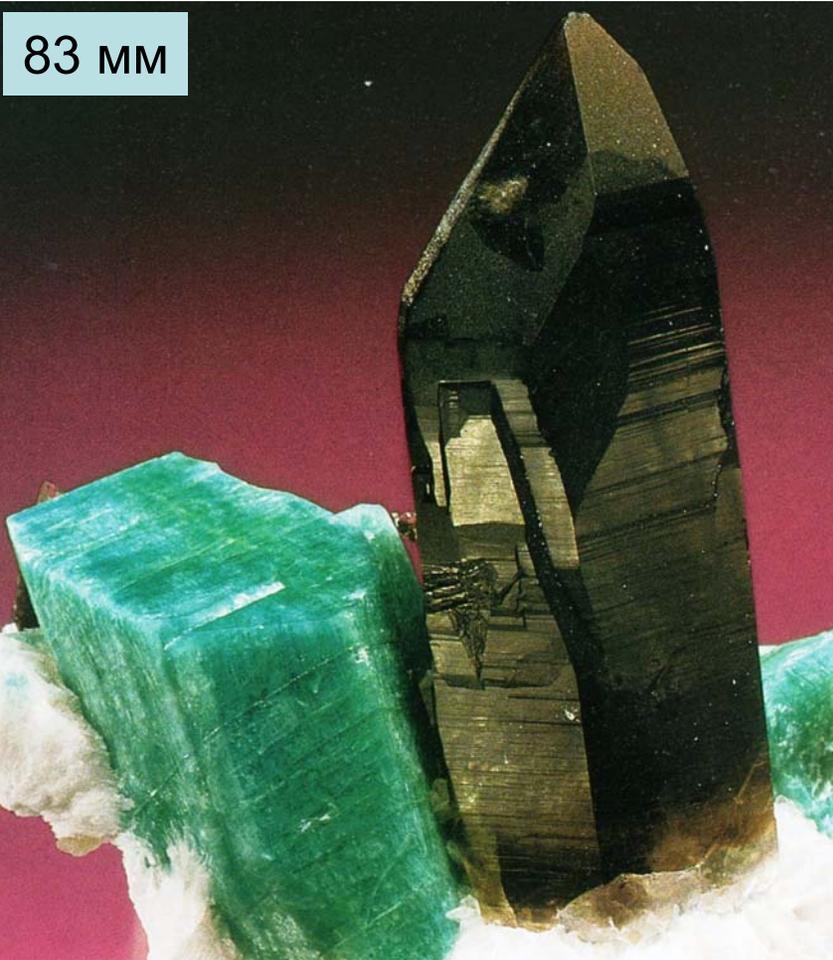
Гранитные пегматиты. Ильменские горы, Юж. Урал. Мозаика, Эрмитаж



Фото  
ЭМС

# Зелёный амазонит

Зелёная окраска амазонита обусловлена ионом  $Pb^{1+}$ , что фиксирует высокую кислотность минералообразующего флюида



83 мм

Зелёный амазонит  
+ раухкварц + альбит.  
Pikes Peak, Колорадо, США



Раух-кварц+амазонит 350 мм. Lac  
Georges, Колорадо, США

# Зелёный амазонит

Зелёная окраска амазонита обусловлена ионом  $Pb^{1+}$ , что фиксирует высокую кислотность минералообразующего флюида



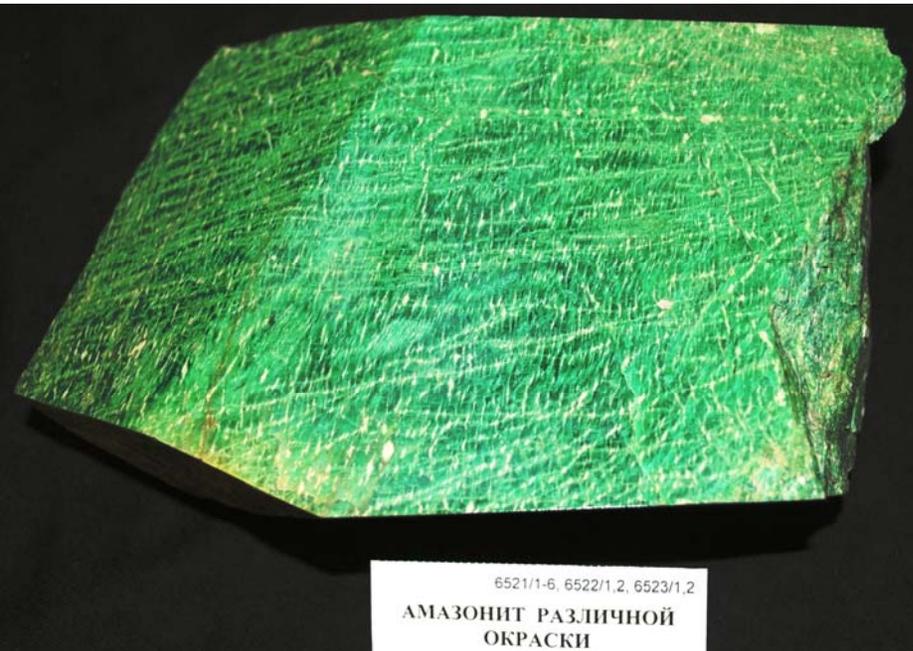
Кристалл амазонита 450 мм  
- 64 кг. Масарани, Бахия,  
Бразилия

Альбит+  
амазонит.  
Santa Maria  
de Iabira,  
Минас  
Жераис,  
Бразилия



Амазонит-микроклин-пертит 67x33 мм.  
Ильмены. Колл. и фото ЭМС

# Зелёный амазонит

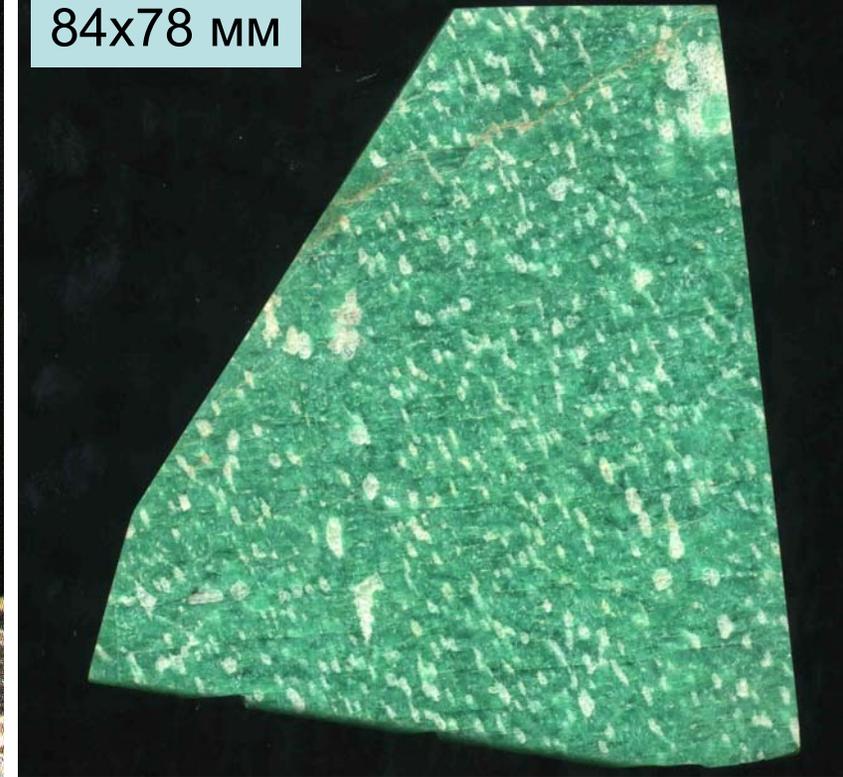


Амазонитовый микроклин-пертит. Гранитные пегматиты горы Парус. Кейвы. Кольский п-ов. Фото Н.Н. Жукова и Э.М. Спиридонова

# Зелёный амазонит



84x78 мм



Амазонитовый микроклин-пертит.  
Гранитные пегматиты горы  
Парус.  
Кейвы. Кольский п-ов

Гранитные пегматиты  
Афганистан

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## История формирования и зональность

Гранитные пегматиты отличаются сложным минеральным составом. Однако 90-95 % их массы слагают пертит (ортоклаз и микроклин), кварц, олигоклаз, сподумен, в отдельных случаях биотит, мусковит, лепидолит. По мере развития пегматитового процесса закономерно меняется состав пегматитообразующих минералов: олигоклаз (+ кварц, биотит) → пертит (+ кварц, биотит) → кварц ( $\pm$  сподумен) (магматическая стадия). Хороший геохимический индикатор для щелочных полевых шпатов – величина Rb/Ba, обычно в ходе кристаллизации она заметно возрастает. В щелочных полевых шпатах магматитов с повышенной агпаитностью, включая некоторые типы гранитных пегматитов, проявлено изоморфное замещение берлинитового типа  $\text{Si}^{4+} + \text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+} + \text{P}^{5+}$ . Такие полевые шпаты могут содержать до 1 масс. % фосфора и более. Щелочные полевые шпаты редко металлических гранитных пегматитов содержат до 1-4.5 масс. % рубидия.

Позже образуются пневмато-гидротермальные образования. Ранний замещающий комплекс – кварц-мусковитовый, нередко развит локально или по ослабленным зонам. Этот «калиевый» метасоматоз высвободил заметное количество Na, Ca, менее Fe... Мусковит содержит до 4 масс. % рубидия и 0.2 % цезия.

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## История формирования и зональность

Довольно существенные подвижки с дроблением ранее образованных минеральных агрегатов отмечены перед развитием альбитового (клеве-ландитового) замещающего комплекса. Натровый метасоматоз сопровождался концентрированием Mn, Nb и особенно Ta, Sn, Be, отчасти Cs. Альбит интенсивно замещал пертит, сподумен..., высвобождая K, Li, Rb. Поздний калиевый, калиево-литиевый, цезий-рубидий-литий-калиевый метасоматоз = лепидолитовый замещающий комплекс с поллуцитом... Поздние минеральные ассоциации наиболее широко развиты в верхних частях дифференцированных гранитных пегматитов. Здесь наиболее резко выражена их зональность с чётким кварцевым ядром, мономинеральной зоной блокового пертита и особо зонами с чешуйчатым мусковитом или лепидолитом, присутствует амазонит, повышены величины Ta/Nb, Cs/K, Cs/Rb, Rb/K, Rb/Ba, Tl/K, Hf/Zr, Mn/Fe.

Основная масса запасов Li, Cs, Rb, Ta, Nb, Sn, Be связана с альбитовыми и альбит-содержащими зонами гранитных пегматитов; меньшая со слюдяными зонами; незначительна роль в редкометальном оруденении калишпатовых зон – в них развиты только крупные кристаллы берилла.

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## История формирования и зональность

Редкометальные пегматиты – сподумен – калишпат - альбитовые, альбит - сподуменовые, существенно альбитовые с танталит - колумбитом, бериллом и минералами лития; калишпат - альбитовые с бериллом и танталитом; существенно калишпатовые (микроклиновые) с бериллом и колумбитом и иные. Рассмотрим два типа.

Наиболее важный тип промышленных редкометальных пегматитов – сподумен – калишпат -альбитовые с минералами Li, поллуцитом, танталитом и бериллом. Это единичные мощные жилы и линзы , залегающие полого ! - Бикита (Центр. Африка), Карибиб (Намибия), Танко и Монтгари (Канада), Варутреск (Швеция), Вольта Гранде (Минас Жераис, Бразилия), Вишняковское – Елаш (Саяны), Калбинские (ЮЗ Алтай). Их размеры впечатляют– длина до 1500 м, мощность до 150 м. Весьма сложный минеральный состав. Очень высокая степень дифференциации. Нередко строение пегматитов от зальбандов к центру таково: 1) неравномерно-зернистые жильные граниты; 2) графическая зона калишпат+кварц; 3) зона зернистого альбита с бериллом и колумбитом; 4) зона блокового кашпата; 5) зона кварц-мусковитовая с бериллом и танталит-колумбитом; 6) зона сахаровидного альбита с танталит-

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## История формирования и зональность

колумбитом; 7) кварц-клевеландит-сподуменовая зона с амблигонитом, петалитом, литиофиллитом, танталлатами, бериллом; 8) зона мелко пластинчатого альбита с Li-Rb-мусковитом, воджинитом, микролитом и другими танталлатами, бериллом, поллуцитом; 9) зона лепидолита с поллуцитом и микролитом; 10) зона блокового микроклина; 11) зона блокового кварца. Иногда соседние зоны сливаются до 3 – 7 зон. В ряде пегматитовых тел развиты небольшие скопления сульфидов (пирротин, халькопирит, станноидит..., теннантит, тетраэдрит, висмутин...) и самородного висмута. В этих пегматитах величина  $Ta/Nb > 1$  и до 5-10. По падению жил сподумен – калишпат - альбитовых пегматитов промышленное оруденение прослеживается на глубину в несколько сот метров. На глубину наиболее выдержанны содержания Nb, Be, Li, менее Ta и Sn, резко снижаются концентрации Rb и особо Cs.

# РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Елаш (Вишняковское), Вост. Саян

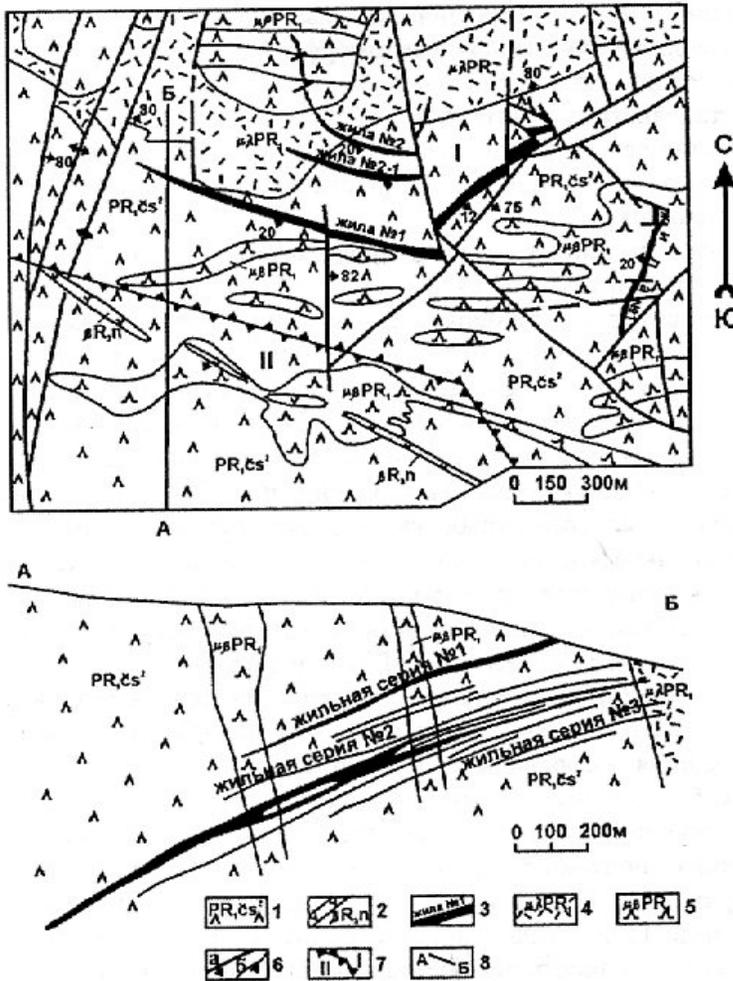


Рис. 9. Схематические геологические карта и разрез Вишняковского месторождения (по Г.М. Ерёмину и др., 1980)

1 - нижний протерозой: сублукская серия, часовенская свита (метадиабазы, метапорфиры, ортоамфиболиты); 2-3 - интрузивные породы: 2- верхний протерозой, Нерсинский интрузивный комплекс, (дайки диабазов), 3 - нижний протерозой, Саянский интрузивный комплекс, (редкометалльные пегматиты)  
 4-5 - субвулканические образования нижнего протерозоя: 4 - фельзиты, гранито-порфиры, 5 - метадиабазы, метагаббродиабазы; 6 - разрывные нарушения (а), геологические контакты (б); 7 - границы между участками месторождения: I - участок Рябиновый, II - участок Юго-Западный; 8 - линия разреза по А-Б.

13 жильных тел пегматитов – длина 300 – 2500 м, в среднем 1500 м; длина по падению 70 – 1600 м, в среднем 1100 м; мощность 2 – 33 м, в среднем 14 м.

Сподумен – воджинит – танталитовый тип руд.

Средние содержания :

Ta – 200 ppm, Nb – 70 ppm,  
 Sn – 100 ppm, Be – 200 ppm,  
 Rb – 4000 ppm, Cs – 350 ppm,  
 Li – 400 ppm.

# РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Танко, Манитоба, Канада

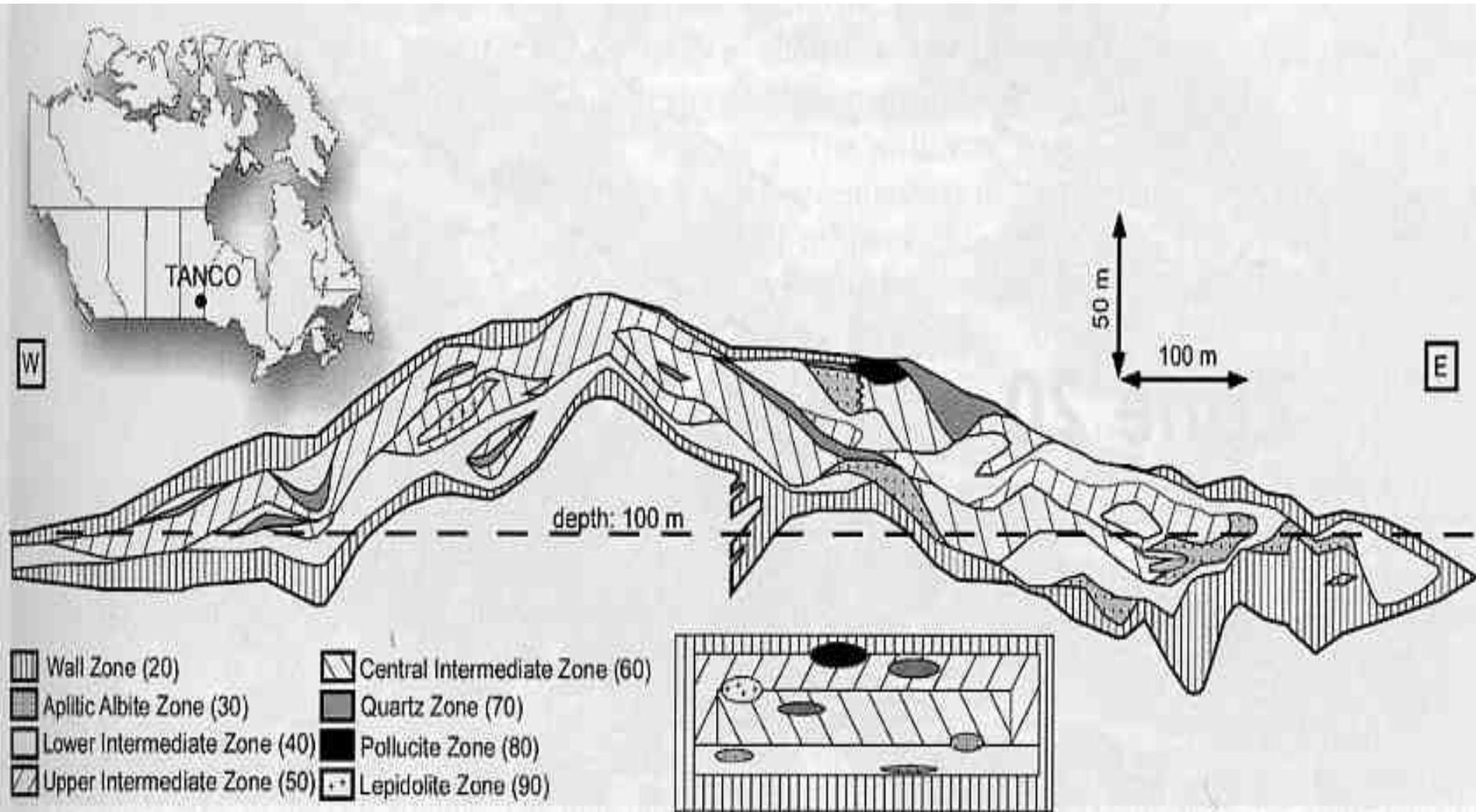


FIG. 1. East-west cross-section through the Tanco pegmatite (from Tanco geologists). A very schematic and simplified view of its zone distribution is shown beside the legend. Note that the vertical scale is doubled to allow a better view of the zonation.

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Танко, Манитоба, Канада

TABLE 1. ZONING OF THE TANCO PEGMATITE

Zones	Main constituents	Characteristic subordinate, (accessory) and [rare] minerals	Textural and structural characteristics	Geochemically important major and (minor) elements
Exomorphic Zone	Bt, Tur, Hmq	(Apy)	fine-grained reaction rims and diffuse veins	K, Li, B, (P, Rb, Cs, F)
(10) Border Zone	Ab, Qtz	Tur, Ap, (Bt), [Brl, Tph]	fine-grained layers	Na, (B, P, Be, Li)
(20) Wall Zone	Ab, Qtz, Ms, lithian Ms, Mc perthite	Brl, (Tur)	medium-grained with giant crystals of K-feldspar	K, Na, (Li, Be, F)
(30) Aplitic Albite Zone	<u>Ab</u> , Qtz, (Ms)	Ms, <u>Ta-oxide minerals</u> , Brl, (Ap, Tur, Cst), [Ilm, Zrn, sulfides]	fine-grained undulating layers, fracture fillings, rounded blebs, diffuse veins	Na, (Be, Ta, Sn, Zr, Hf, Tl)
(40) Lower Intermediate Zone	Mc perthite, Ab, Qtz, Spd, Amb	lithian Ms, Lph, [Lpd, Ta-oxide minerals, Cst]	medium- to coarse-grained heterogeneous [Ta]	K, Na, Li, P, F
(50) Upper Intermediate Zone	<u>Spd</u> , <u>Qtz</u> , <u>Amb</u>	Mc perthite, Pol, Lph, (Ab, lithian Ms), [Pet, Ecr, Ta-oxide minerals]	giant crystals of most major and subordinate minerals	Li, P, F, (K, Na, Cs, Ta)
(60) Central Intermediate Zone	<u>Mc perthite</u> , Qtz, Ab, Ms	Brl, ( <u>Ta-oxide minerals</u> ), [Zrn, Ilm, Spd, sulfides, Lph, Ap, Cst]	medium to coarse grained	K, (Na, Be, Ta, Sn, Zr, Hf, Tl)
(70) Quartz Zone	<u>Qtz</u>	[Spd, Amb]	massive, monomineralic	Si, (Li)
(80) Pollucite Zone	<u>Pol</u>	Qtz, Spd, [Pet, Ms, Lpd, Ab, Mc, Ap]	essentially monomineralic	Cs, (Li)
(90) Lepidolite Zone	<u>lithian Ms</u> , <u>Lpd</u> , Mc perthite	Ab, Qtz, Brl, ( <u>Ta-oxide minerals</u> , Cst), [Zrn]	fine-grained	Li, K, Rb, F, (Na, Be, Ta, Sn, Zr, Hf, Ga)

TABLE 2. VOLUME OF INDIVIDUAL ZONES AND TOTAL VOLUME OF THE TANCO PEGMATITE

Pegmatite zones	Volume (m <sup>3</sup> )	Volume %	Pegmatite zones	Volume (m <sup>3</sup> )	Volume %
Zone (10)	21,842	0.1	Zone (60)	1,560,537	7.1
Zone (20)	9,595,918	43.9	Zone (70)	1,068,619	4.9
Zone (30)	739,169	3.4	Zone (80)	103,913	0.5
Zone (40)	5,692,659	26.1	Zone (90)	177,657	0.8
Zone (50)	2,881,607	13.2	Total	21,841,921	100.0

TABLE 3. MODAL MINERAL COMPOSITION OF THE TANCO PEGMATITE

Zone	(10)	(20)	(30)	(40)	(50)	(60)	(70)	(80)	(90)	Tanco
Volume	0.10	43.93	3.38	26.06	13.19	7.14	4.89	0.48	0.81	100.00
Quartz	28.7	36.0	24.0	34.0	11.0	15.0	94.5	11.0	10.0	32.87
Albite	66.0	40.7	70.0	25.0	7.0	20.0	0.1	5.0	8.0	29.34
K-feldspar		15.0		24.0	25.0	50.0	2.0	2.0	10.0	19.95
Muscovite	1.0	3.0	3.0	1.0	0.1	12.0		1.5		2.56
Lithian Ms		3.0		2.0	0.1				70.0	2.43
Lepidolite			0.1	0.5	0.1	0.1		3.0		0.169
Petalite				10.0	46.0		1.0	1.2		8.75
Spodumene				0.3	5.0	0.1	2.0	0.5		0.847
Eucryptite					2.0					0.264
Apatite	2.0	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2		0.5	0.1	0.143
Lithiophilite	0.1	0.1	0.2	0.5	1.0	0.5			0.2	0.351
Amblygonite		0.5	0.1	1.5	1.0		0.4	0.1	1.0	0.776
Beryl	0.2	0.5	1.0	0.1	0.1	1.0			1.0	0.373
Pollucite				0.5	1.0			75.0		0.620
Tourmaline	2.0	1.0	0.5	0.1	0.1	0.1				0.506
Cassiterite		0.005	0.01	0.01	0.005	0.01			0.01	0.006
Rutile				0.01		0.01				0.002
Ferrotapiolite				0.01		0.002				0.001
Columbite Grp.		0.01	0.01	0.01	0.002	0.005			0.01	0.004
Wodginite Grp.			0.03		0.002	0.04		0.001	0.03	0.006
Microilite Grp.			0.01	0.015	0.002	0.01			0.02	0.005
Simpsonite						0.001				0.0001
Uraninite					0.005	0.005			0.005	0.0011
Zircon			0.02		0.01	0.02			0.02	0.0036
Biotite	0.1									<0.001
Total	100.00	99.93	99.48	99.76	99.71	99.18	100.00	99.84	100.41	100.00

All values given as volume percent. Symbol: Ms: muscovite.

Modified after Černý *et al.* (1998). \* Underlined minerals occur in economic quantities in the zones indicated. Mineral symbols as listed in <http://www.mineralogicalassociation.ca/doc/symbols.pdf>

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

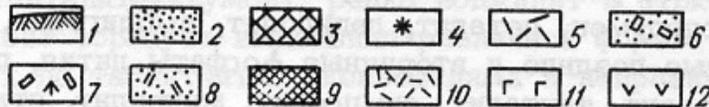
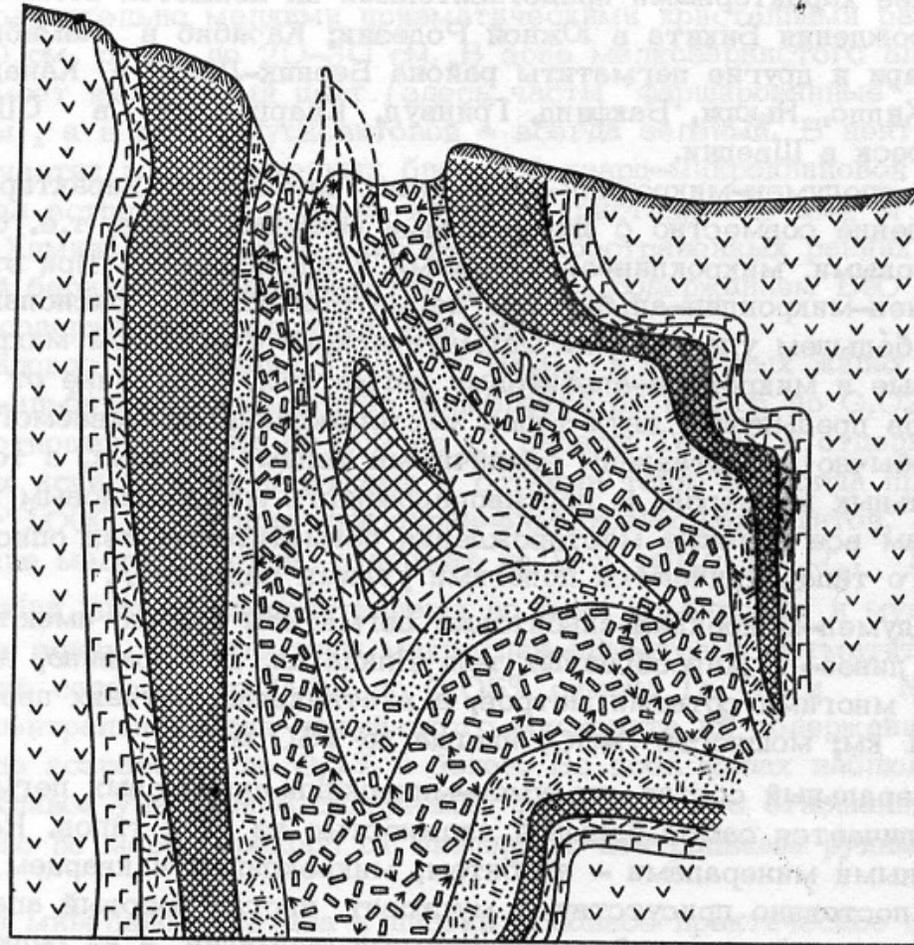


Рис. 12. Геологический разрез по сподумен-микроклин-альбитовому пегматиту.

1 – почвенный слой и наносы; зоны: 2 – блокового кварца, 3 – блокового микроклина П, 4 – чешуйчатого лепидолита, 5 – мелкопластинчатого альбита, 6 – кварц-сподуменная, 7 – клеветандит-сподуменная, 8 – кварц-мусковитовых гнезд, 9 – блокового микроклина 1, 10 – гнезд мелкозернистого альбита с бериллом, 11 – графическая кварц-микроклиновая; 12 – габбро

Южная Сибирь

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ С ПОЛЛУЦИТОМ

Коктокай, ЮВ Алтай

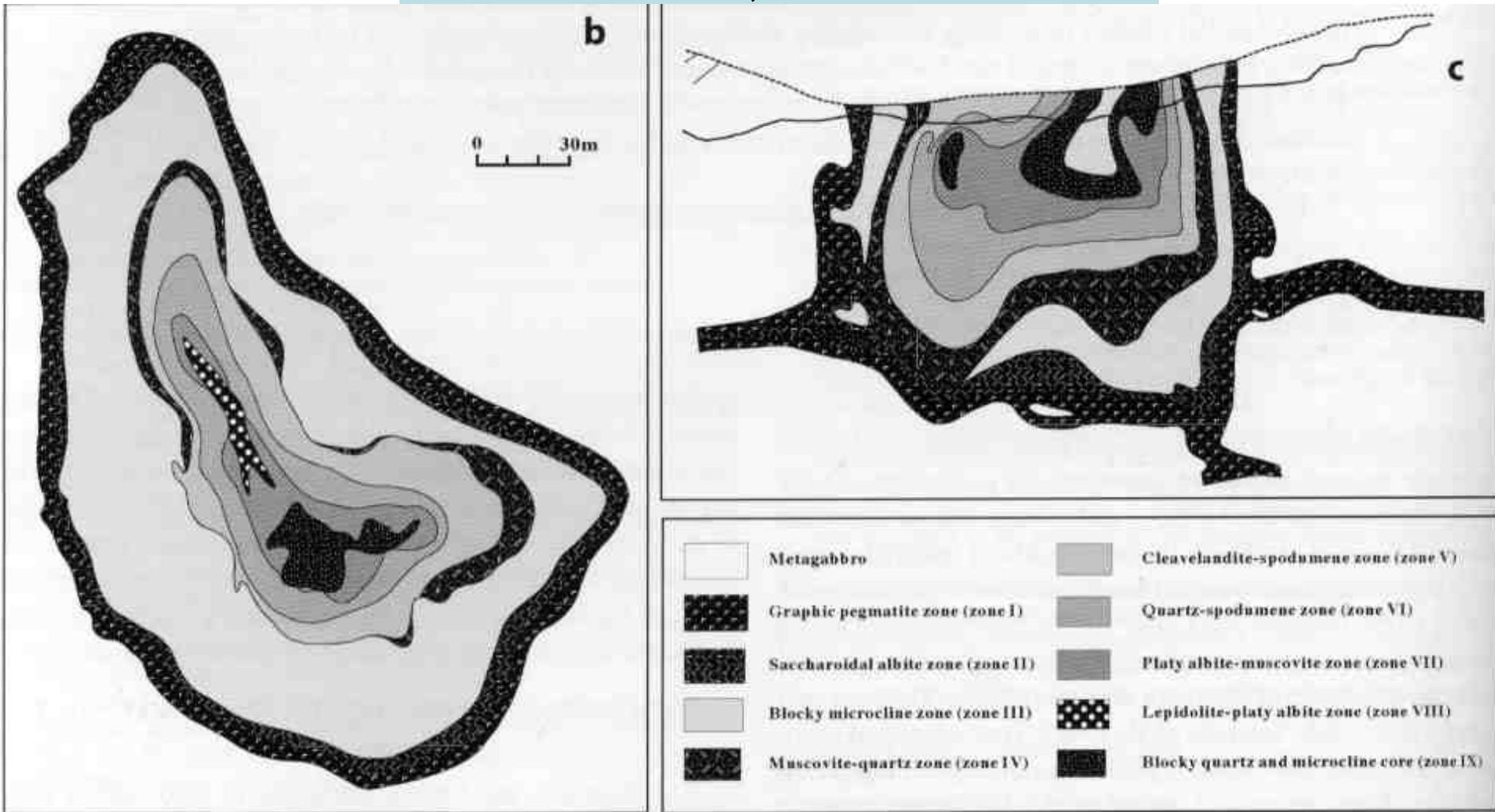


FIGURE 1. (a) Geological map, (b) internal textural zonation, and (c) cross section of the Koktokay no. 3 granitic pegmatite, Altai, Northwestern China (modified after Wang et al. 1981 and Zhu et al. 2000).

