

Э.М. Спиридонов

062. МИНЕРАЛОГЕНЕЗ

ГРАНИТНЫХ ПЕГМАТИТОВ.

**Миароловые – кристаллоносные
гранитные пегматиты.**

2 часть.

Инверсионные образования

Процессы формирования гранитных пегматитов расшифрованы далеко не полностью.

Некоторые из проблем:

- 1). где те огромные массы флюидов, количество которых по оценке А.А. Маракушева и Е.Н. Граменицкого достигает 80% пегматитообразующего расплава ?
- 2). как и когда возникли около пегматитовые геохимические и минеральные ореолы, нередко значительных размеров ?
- 3). существуют ли гранитные пегматиты скрещенния, иначе гибридные ? На каком этапе развития гранитных пегматитов формируются чуждые для них геохимические и минеральные особенности ?

В ходе кристаллизации гранит-пегматитового расплава увеличивалось флюидное давление, которое в ряде случаев возрастало до величин, превышающих литостатическое давление и прочность вмещающих пород. При этом пегматитовый “автоклав” мог приоткрыться и флюиды мигрировали в около пегматитовое пространство. Существенно – это пространство родственные граниты или геохимически чужая среда. Обычно переход к пневмато-гидротермальному этапу фиксирован α - β инверсией кварца (Ферсман, 1940) с большим объёмным эффектом.

Для глубинных пегматитов это характерно на стадии развития метасоматического “кварц-мусковитового комплекса”; около мусковитовых пегматитов возникали ореолы привноса Ba.

Для средне- и малоглубинных пегматитов это характерно на стадии развития “клевеландитового комплекса” и/или “альбит-лепидолитового комплекса”; около редкометальных пегматитов возникали ореолы привноса F, Li, Rb, Cs, развивались холмквистит, Cs-биотит-флогопит...

Особо интересны инверсионные образования миароловых мало глубинных и средне глубинных пегматитов.

Остаточные флюиды, выброшенные из пегматита во вмещающую среду, активно с ней реагировали.

При этом флюиды разбавлялись, их кислотность снижалась, появлялась возможность роста минералов с Fe^{3+} (чайного цвета топазы...) и с Mn^{3+} (интенсивно окрашенные турмалин - рубеллит, гранат – спессартин, сподумен - кунцит...).

Часть вещества, заимствованного из пород рамы, мигрировало в пегматитовые полости. В результате в пегматитах в одних регионах появились богатые Cu и Au (!) турмалины; в других регионах - Cr -содержащие зелёный сподумен (гидденит), розовый топаз и берилл - изумруд;

в третьих - полихромные эльбаиты – лиддикоатиты - фойтиты с оторочками шерла – увита – бюргерита – дравита с Ti и Fe^{3+} и Mn^{3+} ;

в четвёртых регионах появились полихромные бериллы, где на розовый Li - Cs берилл – пезоттаит = воробьевит (морганит) вырос голубой Fe - Mg - Na берилл...

Итак, состав поздних образований гранитных пегматитов иногда частью зависит от состава вмещающих толщ, что сближает эти образования с гидротермальными рудными жилами и делает понятной известную формулировку

А.Н. Заварицкого о том, что пегматиты - промежуточные образования между магматитами и гидротермалитами.

О гранитных пегматитах скрещения

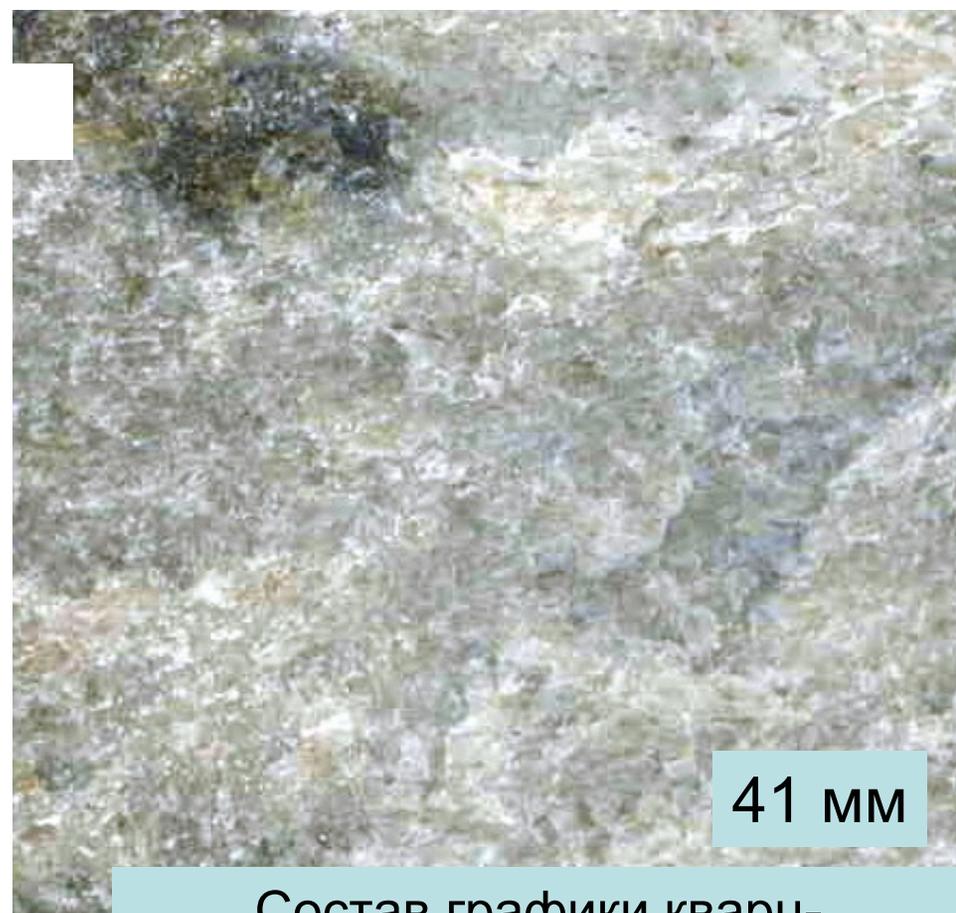
В действительности всё не так,
как на самом деле.

Антуан де Сент Экзюпери

О гранитных пегматитах скрещения

Признаками гранитных пегматитов скрещения считается наличие в них «чужих» минералов и минеральных ассоциаций – корунда, амфиболов и пироксенов, магнезиальных разновидностей стандартных пегматитовых минералов... Если это на самом деле гранитные пегматиты скрещения, то должен измениться состав графических сростаний – снизиться содержание кварца... На самом деле, ничего подобного не наблюдается. Состав графики в так называемых пегматитах скрещения ровно такой же, как и в пегматитах чистой линии. Корунд и иные “чужие” минералы – поздние образования, наложенные на графические агрегаты полевых шпатов и кварца. Многие образования, которые раньше относили к пегматитам скрещения, вообще не имеют отношения к пегматитам, - это разнообразные высоко температурные гидротермально-метасоматические образования. Таковы слюдиты (цвиттеры) с изумрудом...