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## История формирования и зональность

Известны близкого состава гранитные пегматиты в виде крутопадающих плитообразных тел слабо зональных, в них отсутствует кварцевое ядро, зона лепидолита, краевые зоны гранитной и графической структуры; все остальные зоны имеются, но размещены не строго закономерно; парагенезы минералов точно те же. Для пегматитов данного типа особо характерен клевеландит – голубоватый, зеленоватый, сероватый альбит в несколько расщеплённых пластинчатых кристаллах. Характерны разноцветные турмалины – от чёрного и густо коричневого шерла до эльбаита синеватого (индиголита с  $Fe^{2+}$ ), светло окрашенного полихромного и до чисто розового и бесцветного – ахроита (только с Li-Al).

Другой сравнительно редкий, но весьма важный промышленный тип редкометальных гранитных пегматитов – альбит-сподуменовый с колумбитом, бериллом и

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## История формирования и зональность

касситеритом. Представлен плитообразными жилами, часто круто падающими, длиной до 3 км, с вертикальной протяжённостью до 2 – 6 км и более, при мощности от 1-10 до 40-60 м. Главные минералы – кварц, альбит и сподумен, калишпата до 10-15 %. Второстепенные – зелёный чешуйчатый мусковит (лепидолита нет!), сине-зелёный турмалин, гранат, апатит. Зональность мало отчётливая, дифференциация слабая. Обычно развиты две-три зоны: краевая мелкозернистая кварц-альбитовая; главная кварц-альбит-сподуменовая; ± зона блокового микроклина. Главные редкометальные минералы – серо-зеленоватый сподумен (кристаллы до многих м), берилл, колумбит. Это крупнейшие месторождения лития – отдельные тела содержат до 1 млн. т лития. Кроме того, это довольно крупные месторождения бериллия, а также тантала (но  $Ta/Nb < 1$ !) и олова, с запасами каждого до десятков тысяч тонн. Нуристан (Афганистан и

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## История формирования и зональность

частью соседние страны) - крупнейшая литиевая провинция мира. Крупнейшие пегматитовые поля : Парунское, Ишкашимское, Нилау-Куламское, Дара-и-Пичское. Именно для этих литиеносных гранитных пегматитов предполагается палингенное происхождение (за счёт материала глубоко погруженных и метаморфизованных литиеносных соленосно-глинистых толщ типа отложений современных бессточных озёр на западе Северной Америки).

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## История формирования и зональность

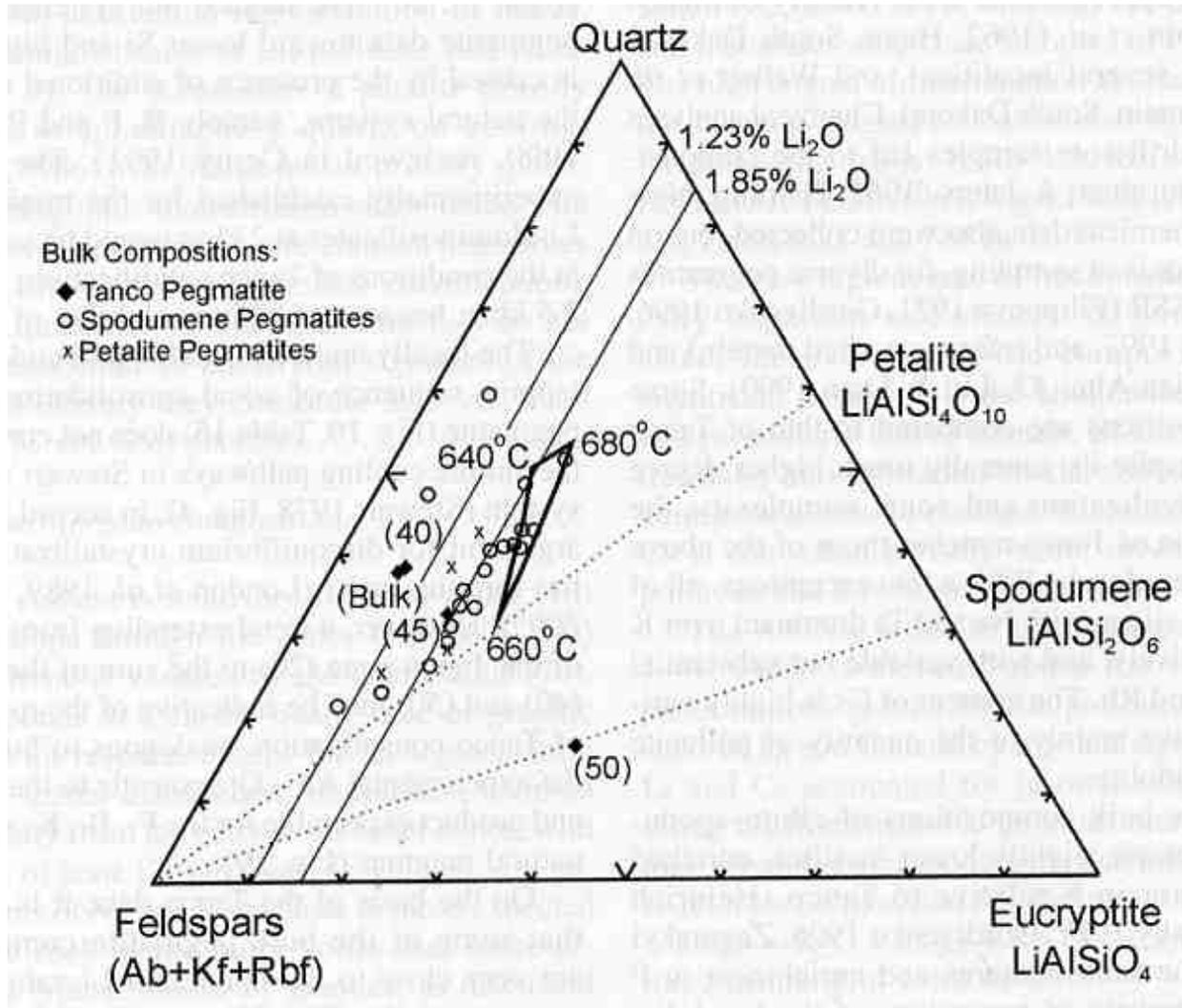


FIG. 19. Bulk compositions of petalite-subtype, spodumene-subtype, and albite-spodumene-type pegmatites from Stewart (1978), compared to plots of zone (40), zone (50), the weighted average of these zones (45), and the bulk of the Tanco pegmatite (Bulk).

Сравнение  
реального  
состава  
редкометалльных  
гранитных  
пегматитов  
с составами  
синтетических  
расплавов

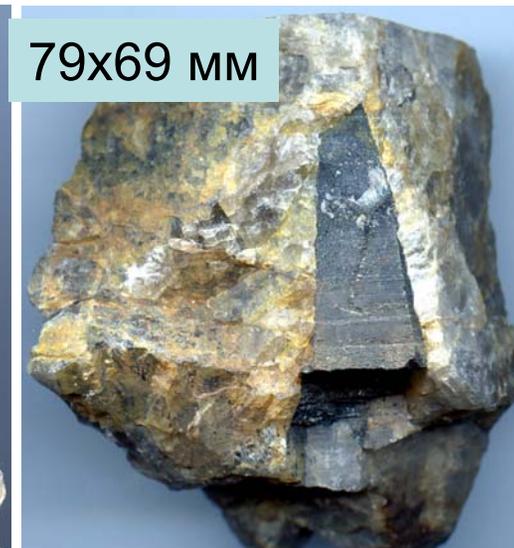
# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Биотит - аннит $K(Fe^{2+}, Mg, Al)_3[(OH, F)_2/AlSi_3O_{10}]$



141x125  
мм

Колл.  
и фото  
ЭМС

Пластины биотита в  
графическом пегматите.



79x69 мм



71x57 мм

Кристалл аннита на контакте  
кварцевого ядра

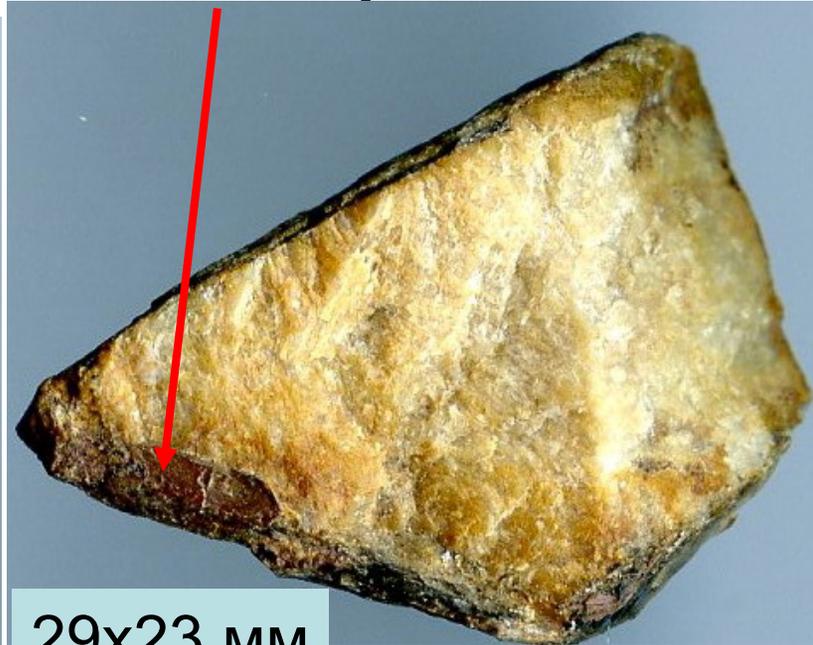


Блюмов.  
копь.  
Ильмены

77x70  
мм

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Биотит, магнетит и монацит

Колл. и фото  
ЭМС



29x23 мм

69x51 мм

Блюмовская  
копь. Ильмены

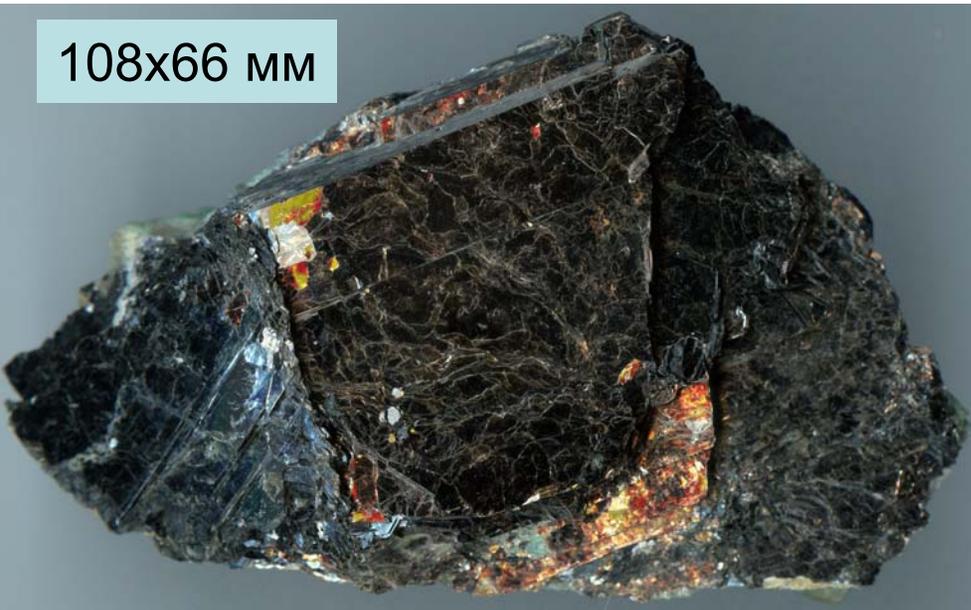
Монацит –  
агрегат 24x21 мм.  
Виенорполис.  
Минас Жераис

Пластины биотита и монацита в  
блоковом агрегате К-На полевого шпата



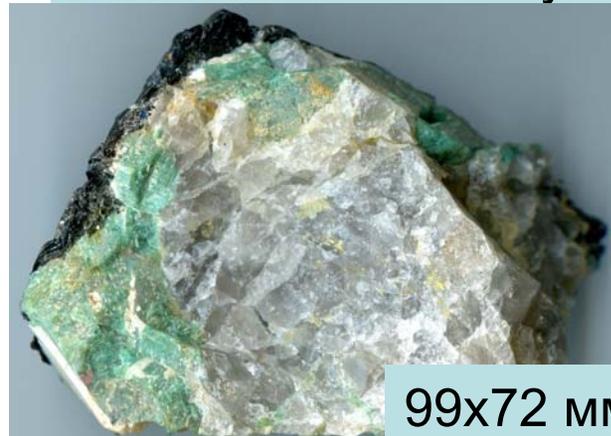
# РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Циннвальдит $\text{KLiFe}^{2+}\text{Al}[(\text{F},\text{OH})_2/\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$

108x66 мм



В амазонит-кварцевом агрегате.  
Гора Плоская, Кейвы,  
Кольский полуостров

Фото Н.Н. Жукова и  
Э.М. Спиридонова



99x72 мм

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

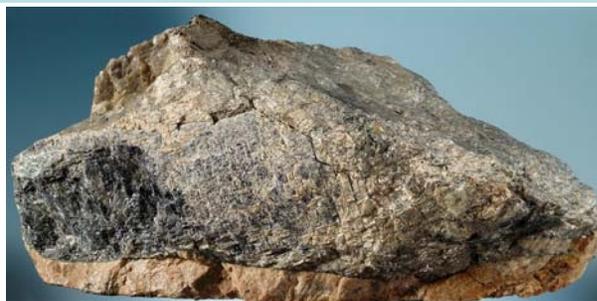


Розовый кварц 40 мм. Окрашен тонкими вростками дюмортьерита. Бахия, Бразилия

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Кордиерит – секанинаит $(\text{Fe,Mg})_2 \text{Al}_3 [\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$

Кордиерит и феррокордиерит (не очень понятно зачем названный чешскими минералогами секанинаитом) – типичные минералы редкометальных пегматитов, сопряжённых с высокоглинозёмистыми гранитами (S-тип гранитов). Эти минералы очень легко гидратируются и замещаются мелкозернистыми агрегатами хлоритов и светлых слюд. Поэтому сравнительно редко описываются в редкометальных пегматитах.



180 мм



200 мм



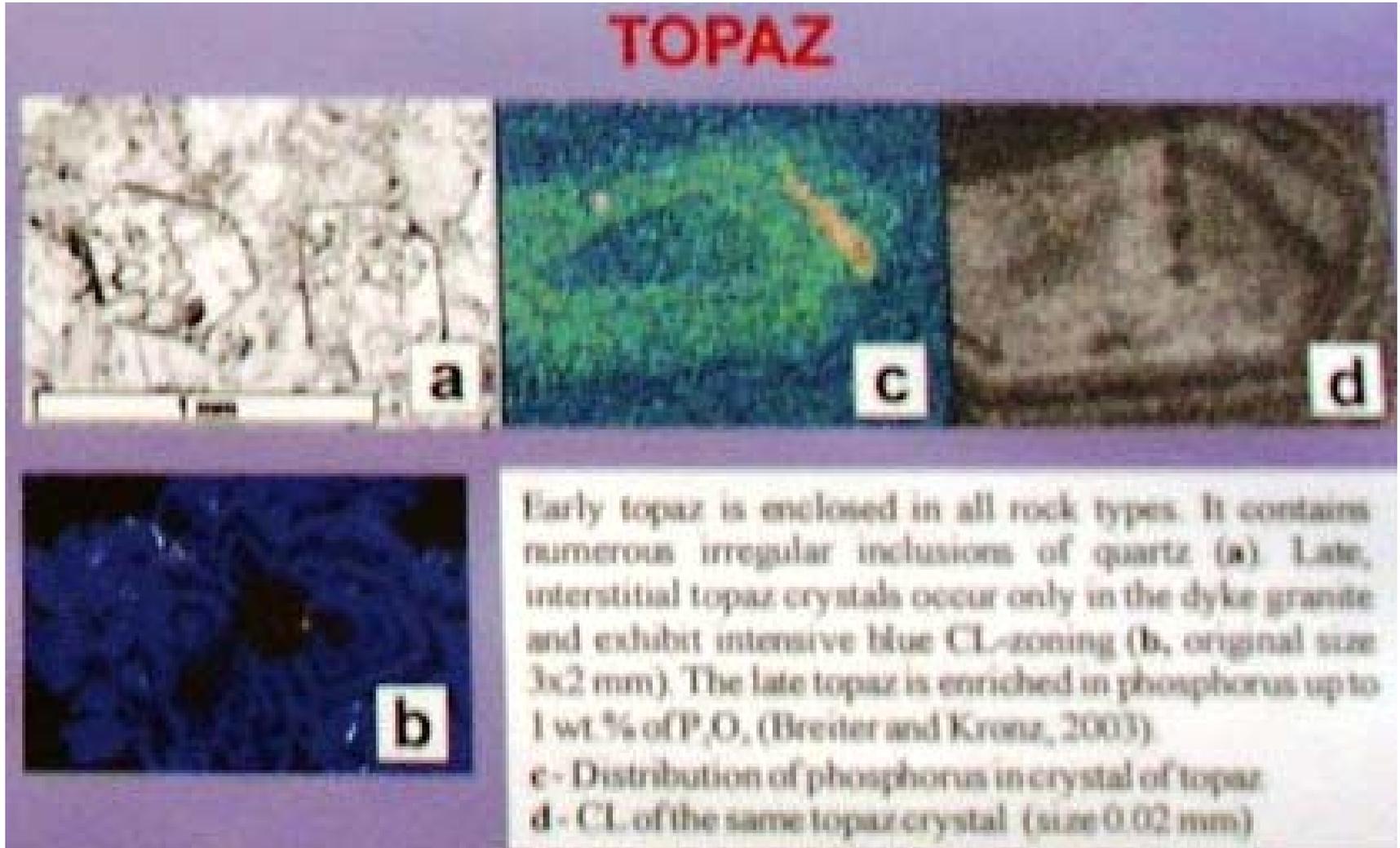
Долни  
Боры,  
Моравия,  
Чехия



С раухкварцем и альбитом.  
Средний Урал

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

**Апатит** – фторапатит этих пегматитов беден REE (< 0.1 %) и Sr (< 0.1 %) и обогащён марганцем (1-11 масс. % MnO).



Топаз фосфорсодержащий зональный. Чехия

# РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Иттрофлюорит $(Ca, Y, Ce)F_{2-3}$

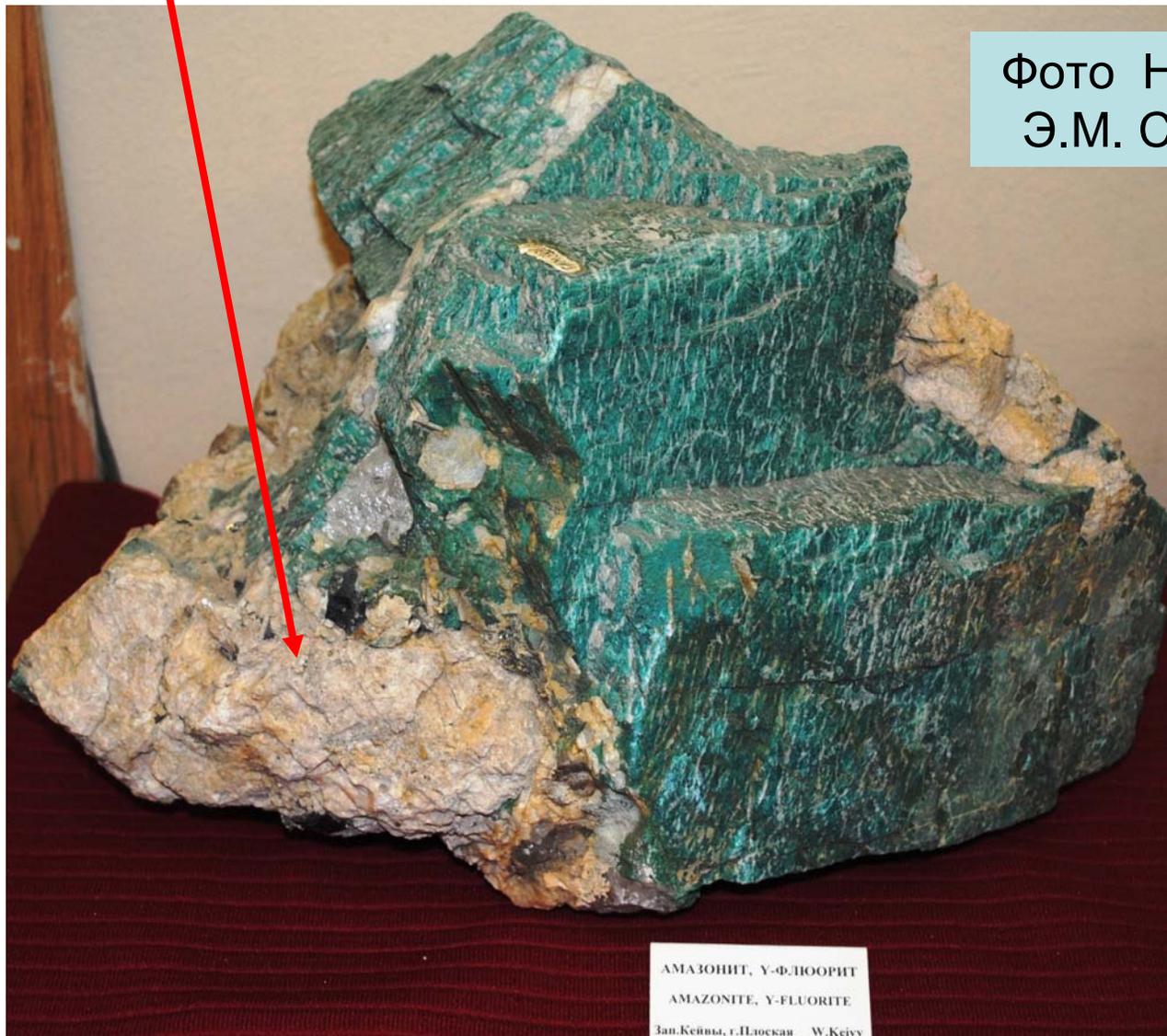
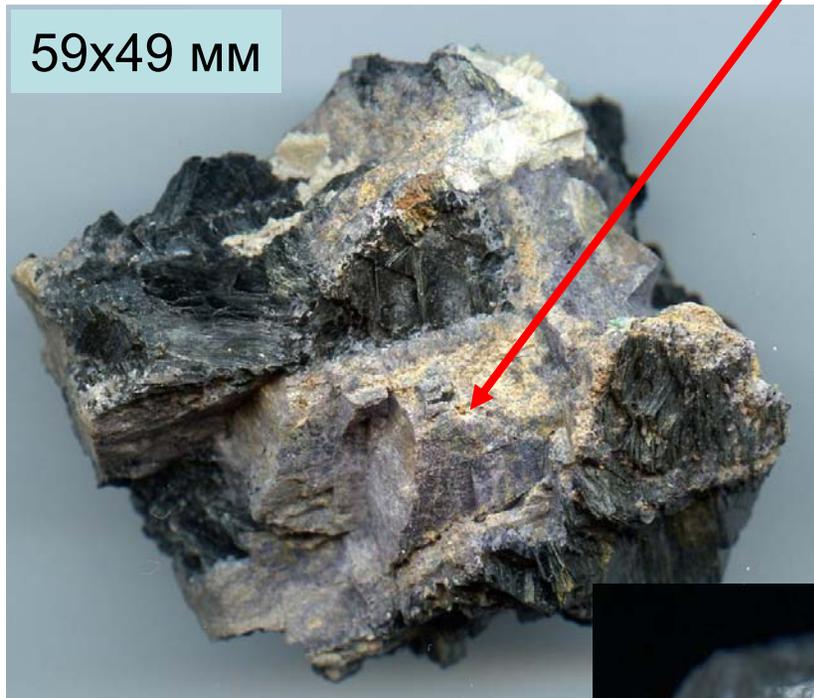


Фото Н.Н. Жукова и  
Э.М. Спиридонова

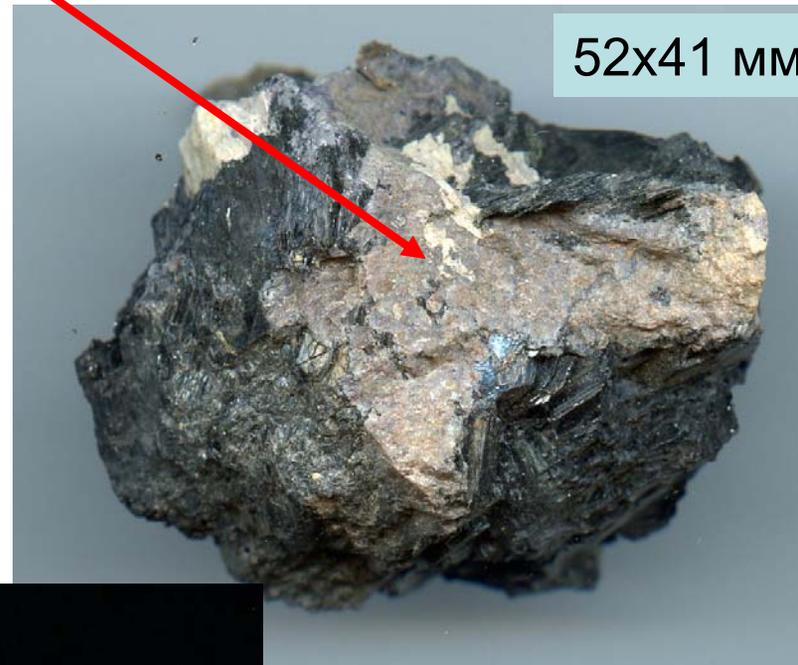
В амазонит-кварцевом агрегате. Гора Плоская, Кейвы, Кольский п-ов

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Циннвальдит и иттрофлюорит $(Ca, Y, Ce)F_{2-3}$

59x49 мм



52x41 мм



61x43 мм



С вростками  
монацита

Фото Н.Н. Жукова и  
Э.М. Спиридонова

В амазонит-кварцевом агрегате. Гора Плоская, Кейвы, Кольский п-ов

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Циркон $Zr [SiO_4]$ – гафнон $Hf [SiO_4]$

19x11 мм

26x  
18  
мм



Гафнон и  
клевеландит.  
Naíra mine,  
Мозамбик



37x34 мм

Циркон из амазонитовых пегматитов.  
Слюдянка, Прибайкалье



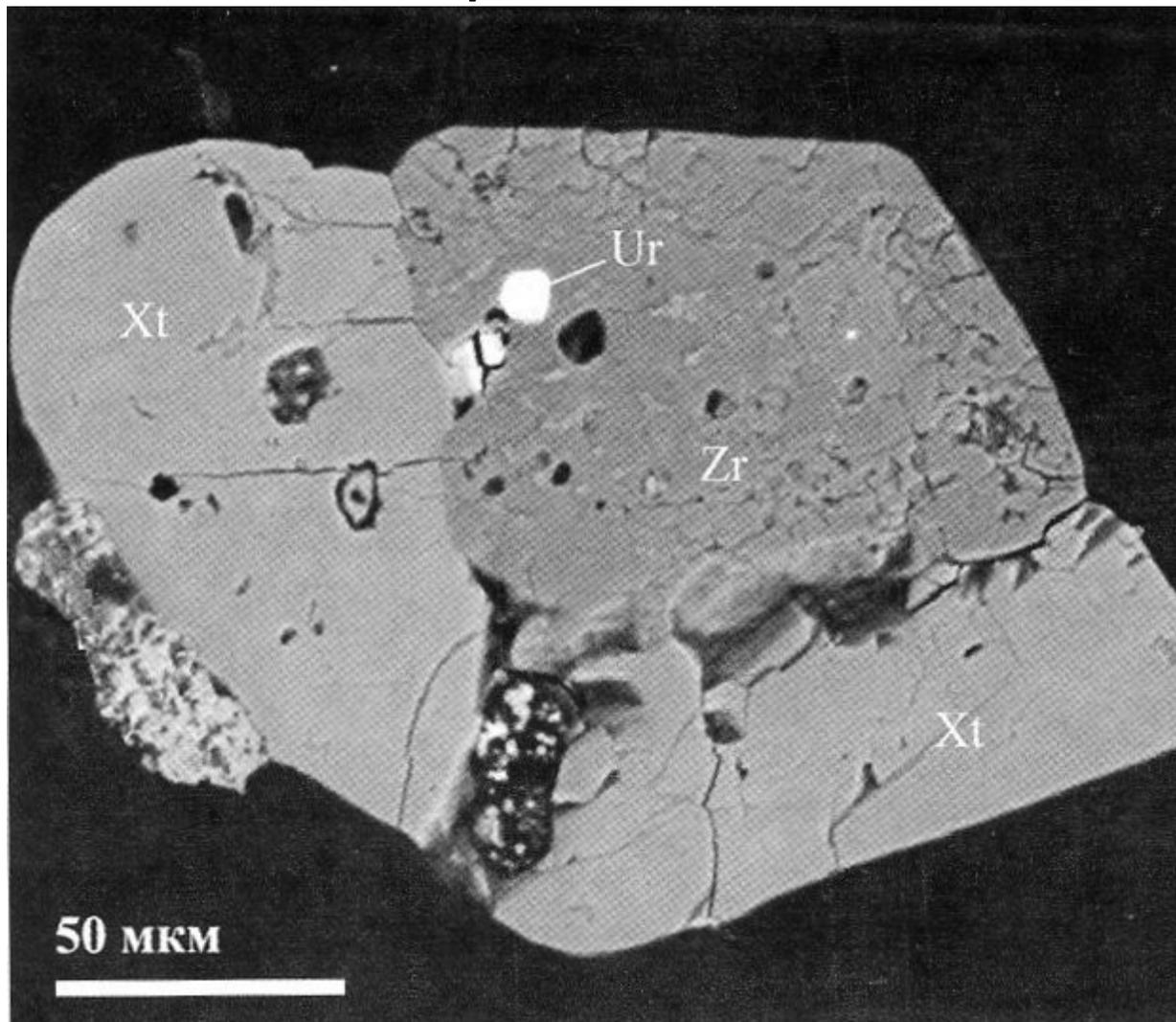
Гафнон и  
клевеландит.  
Naíra mine,  
Мозамбик

Гафнон. Танко, Канада



# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Циркон  $Zr [SiO_4]$  – – ксенотим  $Y [PO_4]$



BSE  
image

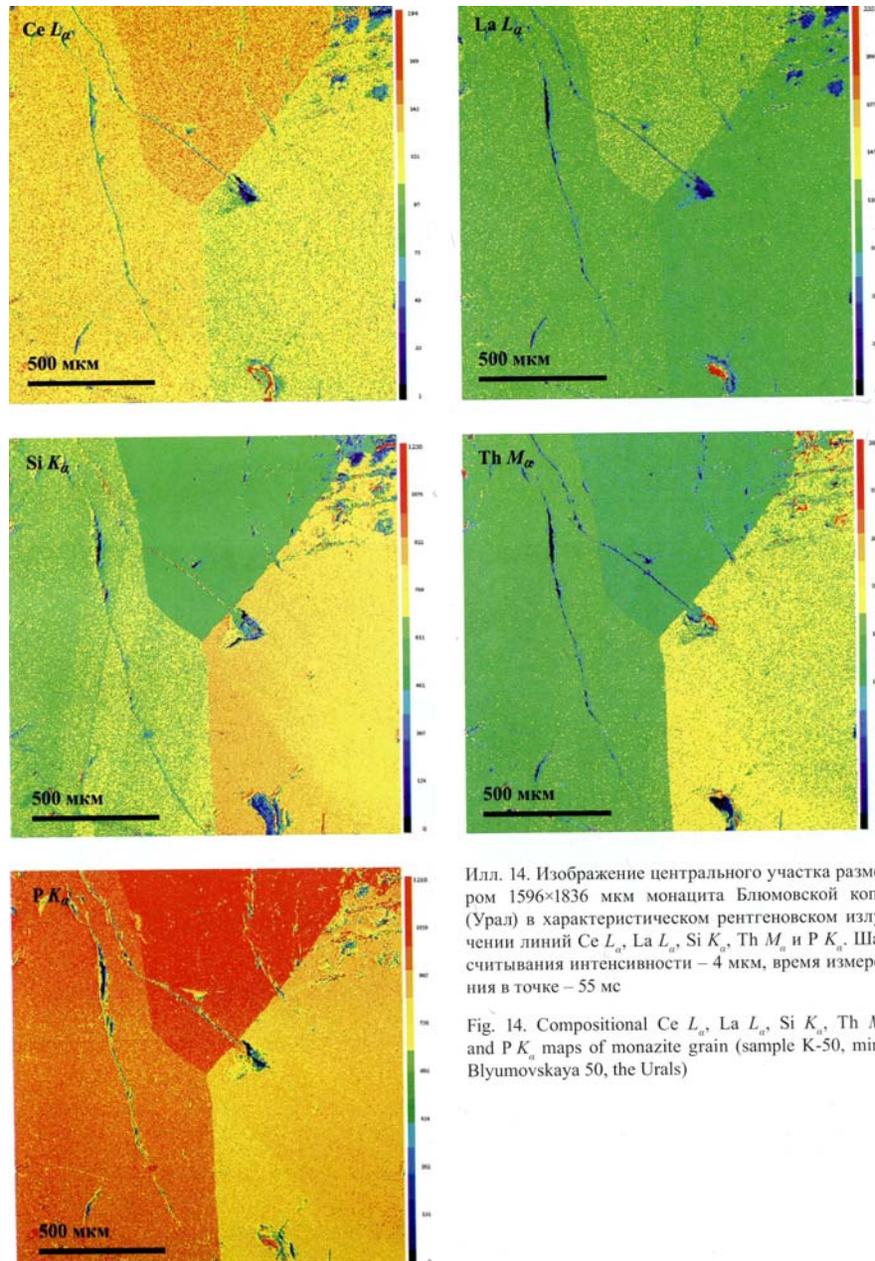
Срастание циркона, ксенотима, уранинита. Липовка, Средний Урал.  
Вотяков и др., 2012

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

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

Член изоморфных серий  $(\text{Ce,La,Nd}\dots\text{Sm})[\text{PO}_4]$  (собственно монацит) –  $\text{CaTh}[\text{PO}_4]_2$  (брабантит) -  $\text{CaCe}_2\text{Th}[\text{PO}_4]_4$  (чералит) -  $\text{Th}[\text{SiO}_4]$  (хаттонит) – гаспарит  $(\text{Ce,La,Nd})[\text{AsO}_4]$ , с небольшой примесью минала ксенотима  $\text{Y}[\text{PO}_4]$  (Pabst, Hutton, 1951; Bowie, Horne, 1953; Хейнрих, 1962; Graeser, Schwander, 1977; Rose, 1980; Юшкин и др., 1986; Strunz, Nickel, 2001; Phosphates..., 2003). В составе монацита обычно  $\text{Ce:La:Nd} \sim 2:1:1$ , изредка преобладает La, ещё реже Nd. Монацит - типичный минерал бедных Ca гранит-пегматитов, в них это основной минерал-концентратор и носитель лёгких REE и Th, содержания Th до 20 масс. % и более (Phosphates..., 2003; Philpotts, Ague, 2009 и мн. др.). В монаците ряда гранитных пегматитов столь же высоки содержания U (Gramaccioli, Segalstad, 1978). В присутствии ксенотима состав монацита - индикатор T и P: при 2 кб с ростом T от 300 до 1000° C мольная доля Y растёт от 3 до 16% (Gratz, Heinrich, 1997).