О гранитных пегматитах скрещения



Состав графики кварц-
К-Na полевой шпат стандартный
для этого поля пегматитов

Графический гранитный пегматит с корундом среди базитов - гипербазитов. Липовка – Маслянка, Ср. Урал. Корунд здесь гидротермально-метасоматический, наложен на «графику»

О гранитных пегматитах скрещения

Серпентинизир. гарцбургиты

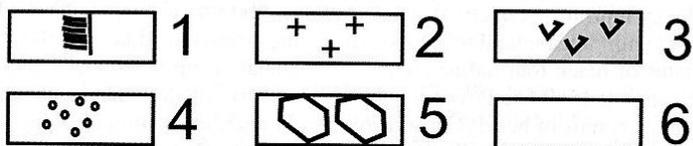
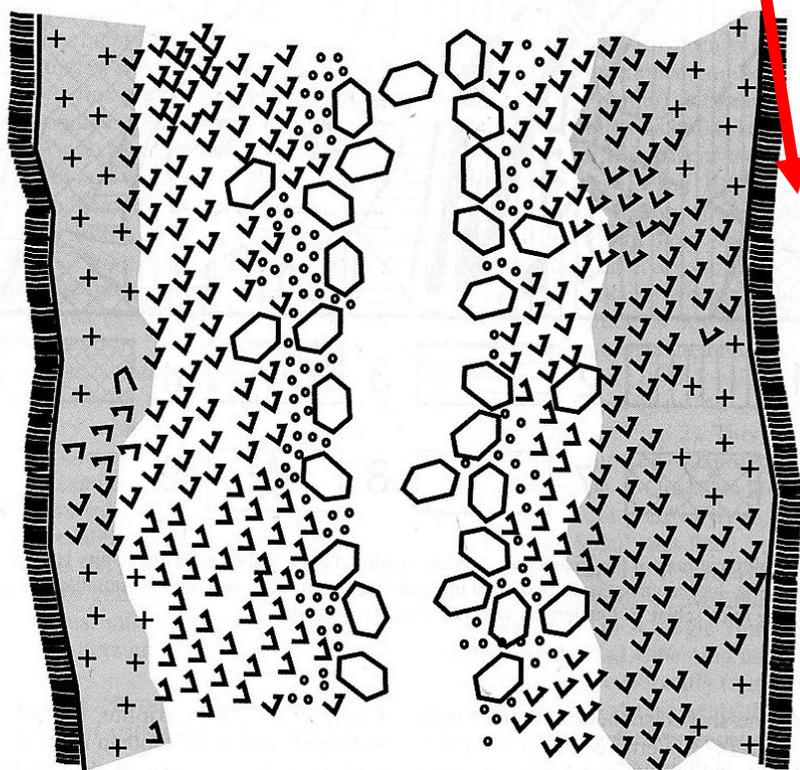


FIG. 2. Simplified cross-section through the portion of the pegmatite Věžná I examined; the thickness of the dike is ~3 m. Units 1: reaction rim between pegmatite and serpentinitized peridotite, 2: granitic wall unit, 3: intermediate graphic unit (shaded areas: "kerolite" after quartz), 4: albitization (albite unit), 5: blocky feldspar, 6: quartz core.

1. Реакционная зона – флогопит + кордиерит + кварц..
2. Агрегаты К-На полевой шпат + олигоклаз + кварц + биотит.
3. Графика кварц + К-На полевой шпат и кварц – олигоклаз.
5. Блоковый К-На полевой шпат.
6. Кварцевое ядро.
4. Участки альбитизации – агрегаты клевеландита с фторапатитом, колумбитом, Li слюдами, Cs бериллом, поллучитом...

Гранитный пегматит среди гипербазитов Věžná I, западная Моравия, Чехия (Dosbaba M. & Novák M., 2012. Can. Min. V. 50)

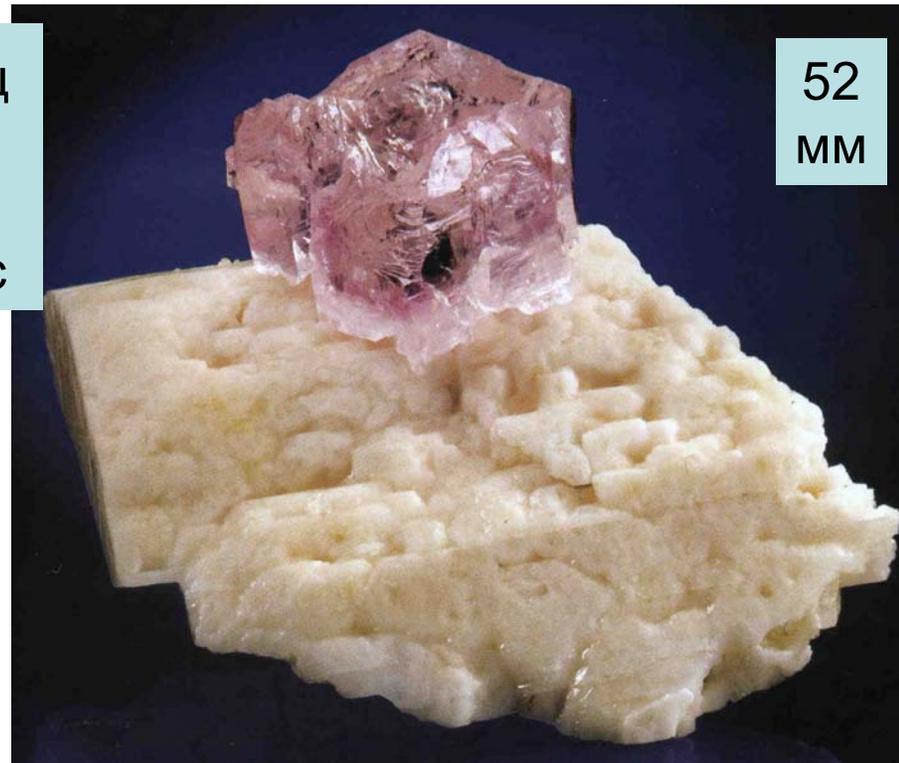
Инверсионный кварц

Аметистовый кварц абсолютно прозрачный светлого фиолетово-розового цвета слагал блоки объёмом до 1,5 кубических метров в ядре пегматитов в Кентском лейкогранитном плутоне, Центральный Казахстан. Друзы аметистового кварца развиты во многих пегматитах Бразилии. Окраска аметиста обусловлена наличием структурной примеси Fe^{3+} (Fe^{4+}); будучи облучены Fe-центры создают фиолетовую окраску различной интенсивности. Fe^{3+} мало устойчив в кислой среде. Поэтому появление аметиста - признак инверсии в развитии гранитных пегматитов.