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Монацит (Ce,La,Nd,Ca,Th,U)[PO<sub>4</sub>,SiO<sub>4</sub>,SO<sub>4</sub>]



Илл. 14. Изображение центрального участка размером 1596×1836 мкм монацита Блюмовской копи (Урал) в характеристическом рентгеновском излучении линий Ce  $L_{\alpha}$ , La  $L_{\alpha}$ , Si  $K_{\alpha}$ , Th  $M_{\alpha}$  и P  $K_{\alpha}$ . Шаг считывания интенсивности – 4 мкм, время измерения в точке – 55 мс

Fig. 14. Compositional Ce  $L_{\alpha}$ , La  $L_{\alpha}$ , Si  $K_{\alpha}$ , Th  $M_{\alpha}$  and P  $K_{\alpha}$  maps of monazite grain (sample K-50, mine Blyumovskaya 50, the Urals)

Секториально-зональный

кристалл

монацита

гранитных

пегматитов

Блюмовской копи

Ильменских гор

(Вотяков и др., 2012).

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Моначит (Ce,La,Nd,Ca,Th,U)[PO<sub>4</sub>,SiO<sub>4</sub>,SO<sub>4</sub>]

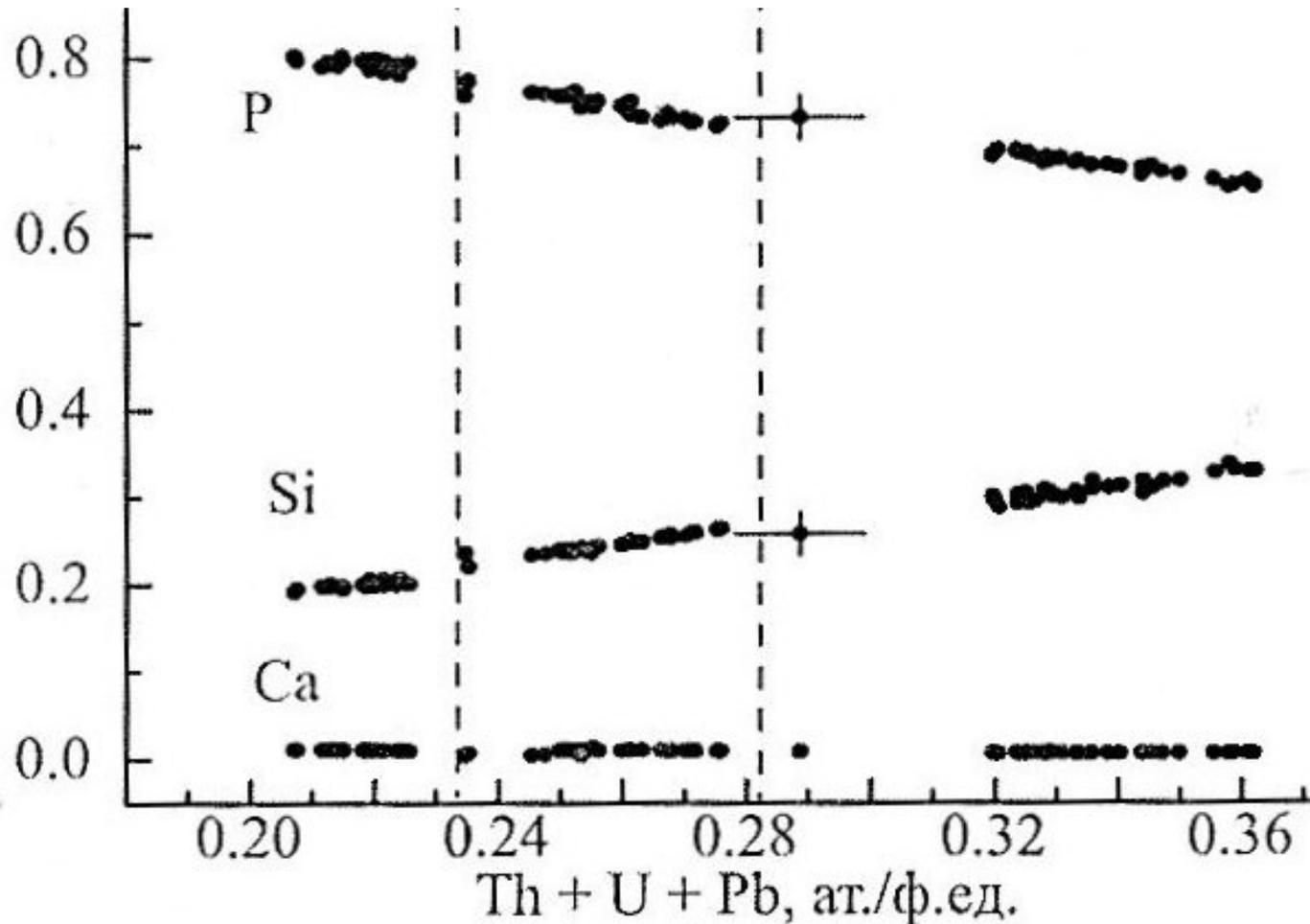
Гранитные пегматиты Блюмовской копи Ильменских гор (Вотяков и др., 2012). Моначит весьма богат торием и кремнием – хаттонитовый тип изоморфных замещений

Оксид	Химический состав*											
	23	25	26	29	35	36	39	42	60	62	64	67
ThO <sub>2</sub>	32.47	32.09	31.50	34.01	21.99	22.04	21.68	21.38	24.39	24.43	25.33	25.52
UO <sub>2</sub>	0.66	0.65	0.63	0.69	0.49	0.49	0.48	0.48	0.56	0.56	0.57	0.57
PbO	0.36	0.35	0.34	0.38	0.25	0.24	0.24	0.24	0.27	0.28	0.29	0.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	17.85	17.98	18.13	17.22	22.01	21.73	21.84	22.06	20.51	20.60	20.27	20.39
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.58	22.05	22.05	21.00	25.33	25.68	25.90	26.06	24.43	24.54	23.92	23.91
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.37	7.78	7.79	7.19	9.13	8.75	8.95	9.02	8.16	8.21	8.11	7.90
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.59	2.33	2.45	2.47	3.07	2.92	3.01	2.95	3.07	2.87	2.92	2.88
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.83	7.76	7.98	7.57	9.50	9.45	9.45	9.47	8.73	9.00	8.71	8.75
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.93	0.93	0.87	0.88	0.99	1.05	1.07	1.14	1.12	1.05	1.14	0.97
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	0.14	0.39	0.10	0.23	0.42	0.27	0.37	0.38	0.45	0.50	0.51
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.05	0.04	0.02	0.04	0.08	0.01	0.06	0.04	0.04	0.01	0.08
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	0.47	0.48	0.50	0.74	0.70	0.74	0.75	0.75	0.77	0.72	0.73
SiO <sub>2</sub>	7.02	6.95	6.85	7.38	4.68	4.65	4.65	4.66	5.49	5.51	5.66	5.73
CaO	0.13	0.13	0.14	0.13	0.23	0.22	0.23	0.24	0.24	0.23	0.22	0.22
Сумма	99.73	99.76	99.69	99.72	98.68	98.44	98.51	98.86	98.13	98.55	98.35	98.45

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

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

Гранитные пегматиты Блюмовский копи  
Ильменских гор (Вотяков и др., 2012)



Преимущественно  
хаттонитовый тип  
изоморфных  
замещений  
в монаците:  
**REE [PO<sub>4</sub>]**  
↔  
**Th [SiO<sub>4</sub>]**

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

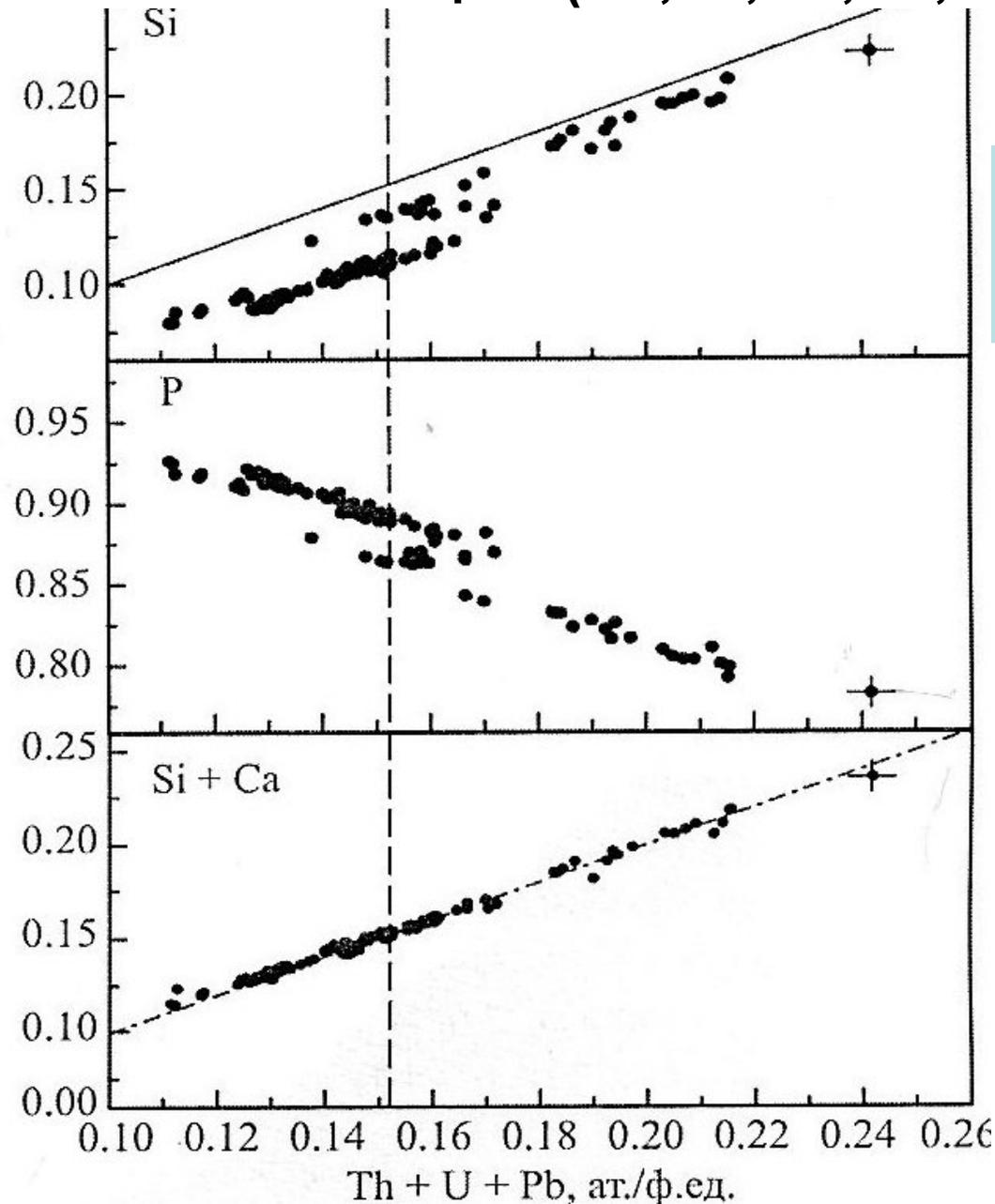
## Монацит (Ce,La,Nd,Ca,Th,U)[PO<sub>4</sub>,SiO<sub>4</sub>,SO<sub>4</sub>]

Гранитные пегматиты копи 244 Ильменских гор (Вотяков и др., 2012)

Оксид	Химический состав*									
	2	10	17	25	31	37	64	78	84	104
ThO <sub>2</sub>	14.81	16.09	15.70	18.03	18.73	20.18	14.73	15.28	12.94	13.15
UO <sub>2</sub>	0.66	0.77	0.76	1.20	1.11	1.06	0.74	0.94	0.59	0.65
PbO	0.20	0.21	0.21	0.25	0.26	0.27	0.20	0.20	0.17	0.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	25.78	25.35	25.72	23.14	22.81	22.48	24.72	24.59	26.96	26.51
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.91	12.39	12.28	11.25	11.92	11.64	12.86	12.67	12.93	13.42
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.89	24.84	25.16	24.95	24.80	24.66	26.58	25.90	26.68	26.28
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.66	2.51	2.58	2.62	2.62	2.68	2.82	2.71	2.67	2.66
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.56	9.38	9.51	10.10	9.27	9.36	10.10	9.45	9.82	9.30
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.46	1.43	1.41	1.55	1.38	1.24	1.28	1.37	1.47	1.37
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.05	1.14	1.16	0.99	0.83	0.81	1.00	1.00	0.92	1.13
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20	0.26	0.32	0.12	0.22	0.13	0.16	0.27	0.24	0.22
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.07	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.04	0.04	0.03	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.08
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.77	0.90	0.89	0.45	0.56	0.36	0.50	0.81	0.81	0.83
SiO <sub>2</sub>	2.57	2.81	2.75	4.29	4.37	4.67	3.22	3.34	2.31	2.24
CaO	0.87	1.00	0.95	0.23	0.25	0.23	0.34	0.40	0.77	0.95
<b>Сумма</b>	<b>99.47</b>	<b>99.19</b>	<b>99.46</b>	<b>99.22</b>	<b>99.13</b>	<b>99.77</b>	<b>99.30</b>	<b>98.94</b>	<b>99.28</b>	<b>98.97</b>

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

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



Гранитные пегматиты копи 244  
Ильменских гор  
(Вотяков и др., 2012)

Преимущественно  
хаттонитовый  
(отчасти чералитовый)  
тип изоморфных  
замещений  
в монаците

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Мусковит



С альбитом. 95x80 мм.  
Linópolis, Divino das Laranjeiras,  
Минас Жераис, Бразилия