Розовый кварц
на альбите.
Pitorra mine,
Минас Жераис

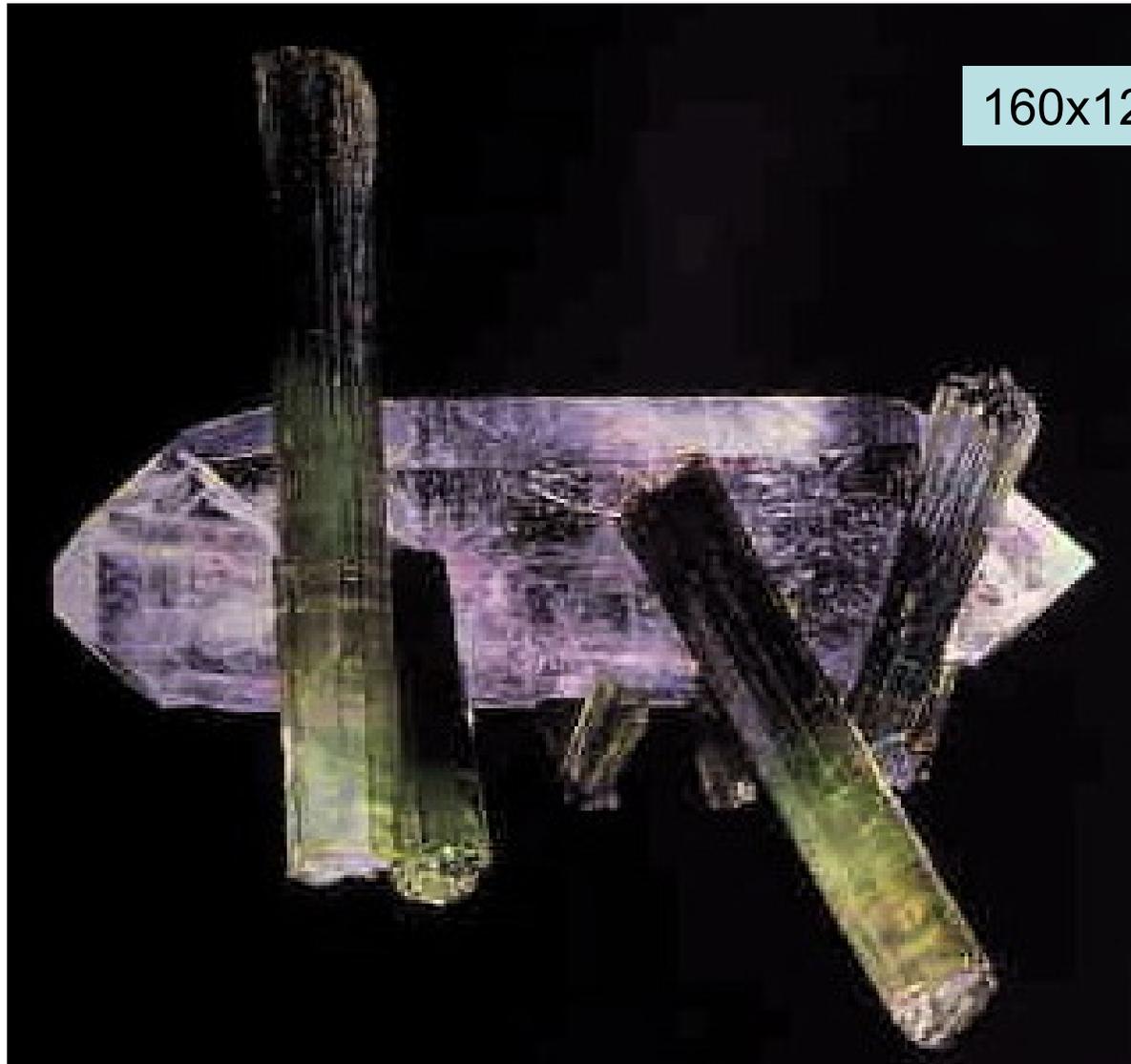
Сиренево-розовый
кварц с шерлом.
Sarusaia mine,
Минас Жераис,
Бразилия



52
мм

Инверсионный кварц

Аметист



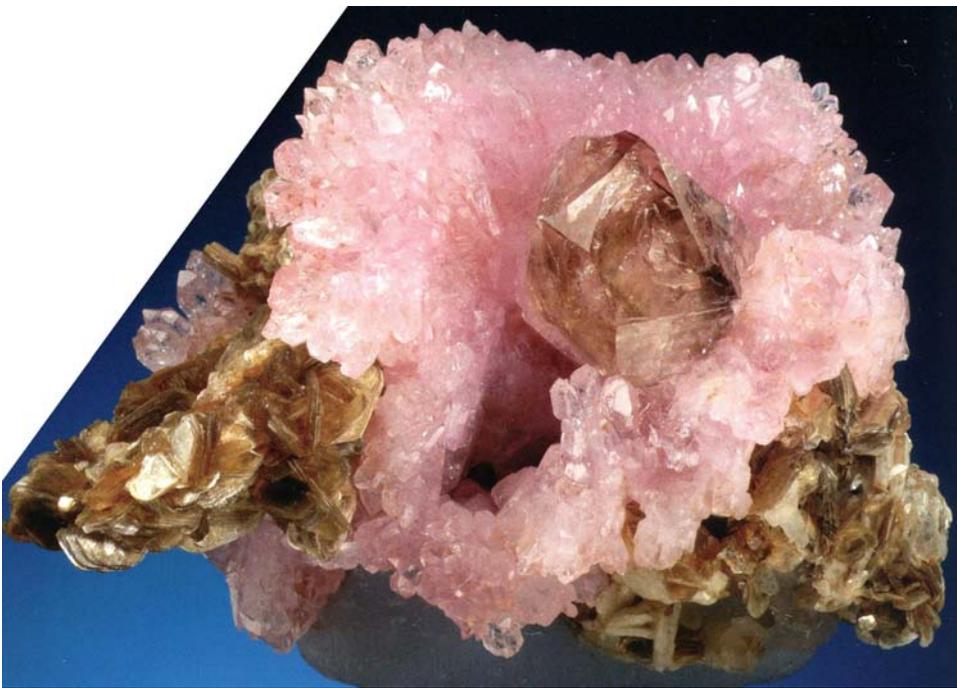
160x120 мм

Эльбаит-лиддикоатит с аметистом. Cruzeiro mine, Бразилия

Инверсионный кварц

Цитрин

С аметистовым кварцем и мусковитом.
100 мм. Минас Жераис



На полево шпате и мусковите. 125x110 мм.
Galileo, Минас Жераис, Бразилия

Инверсионный мусковит



Зелёный железистый мусковит.
65 мм. Erongo, Намибия

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



25 мм. Igles mine, Ramona,
Калифорния



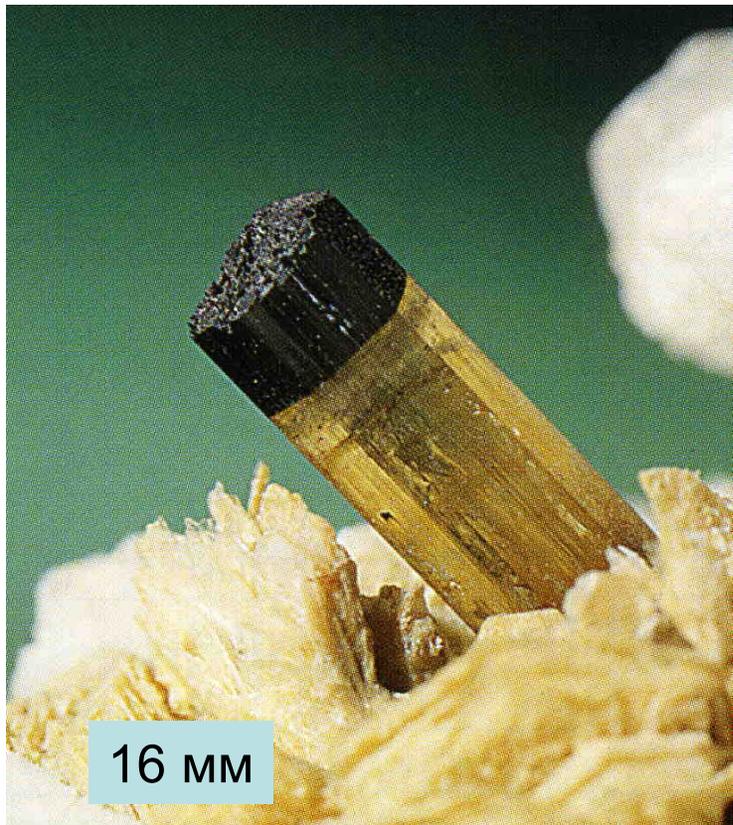
30 мм.
Минас
Жераис,
Бразилия



На микроклин-пертите.
Гилгут, Пакистан

Один из наиболее ярких минералов – индикаторов инверсии в развитии гранитных пегматитов – турмалинов. Инверсионные турмалины, обычно густо окрашенные, выросли на бледно окрашенные турмалины “чистой линии”- эльбаит...

Эльбаит - рубеллит на ахроите



16 мм

**Магнезиофойтит
на эльбаите.
Sant Piero in Campo**

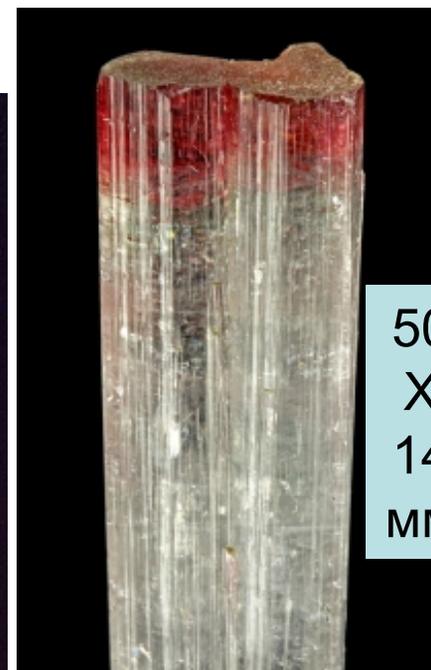
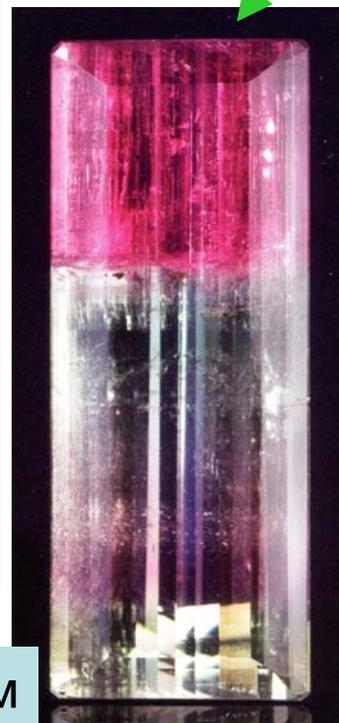


60
мм

38x15 мм

Korgal,
Longman,
Афганистан

Aracuaí,
Минас
Жераис



50
X
14
мм

Pederneira mine,
Минас Жераис

Инверсионные турмалины

Турмалины - рубеллит, верделлит, индиголит. Стандартная последовательность формирования турмалинов в гранитных пегматитах “чистой линии” : шерл → тсилаизит → эльбаит → россманиит, $\text{Na Fe}^{2+}_3 \text{Al}_6 (\text{BO}_3)_3 [\text{Si}_6\text{O}_{18}] (\text{OH}, \text{F})_4 \rightarrow$
 $\text{Na} (\text{Mn}^{2+}_{1.5} \text{Al}_{1.5}) \text{Al}_6 (\text{BO}_3)_3 [\text{Si}_6\text{O}_{18}] (\text{OH}, \text{F})_4 \rightarrow$
 $\text{Na} (\text{Li}_{1.5} \text{Al}_{1.5}) \text{Al}_6 (\text{BO}_3)_3 [\text{Si}_6\text{O}_{18}] (\text{F}, \text{OH})_4 \rightarrow$
□ $(\text{LiAl}_2) \text{Al}_6 (\text{BO}_3)_3 [\text{Si}_6\text{O}_{18}] (\text{F}, \text{OH})_4.$

Самоцветные турмалины с интенсивными окрасками, которые обусловлены наличием ионов Mn^{3+} , Fe^{3+} , Ti^{4+} , V^{3+} , Cu^{2+} ..., представляют образования инверсионного периода и характерны для гранитных пегматитов, залегающих вне материнских плутонов. Для них характерно развитие совместно с эльбаитом и вместо него лиддикоеатита $\text{Ca} (\text{Li}_2\text{Al}) \text{Al}_6 (\text{BO}_3)_3 [\text{Si}_6\text{O}_{18}] (\text{F}, \text{OH})(\text{OH})_3$. Таковы замечательные турмалины в миароловых пегматитах Урала, Забайкалья, Памира, Бразилии, Нигерии, Калифорнии, Мадагаскара. Одни из знаменитых - месторождения