91 мм. Mina Ipe,  
Governador Valarades,  
Минас Жераис, Бразилия

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Псевдоморфозы мусковита

30x25  
мм

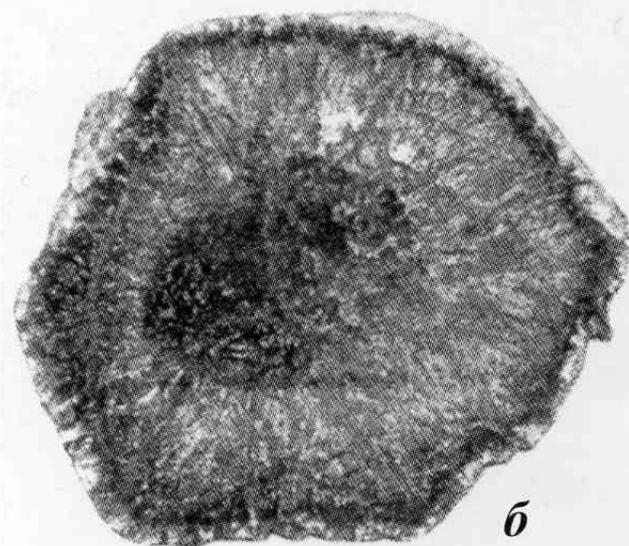


По ортоклазу. Мокруша,  
Средний Урал

70x60  
мм



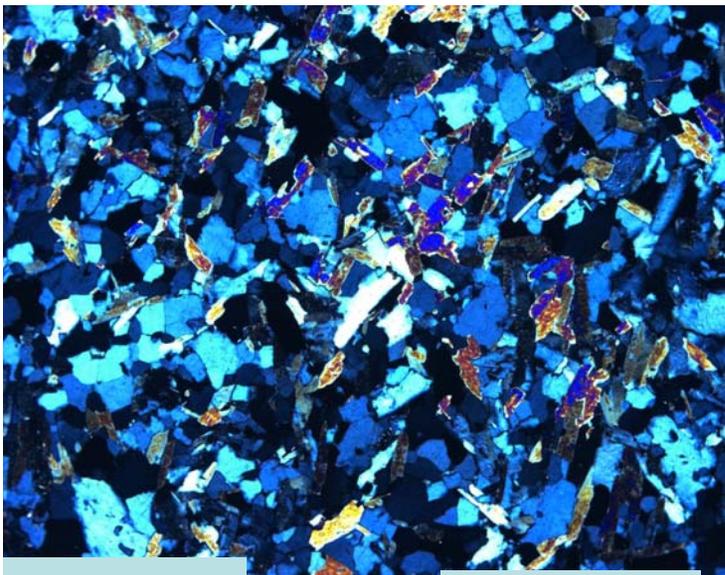
По  
кор-  
дие-  
риту



б

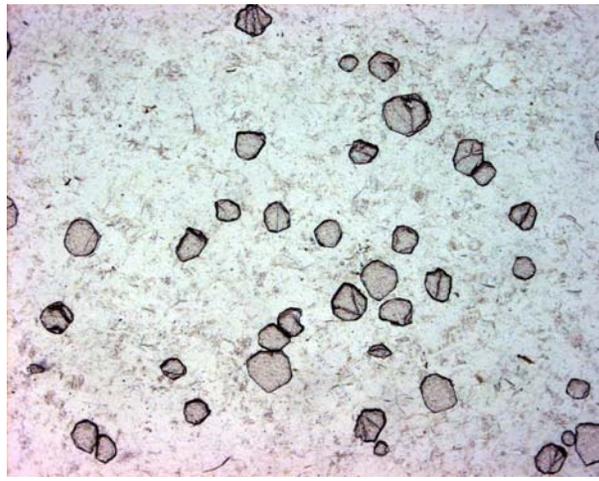
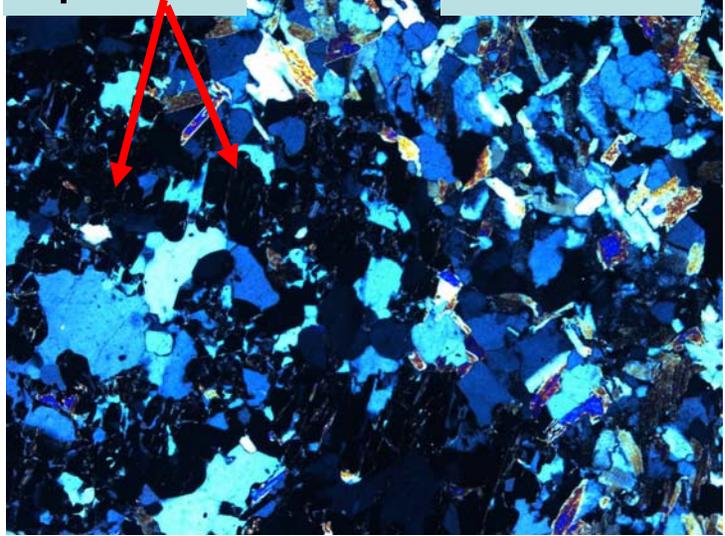
# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Кварц – мусковитовый замещающий комплекс с гранатом (Mn-альмандин, спессартин) и шерлом. Калба



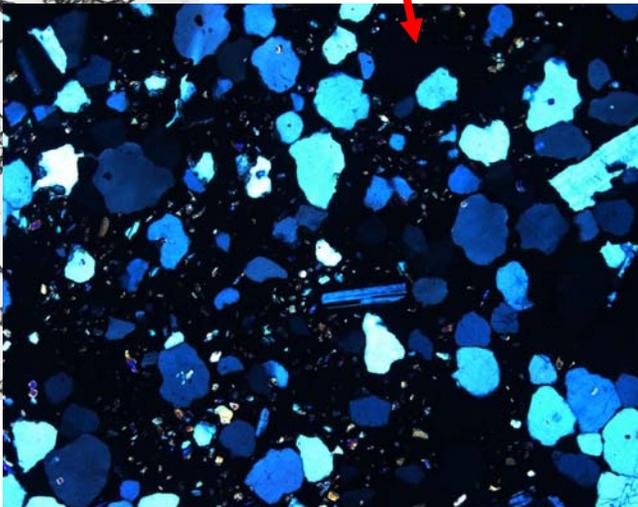
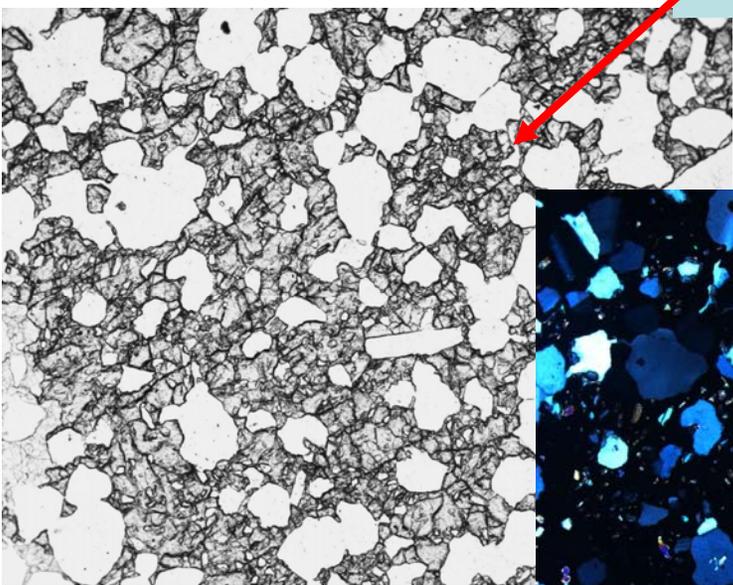
Гранат

Николи х



При 1 николе

Колл.  
Ю.И. Филипповой  
Фото Э.М.  
Спиридонова  
Пойкилокристалл  
граната



# РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Кварц – мусковитовый замещающий комплекс + альбит + гранат (Mn-альмандин, спессартин) + шерл. Калба

При 1  
николе



Колл. Ю.И. Филипповой  
Фото Э.М. Спиридонова

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Mn-альмандин (+ мусковит) замещают биотит

89x84 мм

104x82 мм



Блоковая  
зона  
пегматита

Блюмовская копь,  
Ильменские горы

Колл. и фото  
Э.М. Спиридонова

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Спессартин  $(\text{Mn, Fe}^{2+}, \text{Mg})_3 (\text{Al, Fe}^{3+})_2 [\text{SiO}_4]_3$

55x51 мм



С кварцем, мусковитом,  
альбитом. Адуй, Ср. Урал

32 мм



22 мм



19 мм

Колл.  
и  
фото  
ЭМС



Хитная копь, Ср. Урал

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Спессартин  $(\text{Mn, Fe}^{2+}, \text{Mg})_3 (\text{Al, Fe}^{3+})_2 [\text{SiO}_4]_3$



Спессартин на кристалле  
сподумена. Pech, Nangahar,  
Афганистан

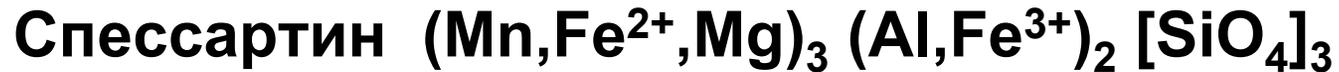


Спессартин  
в кварце.  
Сай Пуштиру,  
уц. Тро,  
Туркестанский хр.

В альбите.  
Haddam,  
Коннектикут,  
США



# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.



Спессартин и альмандин-спессартин (постоянно более 50 % минала спессартина) редкометальных гранитных пегматитов отличаются от гранатов безрудных гранитных пегматитов на порядок более низкими концентрациями иттрия и иттербия, а также скандия (менее 5 г/т), повышенными концентрациями тантала (более 30 и до 250 г/т), ниобия (более 30 и до 80 г/т) и гафния (более 10 г/т).

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.



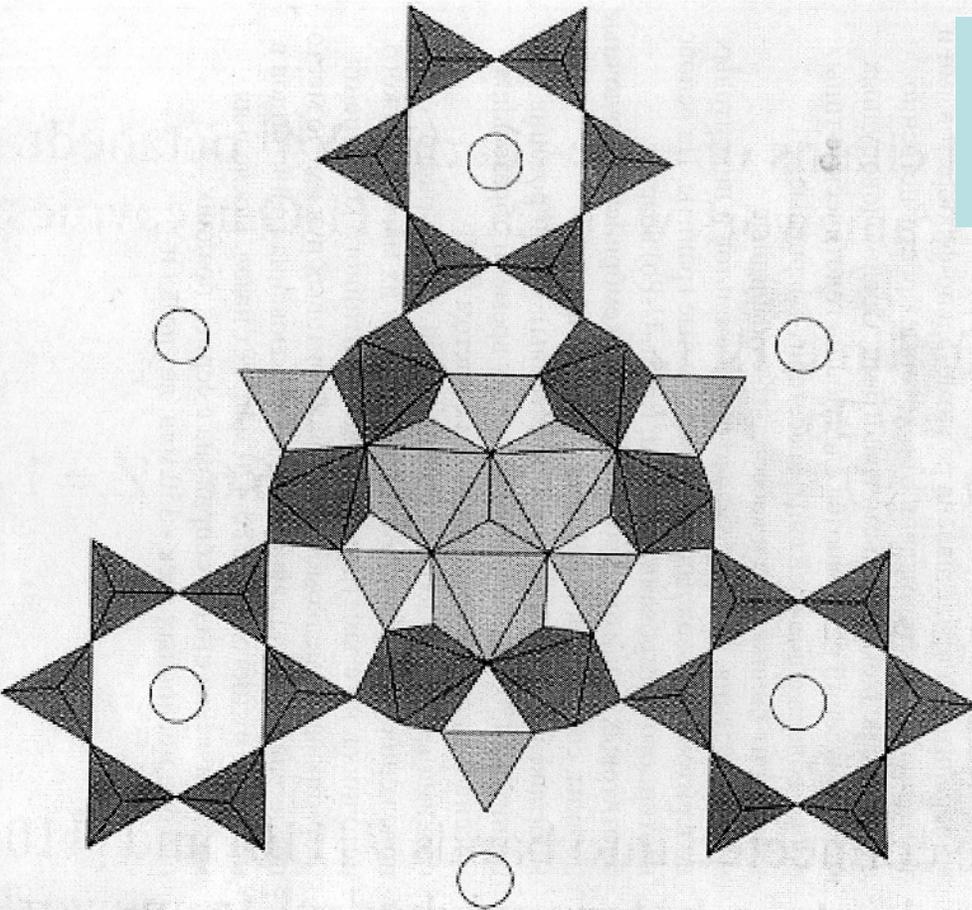
Турмалины – характерные минералы редкометальных гранитных пегматитов. Наиболее ранний из них – шерл, сопутствует мусковиту, альмандину, бериллу ранней генерации. Наиболее поздний из них эльбаит от розового до практически бесцветного – белого (ахроит) – сопровождает редкометальную минерализацию - лепидолит, поллуцит, минералы Та...



Шерлы редкометальных пегматитов содержат 0.1-0.4 % Li<sub>2</sub>O и 0.3-1.4 % MnO. Эльбаиты и близкого состава розовые и бесцветные турмалины – типоморфные образования редкометальных пегматитов. Они содержат 200-700 г/т галлия, 300-400 г/т цезия, 70-200 г/т рубидия, 10-40 г/т олова.

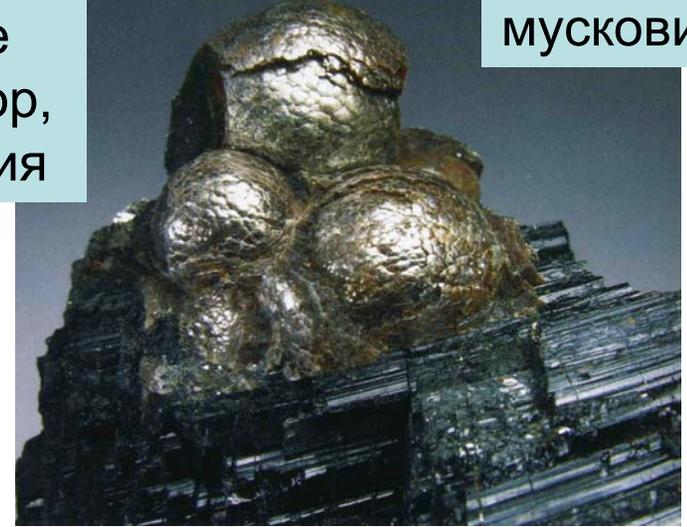
# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Турмалин-шерл



*Fig 9.СК.05. Structure of tourmaline projected on (0001); dark tetrahedra =  $\text{SiO}_4$ ; light triangles =  $\text{BO}_3$ ; light octahedra =  $\text{YO}_6$ ; dark octahedra =  $\text{ZO}_6$ ; circles = X atoms.*

Кleine  
Spiezkor,  
Намибия



МУСКОВИТ



Присыпки  
шерла  
на  
амазоните.  
Минас  
Жераис,  
Бразилия

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Турмалин – эльбаит



Красный Кордон.  
Калбинский хребет, ЮЗ Алтай



Синий  
эльбаит  
в альбите.  
Usakos,  
Намибия



Бразилия

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Турмалин – эльбаит



Эльбаит и верделит. Бразилия



Фото ННЖ и ЭМС

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Турмалин – эльбаит



Фото ННЖ и ЭМС



4071

ПОЛИХРОМНЫЙ ТУРМАЛИН В  
ЛЕПИДОЛИТЕ

Polychromatic Tourmaline in  
Lepidolite

Вороньи тундры Voronya Tundra

Эльбаит и сподумен.

Вороньи тундры, Кольский п-ов

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Турмалин – эльбаит. Вороньи тундры, Кольский п-ов



ТУРМАЛИН  
TOURMALINE  
Колмоzero-Воронья, г.Лешая  
Kolmozero-Voronua

Фото Н.Н. Жукова и Э.М. Спиридонова

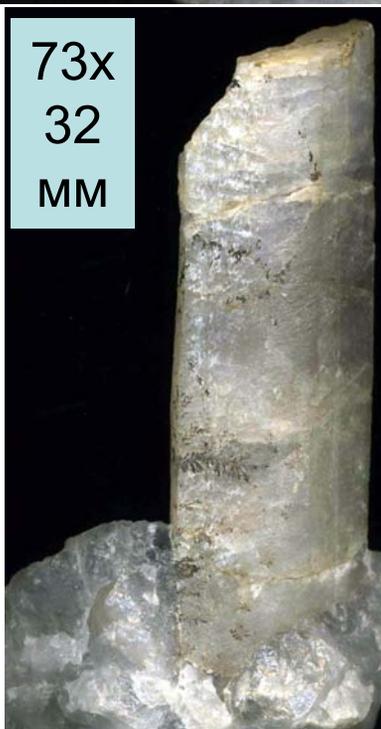
# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Турмалин – эльбаит