Инверсионные турмалины

Среднего Урала - Шайтанское, Сарапулское, Липовское, содержащие прозрачные кристаллы эльбаита - рубеллита длиной до 14 см густого малинового цвета, которые в России именовали сибиритом или малиновым шерлом. В этих же месторождениях широко развит и полихромный турмалин (чёрные кристаллы с малиновым концом, малиновые кристаллы с синим концом...) (Ферсман, 1925, 1940, 1954, 1961; Драгоценные..., 1941; Киевленко и др., 1974; Юшкин и др., 1986; Попова и др., 1999). Великолепные цветные и полихромные турмалины содержат миароловые гранитные пегматиты Забайкалья (Борщёвочный кряж, Малханское), Мадагаскара (Sanga-sanga, Anjanabonoina), Калифорнии (Pala), Нигерии, Памира, Афганистана (Korgal) и Пакистана, в т.ч. интенсивно окрашенный рубеллит = эльбаит с $n\%$ MnO и Mn_2O_3 , рубеллит = лиддикоатит, верделлит эльбаит-лиддикоатитового состава, шерл-эльбаит и шерл-увит (Загорский и др., 1999; Киевленко и др. 1974; Gübelin &

Инверсионные турмалины

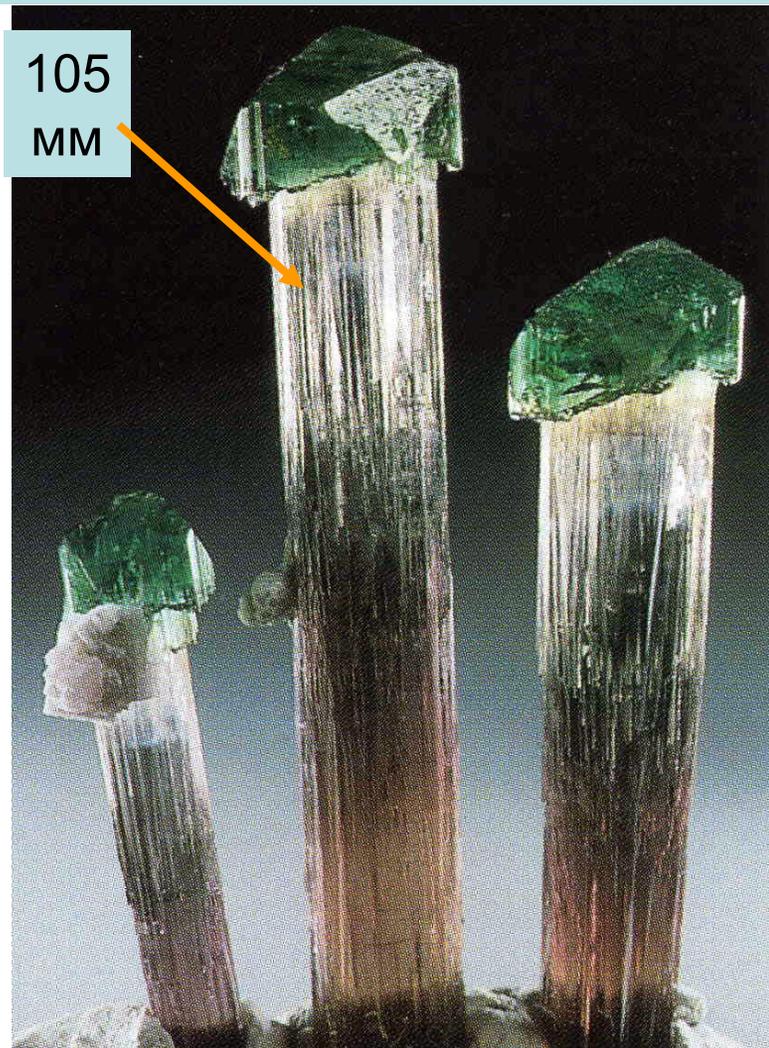
Koivula, 1986; Höchleiter et al., 1996; Keller et al. 1989; Medenbach & Wilk, 1977; Simmons et al., 2001; Taylor, 1999). Пожалуй самые выдающиеся по качеству, размеру ювелирных кристаллов (до 1,5 м !) и размеру миарол - занорышей (до 5 м), выстланных кристаллами рубеллита, - гранитные пегматиты Araquai, Governador Valadares..., Минас Жераис, Бразилия (Sauer, 1982 и др.). Здесь развиты турмалины всех цветов радуги, в том числе густо лиловые рубеллиты Conselheiro Pena. Высокого качества рубеллиты, верделлиты, индиголиты и полихромные турмалины распространены в миароловых пегматитах Центрального Забайкалья в Борщовочном и Малханском хребтах; длина прозрачных кристаллов до 12 см; своеобразная окраска верделлита = эльбаита-тсилаизита обусловлена примесью 0,1% V_i и Pb (Загорский и др., 1992). Полихромные, розовые, оранжевые и желтовато-зелёные V_i -содержащие турмалины известны в пегматитах Lundazi, Замбия (Johnson et al., 1997).

Инверсионный турмалин - эльбаит

Скипетры эльбаита - верделлита на обычном эльбаите



Pederneira, Минас Жераис, Бразилия



Barra de Salinas, Минас Жераис, Бразилия

Инверсионный турмалин - эльбаит

Скипетры эльбаита - верделлита на обычном эльбаите

Кристаллы до 50 мм.
Santa Rosa mine,
Минас Жераис, Бразилия

До 51 мм. Barra de Salinas,
Минас Жераис, Бразилия



40x19 мм.
Barra de
Salinas,
Минас
Жераис,
Бразилия

Инверсионный турмалин –
эльбаит - рубеллит с Fe^{3+} - Mn^{3+} вырос на
ранний стандартный эльбаит



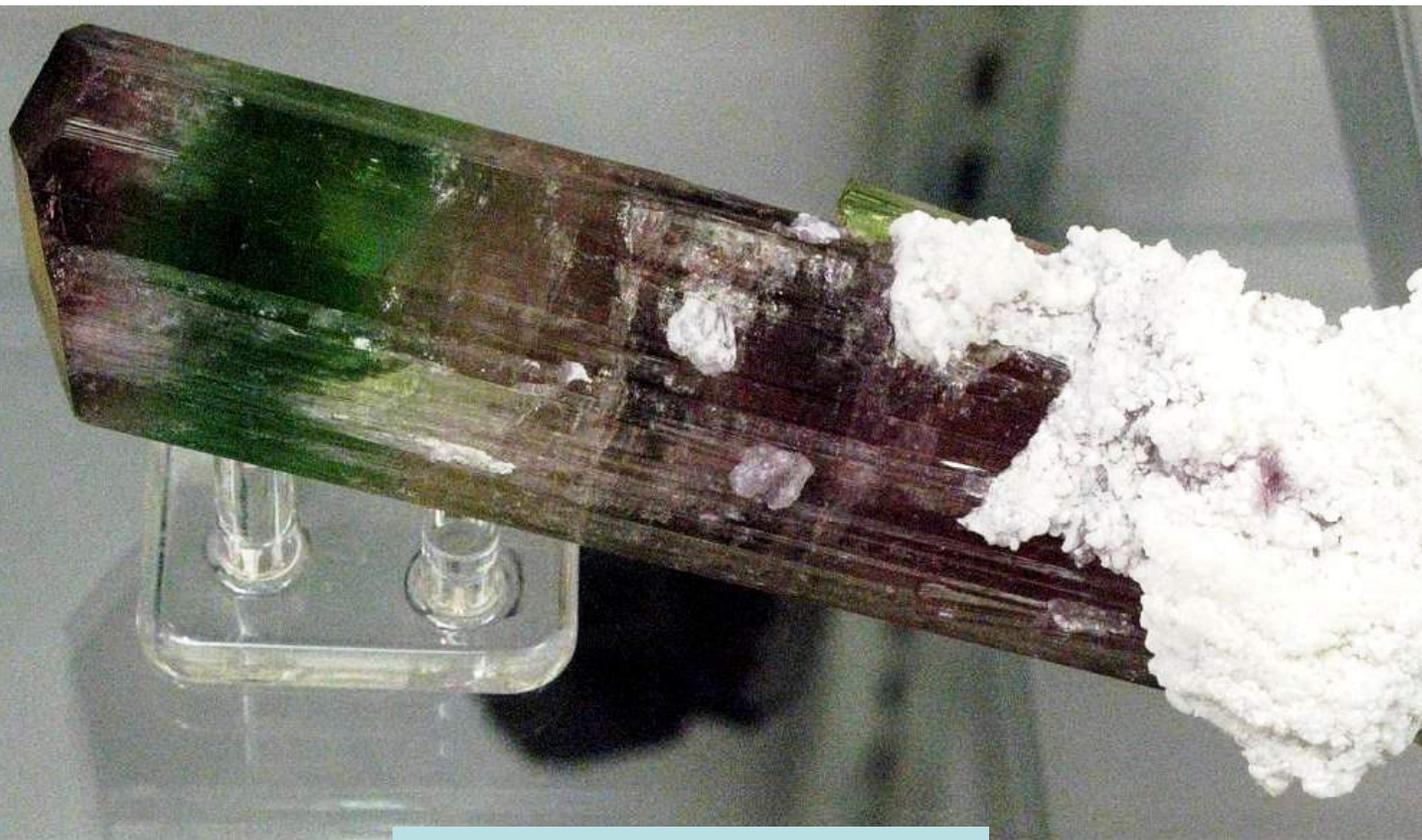
50x14 мм.
Pederneira mine,
Minas Gerais



Tourmaline
Queen mine,
San Diego
County,
Калифорния

Инверсионный турмалин - эльбаит

Эльбаит - верделлит на эльбаите



Parrock, Kunar,
Nuristan, Afghanistan



Darra-e-Pech,
Nargarhar,
Afghanistan

Инверсионный турмалин - эльбаит

Турмалин - эльбаит на шерле чистой линии



Момеик, Могок, Бирма

Инверсионный турмалин – эльбаит-рубеллит с Fe^{3+} - Mn^{3+}



С кварцем и альбитом.
328 мм. Реч, Афганистан



Липовка,
Средний Урал



Пала, округ
Сан-Диего,
Калифорния

Инверсионный турмалин – эльбаит-рубеллит с Fe^{3+} - Mn^{3+}



Himalaya mine,
Калифорния



Tourmaline
Queen mine,
San Diego
County,
Калифорния

Инверсионный турмалин – эльбаит-рубеллит с Fe^{3+} - Mn^{3+}



21 мм. Ibity,
Мадагаскар



20x10 мм.
Мокруша, Ср. Урал



Малхан,
Восточное
Забайкалье

65x30 мм



Инверсионный турмалин – эльбаит-рубеллит с Fe^{3+} - Mn^{3+}



С альбитом-клевеландитом.
Jonas mine, Минас Жераис,
Бразилия



380 мм

С лепидолитом.
Conselheiro Pena, Минас Жераис

Инверсионный турмалин – эльбаит-рубеллит с Fe^{3+} - Mn^{3+}



60x50 мм

С горным
хрусталём

Lavra
do Jonas,
Conselheiro
Pena,
Минас
Жераис

130x90 мм. Lavra do Jonas,
Conselheiro Pena, Минас Жераис

Инверсионный турмалин – эльбаит-рубеллит с Fe^{3+} - Mn^{3+}



70x60 мм



С альбитом,
кварцем,
лепидолитом.
Lavra do Jonas,
Conselheiro Pena,
Минас Жераис

Инверсионные турмалины – эльбаит с Fe^{3+} - Mn^{3+}

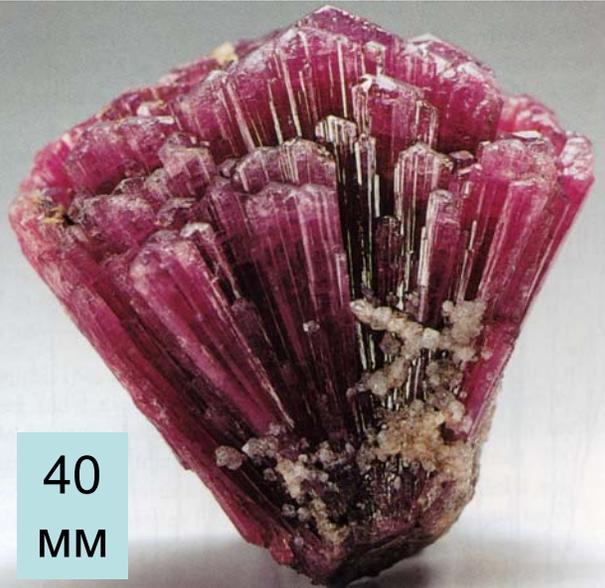


1070 мм

Гигантский занорыш с эльбаитом. Минас Жераис, Бразилия

Инверсионный турмалин – эльбаит-рубеллит с Fe^{3+} - Mn^{3+}

Агрегаты расщеплённых кристаллов



40
мм

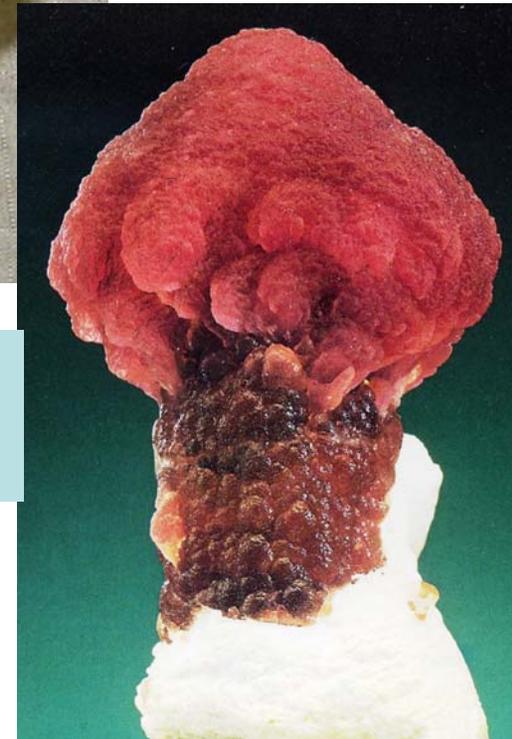
Шайтанка, Ср. Урал

90x60 мм



Липовка,
Средний Урал

78 мм. Maingnin,
Могок, Бирма



30 мм. Момеик,
Могок, Бирма



Инверсионный турмалин - эльбаит

Эльбаит-верделлит на эльбаите-рубеллите с лепидолитом



110 мм. Нигерия



Инверсионный турмалин - эльбаит

Эльбаит-верделлит на эльбаите-рубеллите в кварце с альбитом



750 мм.