С лепидолитом и альбитом.  
Pala, Калифорния



59x47 мм



73x  
32  
мм

Зональный.  
Вост. Саян

Колл.  
Н.А. Зиненко  
Фото ЭМС

Эльбаит –  
ахроит  
с кварцем.  
Восточный  
Саян

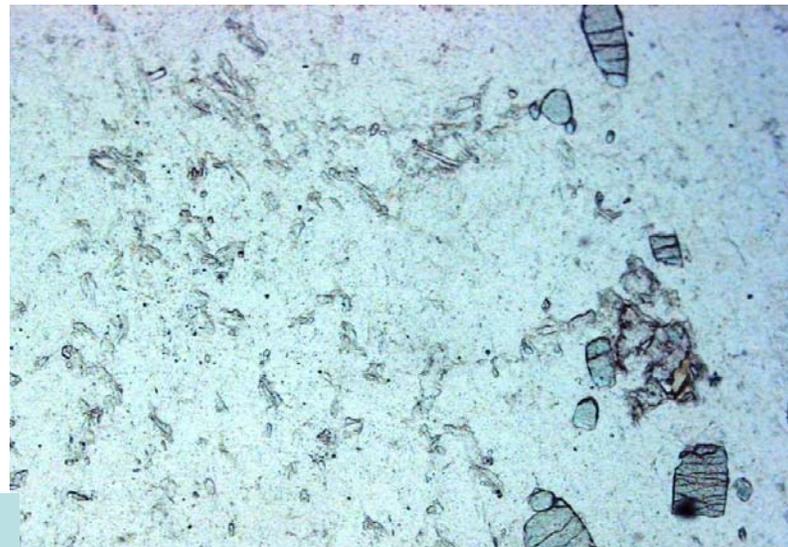


60 мм

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

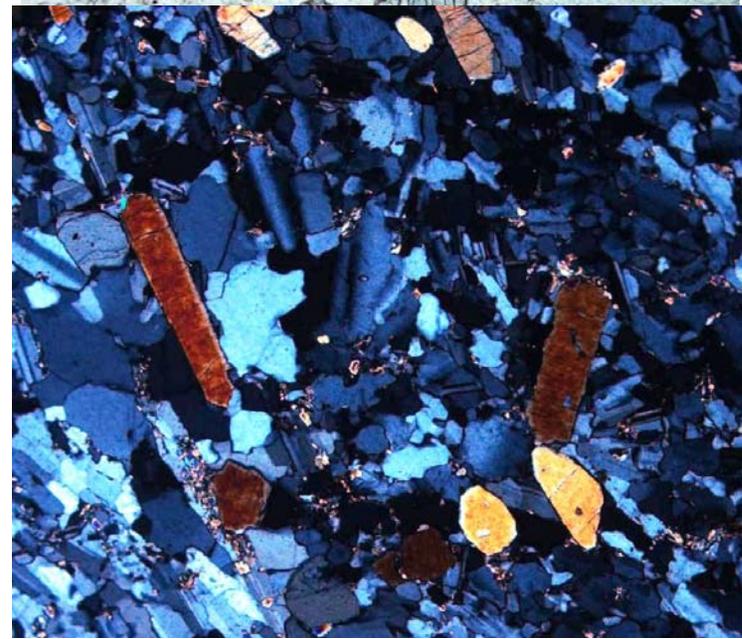
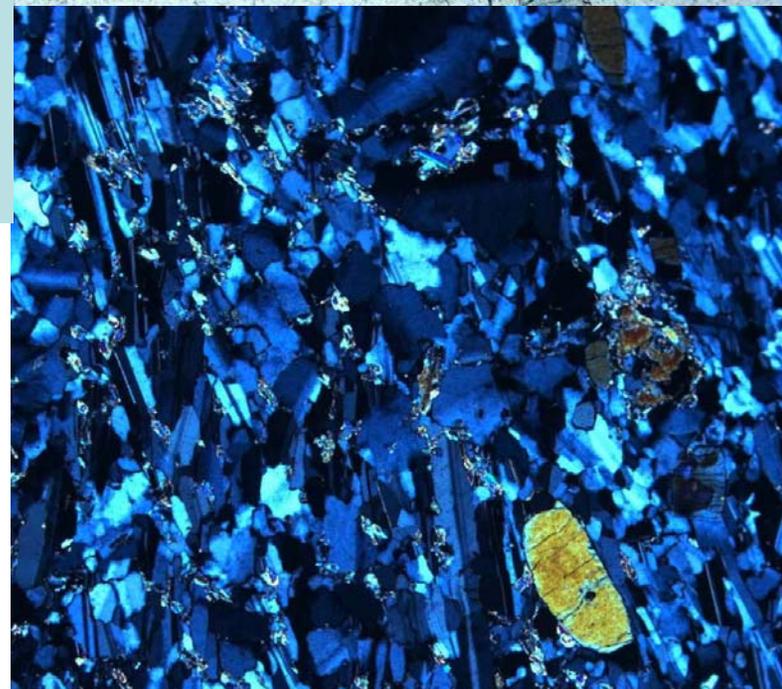
## Турмалин – эльбаит

При 1  
нике



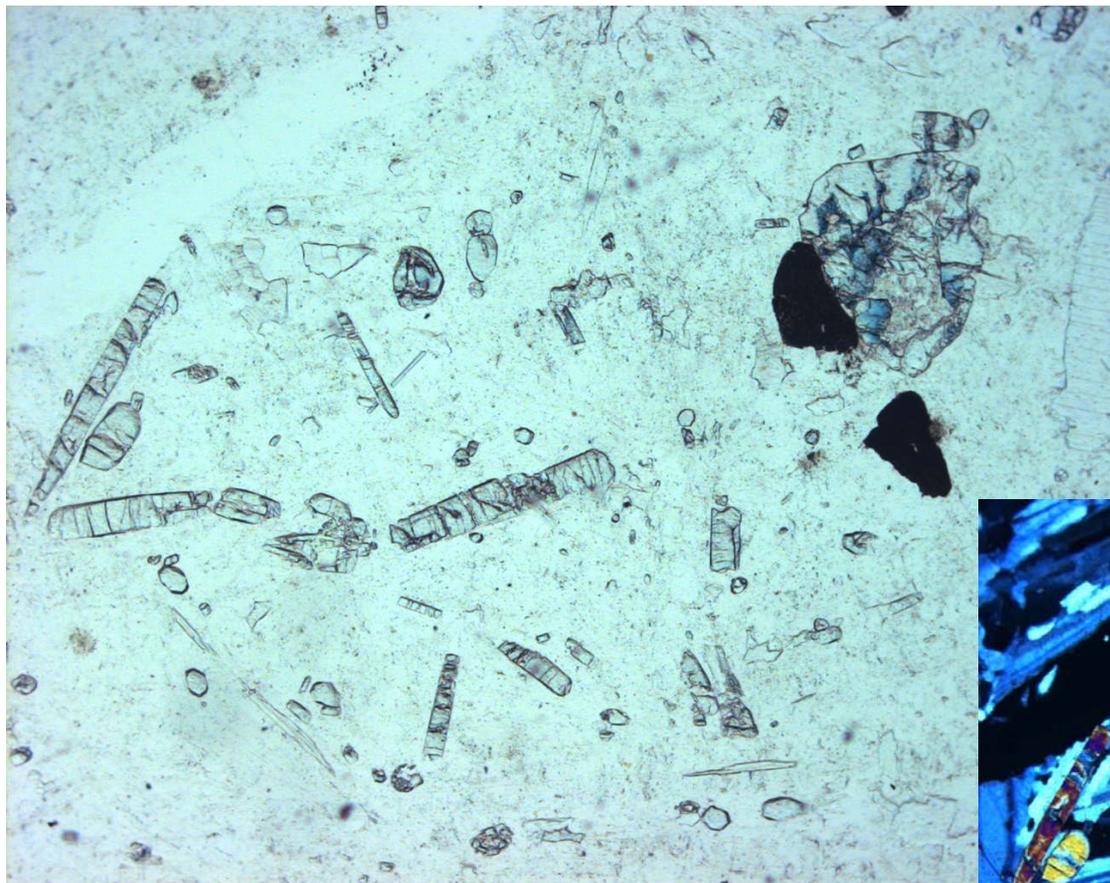
Колл. Ю.И.  
Филипповой  
Фото Э.М.  
Спиридонова

Николи  
х



# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Турмалин – эльбаит

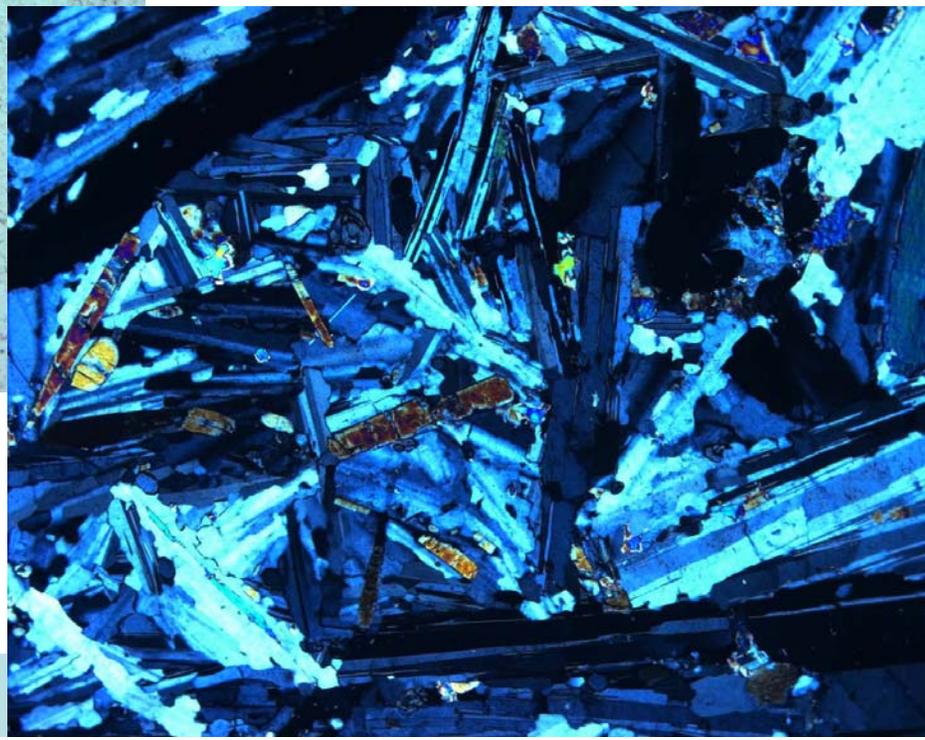


При 1 николе

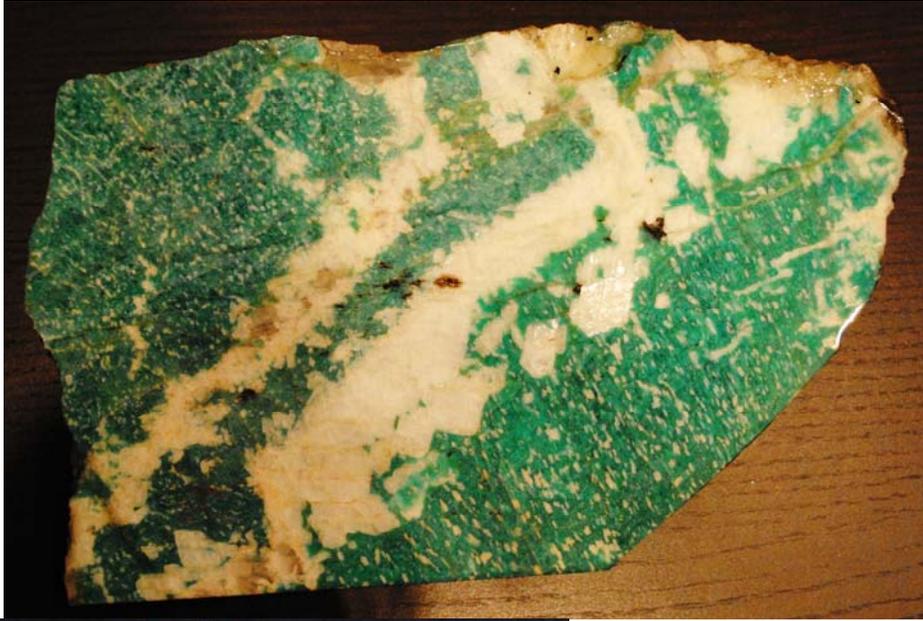
С танталлитом

Николи х

Колл. Ю.И. Филипповой  
Фото Э.М. Спиридонова



# РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Альбитовый замещающий комплекс. Кейвы



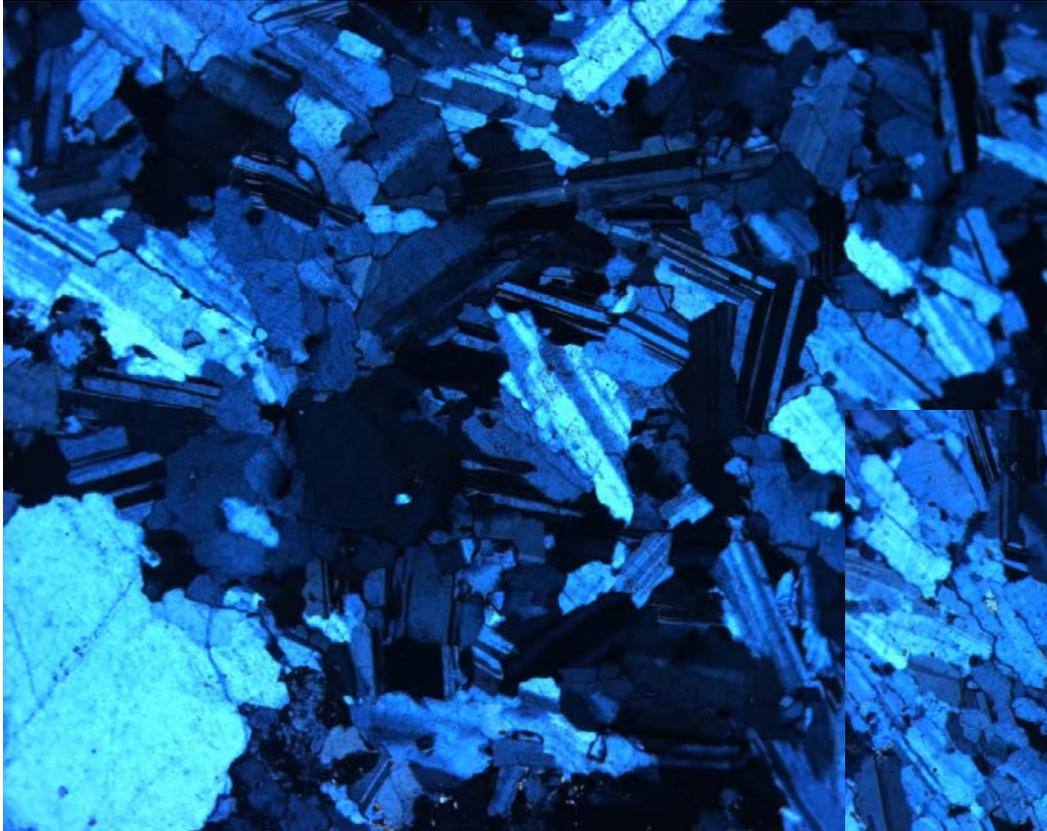
6451  
АЛЬБИТ В АМАЗОНИТЕ  
Albite in Amazonite  
Зап.Кейвы, г.Ровгора West. Keivy



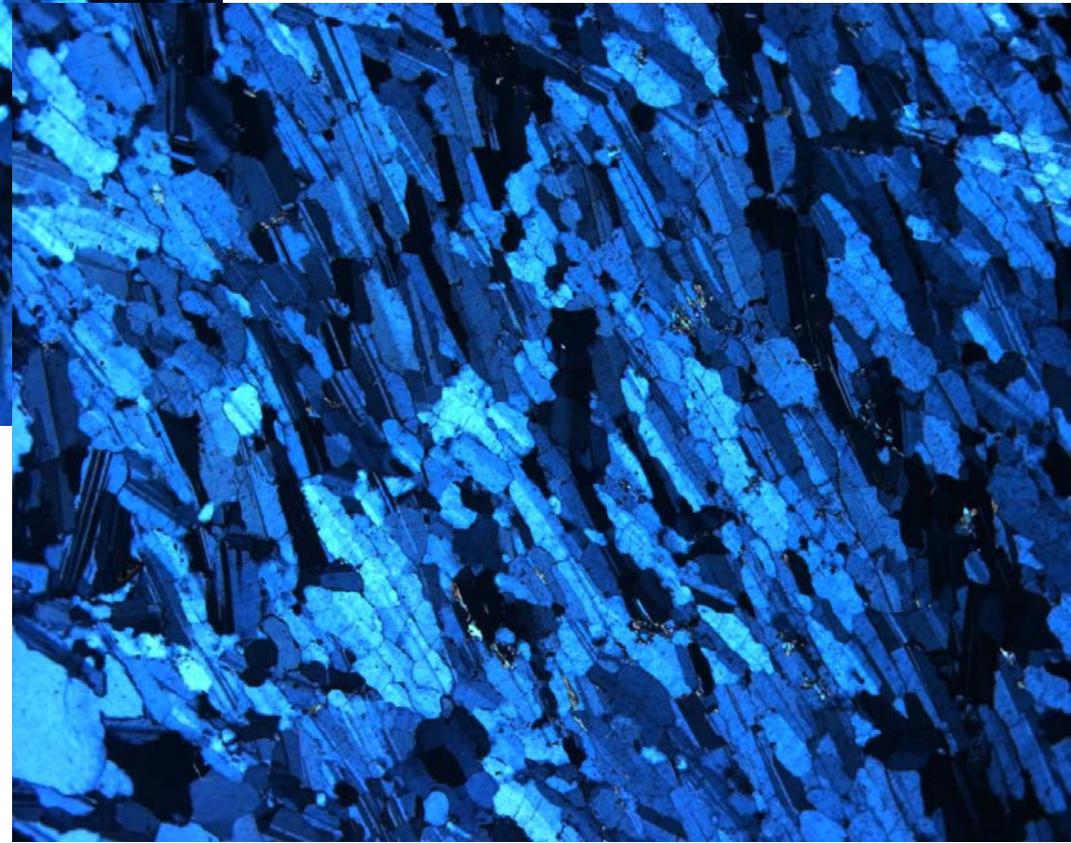
2065  
ПРОРАСТАНИЕ АМАЗОНИТА  
КВАРЦЕМ  
Amazonite intergrowth by quartz  
хр.Серповидный Western Keivy