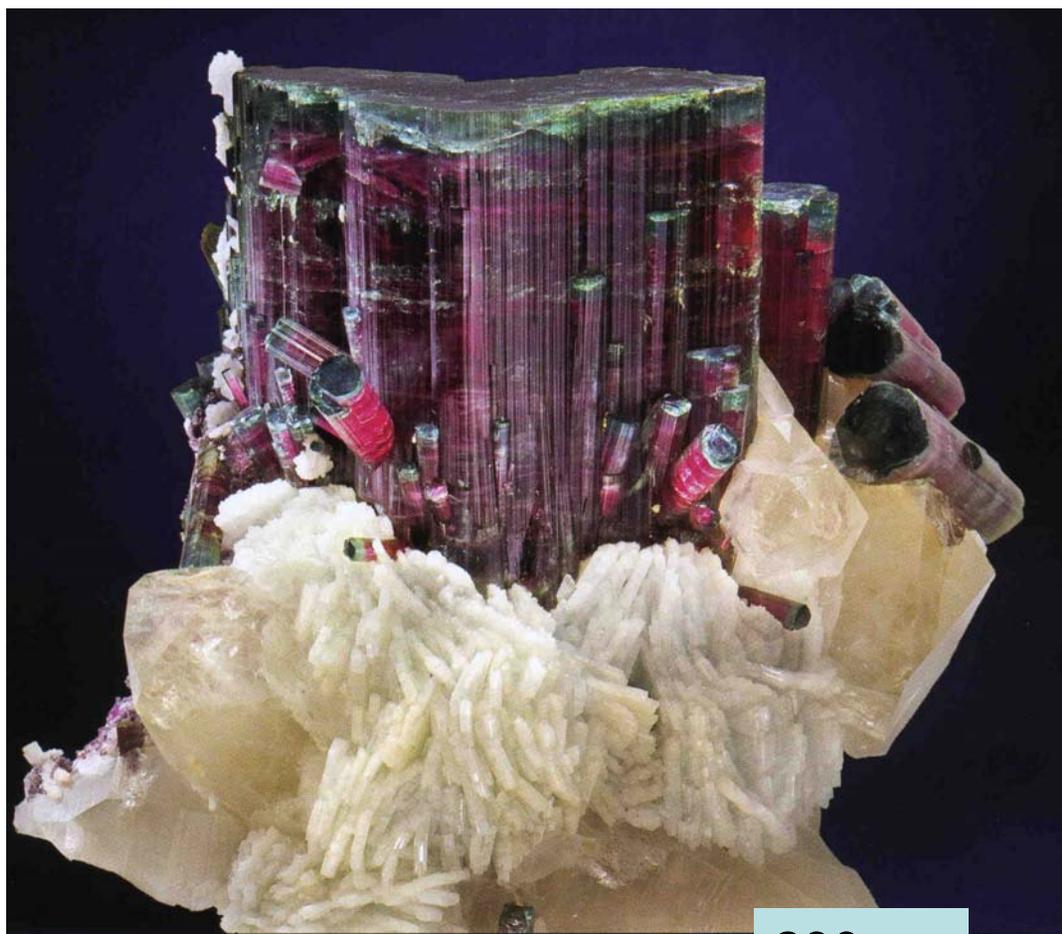
Мадагаскар

Инверсионный турмалин - эльбаит

Эльбаит-верделлит на эльбаите-рубеллите



154 мм



230 мм

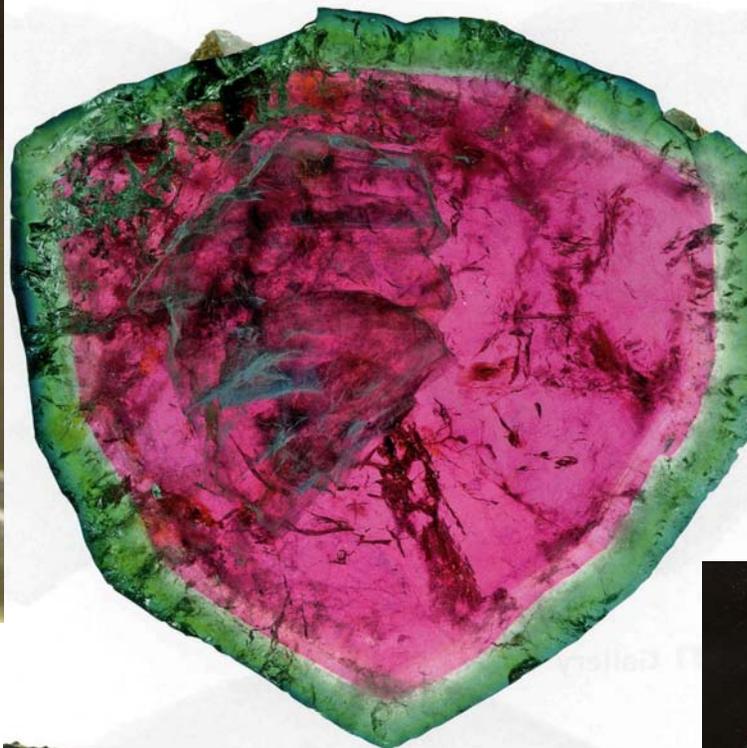
Pederneira Mine,
Минас Жераис, Бразилия

Инверсионный турмалин - эльбаит

Эльбаит-верделлит на рубеллите – “арбузный” турмалин



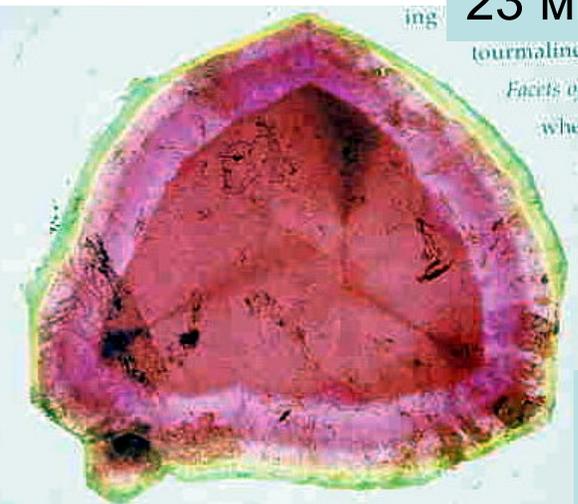
23 мм



Эронго, Намибия



Малхан,
Забайкалье



Main,
США

65 мм.
Dunton Quarry,