Фото Н.Н. Жукова и  
Э.М. Спиридонова

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Альбитовый (клевеландит) замещающий комплекс. Калба



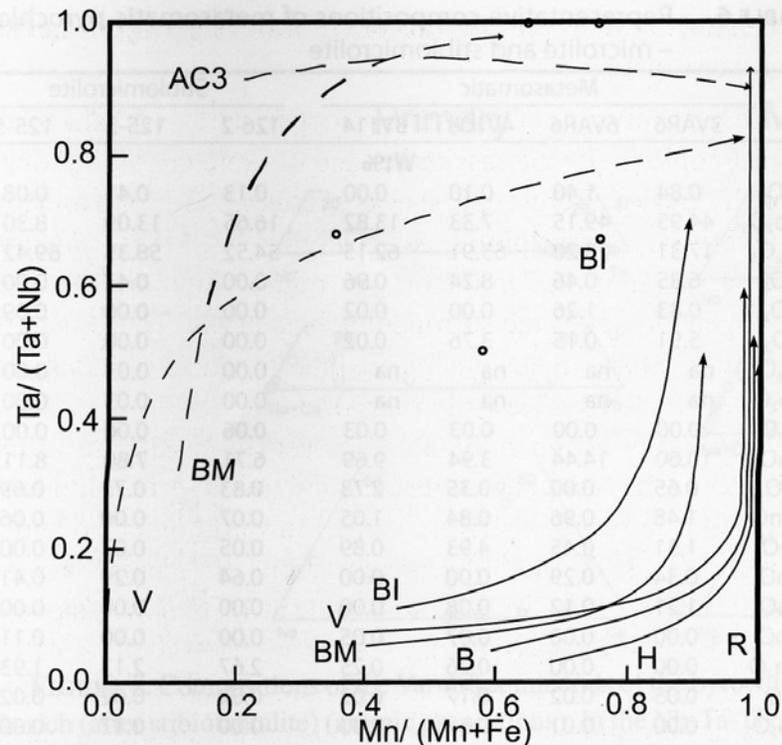
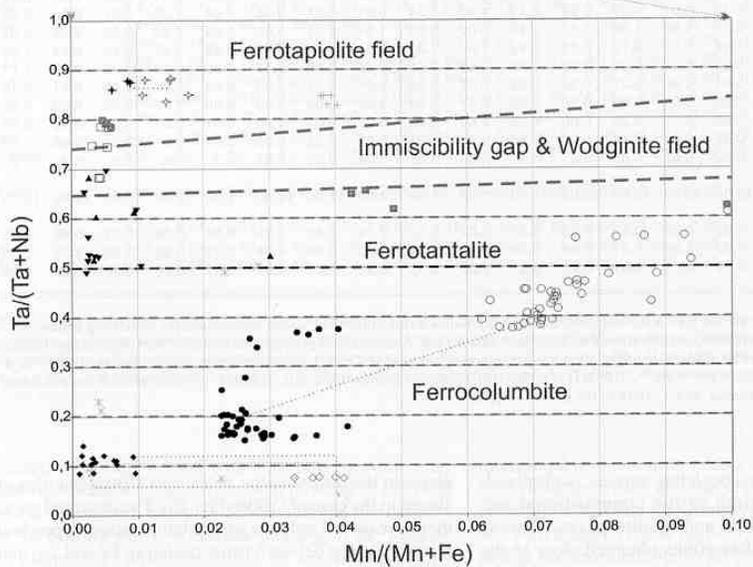
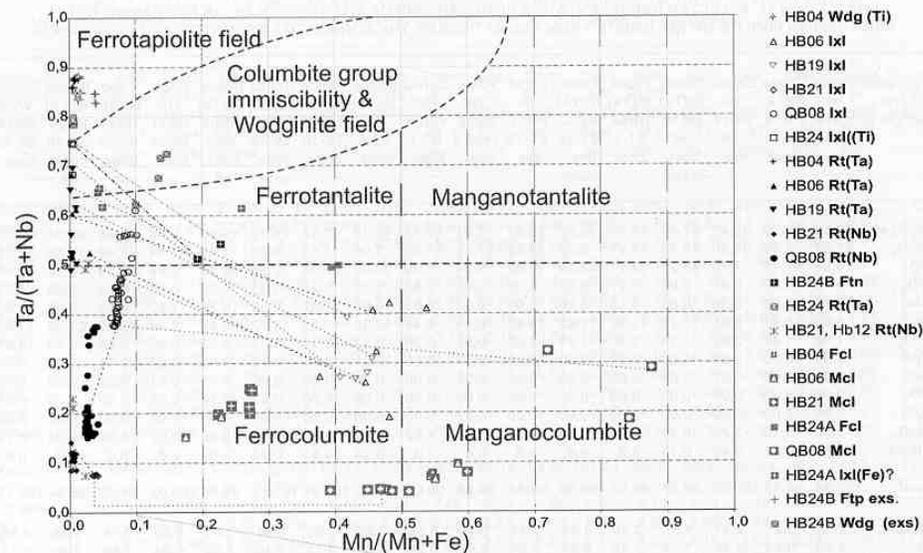
Колл. Ю.И. Филипповой  
Фото Э.М. Спиридонова



Николи х

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Оксиды Sn–Ti–Nb–Ta...



**FIGURE 9.** Compositional trends of columbite-group minerals (solid lines) and cassiterite (dashed lines and open circles) in lepidolite-subtype pegmatites and lepidolite-enriched assemblages, in the columbite quadrilateral (atomic proportions): V= Varuträsk, this study; BM = Black Mountain (C.D. Brown and M.A. Wise, pers. comm. 2002); AC = Annie Claim no. 3 (Masau et al. 2000); BI (open circles for cassiterite) = Bob Ingersoll (Spilde and Shearer 1992); B = Bennet (Wise et al. 2000); H = Himalaya District (Foord 1976); R = Rožná (Novák and Černý 2001).

**FIG. 7.** EMPA data on members of the rutile and ixolite groups and other coexisting Ti-Ta-Nb oxides (mainly columbite and wodginite groups) in six pegmatites from the BPP, plotted in the "columbite quadrilateral" [ $Ta/(Ta + Nb)$  versus  $Mn/(Mn + Fe^{total})$ ]. The analytical data for grains of different phases in direct contact are connected by dotted lines. Some data pertaining to coexisting ferrotapiolite, columbite and wodginite from the same occurrences are also plotted for comparison. Mineral abbreviations in the legend of this and the following figures are defined in footnotes to the tables. Wdg(Ti) stands for ferrotitanowodginite, Rt(Ta) for Ta-bearing rutile, Rt(Nb) for Nb-bearing rutile, Ixl(Fe) for a possible ferri-ixolite (or "ferri-ferriwodginite"), and Ftp(Ti) for titanian ferrotapiolite.

Эволюция состава касситерита и колумбита-танталлита

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Касситерит $(\text{Sn}, \text{Ti}, \text{Ta}, \text{Fe}^{3+}, \text{Nb}, \text{W})\text{O}_2$



160x130 мм. Карасу,  
Туркестанский хребет, Киргизия



Карасу, Туркестанский хребет,  
Киргизия



На пластинчатом  
альбите.  
Нуристан

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Касситерит



70x60 мм. Jenipapo, Itinga,  
Minas Gerais, Бразилия

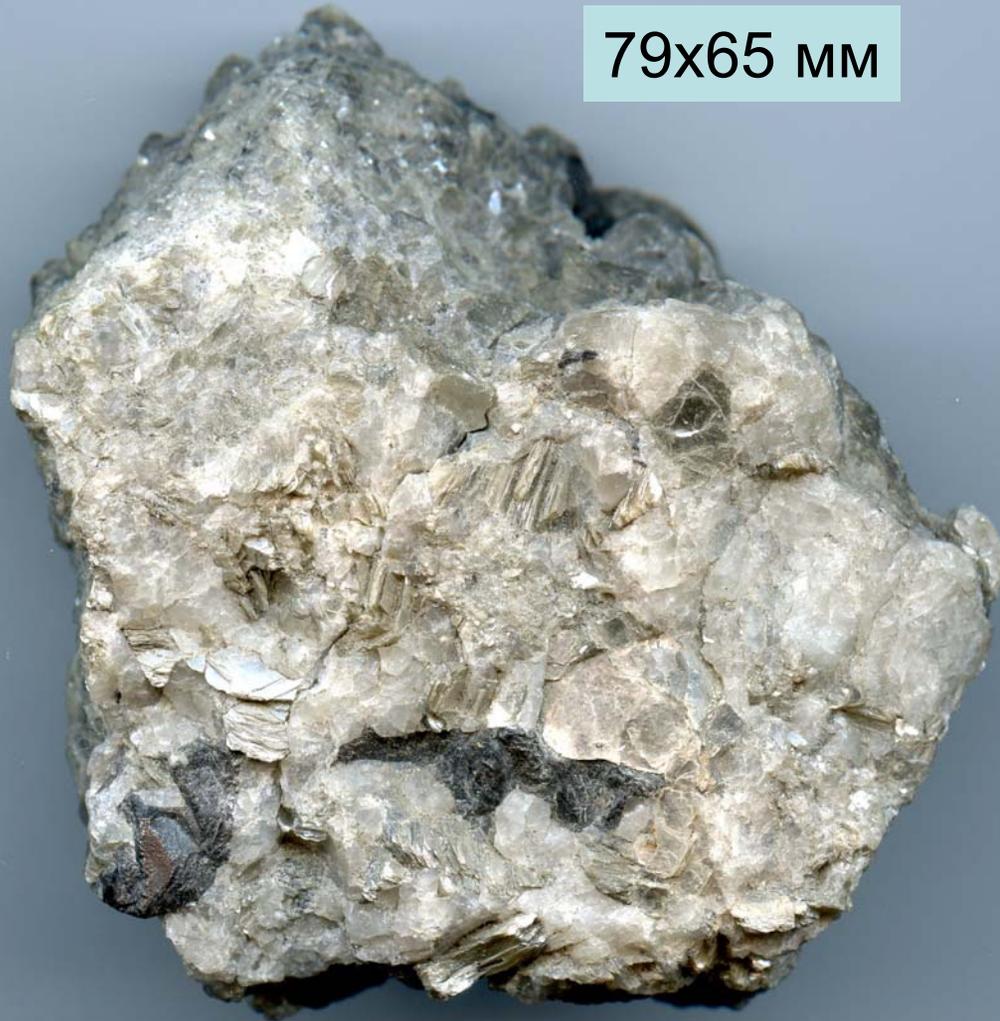


С альбитом.  
45x40 мм. Divino das Larajeiras,  
Minas Gerais, Бразилия

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Касситерит

79x65 мм



Бакенное, Восточный Саян

54x38 мм



Елаш, Восточный Саян



Калбинский хребет,  
ЮЗ Алтай

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Касситерит



Скелетный кристалл в мусковите. 110 мм.  
Kirengo, Руанда

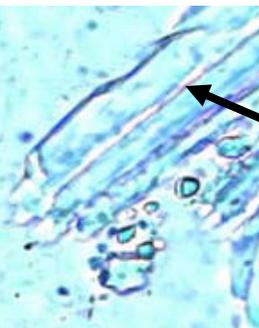


53 мм.  
На кварце.  
Shengus,  
Пакистан

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Касситерит. Калба, ЮЗ Алтай



При 1 николе



Мусковит

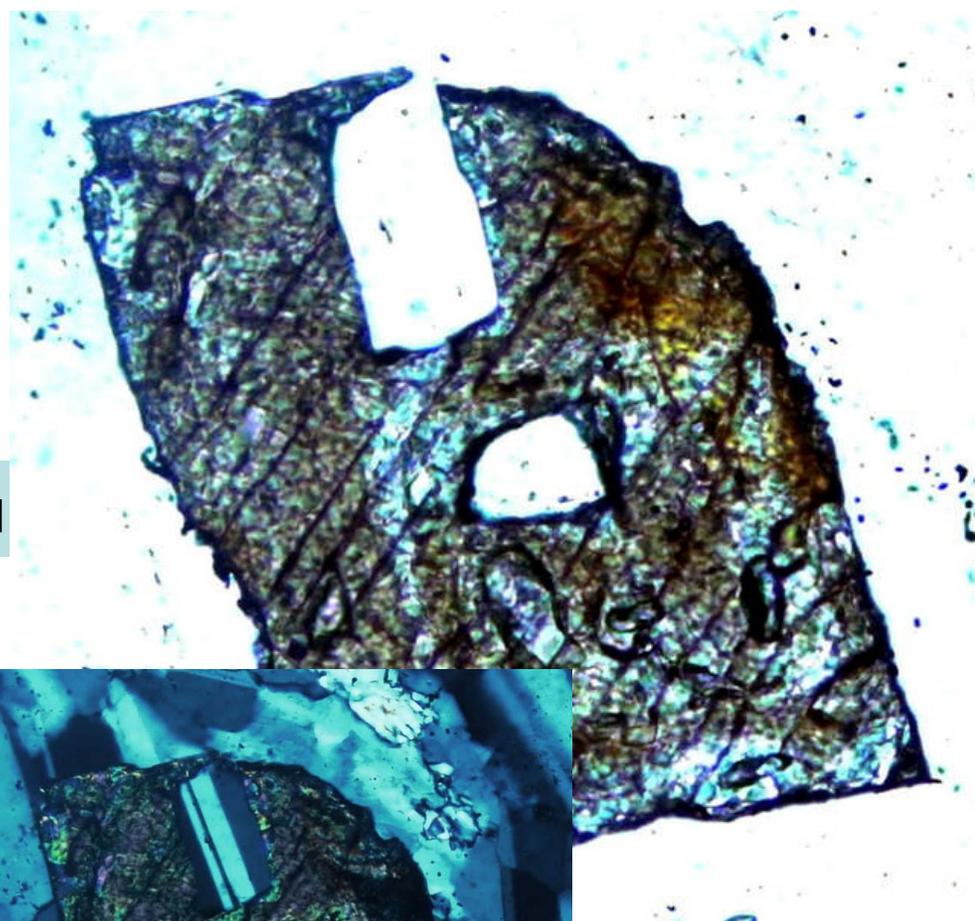


# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Касситерит. Калба, ЮЗ Алтай

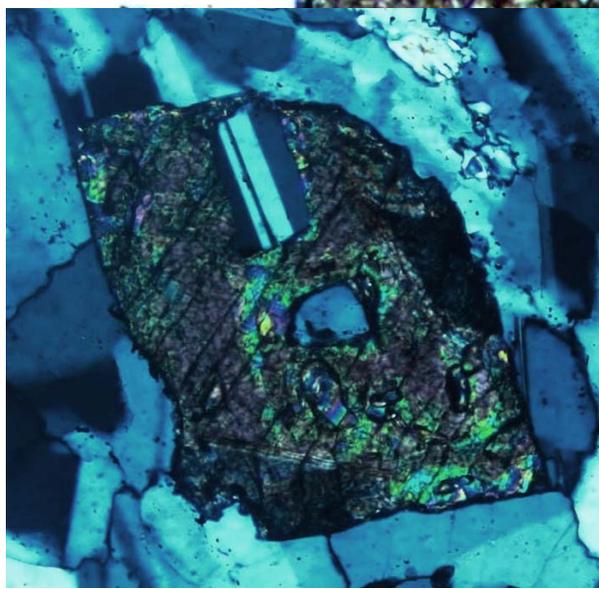


При 1  
николе

Сподумен



Николи х



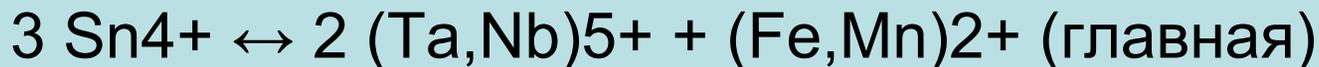
Колл.  
и фото  
ЭМС

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

## Касситерит

Пегматитовый касситерит – высокоТ твёрдый раствор на основе  $\text{SnO}_2$  со структурой рутила. Содержит значительные примеси Fe, Ti, Mn, W, Ta, Nb... Особую ценность пегматитовому касситериту придают высокие до 5 масс. % содержания Ta (значительная часть тантала получают при переработке оловяных шлаков). Так, касситерит редкометальных гранитных пегматитов Восточного Саяна в среднем содержит 1.1 (до 2) масс. % Ta и 1.0 (до 1.8) % Nb. Соотношение Ta/Nb в составе касситерита варьирует от 0.5 до 4 и более, - это хороший индикатор процесса дифференциации пегматитов.

Вероятные схемы изоморфных замещений :



ВысокоТ твёрдый раствор испытал распад: матрица  $\text{SnO}_2$  содержит менее 0.1 % Ta и Nb и массу телец распада.

# РЕДКОМЕТАЛЬНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ.

Торолит  $\text{Sn}^{2+} (\text{Ta}, \text{Nb})_2 \text{O}_6$



Манано, Демократическая Республика Конго (Африка)