Мэн, США



Инверсионный турмалин - эльбаит

Эльбаит-верделлит на рубеллите – “арбузный” турмалин

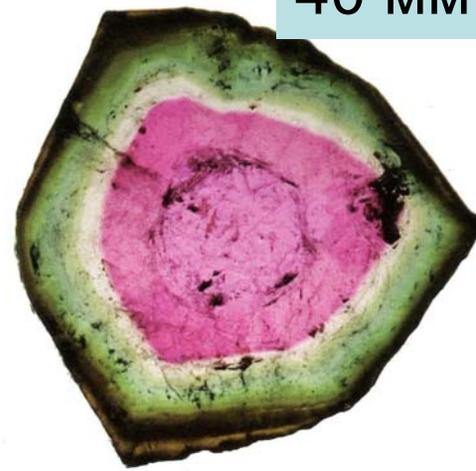


125x75 мм.
Lavra da
Santa Rosa,
Franciscopolis,
Минас Жераис

25
мм

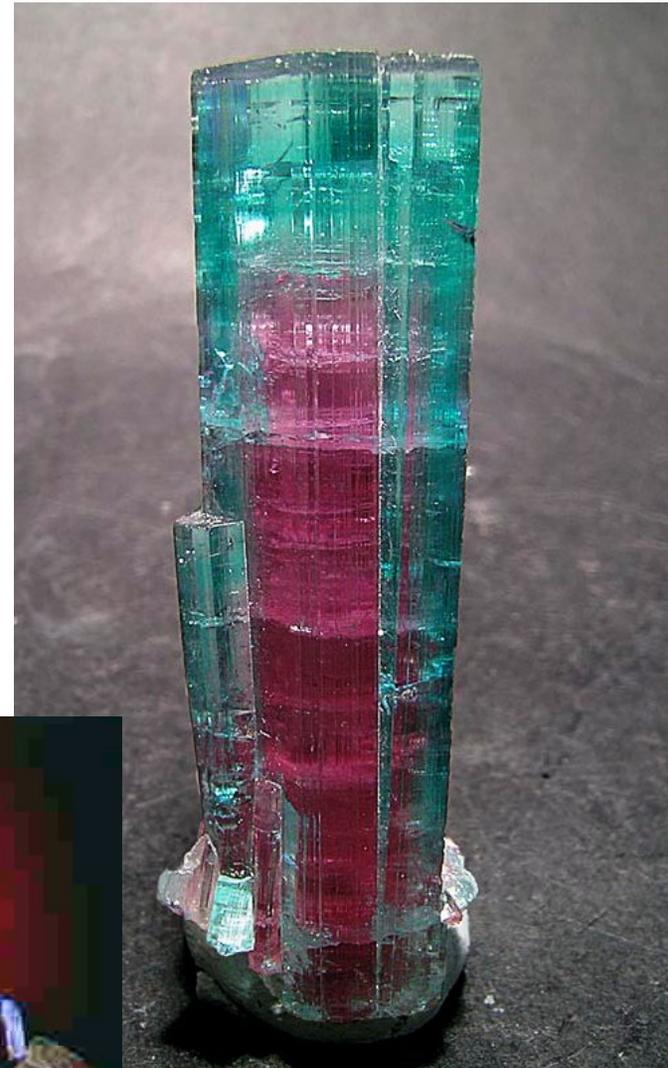


40 мм



Инверсионный турмалин - эльбаит

Эльбаит-индиголит на эльбаите-рубеллите



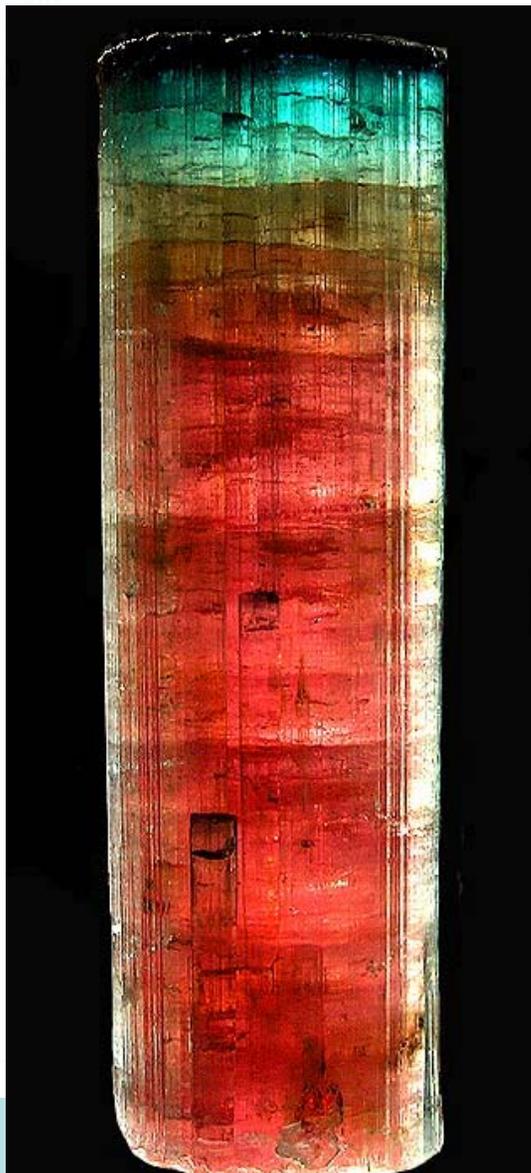
Калифорния

Инверсионный турмалин - эльбаит

Сложно зональный



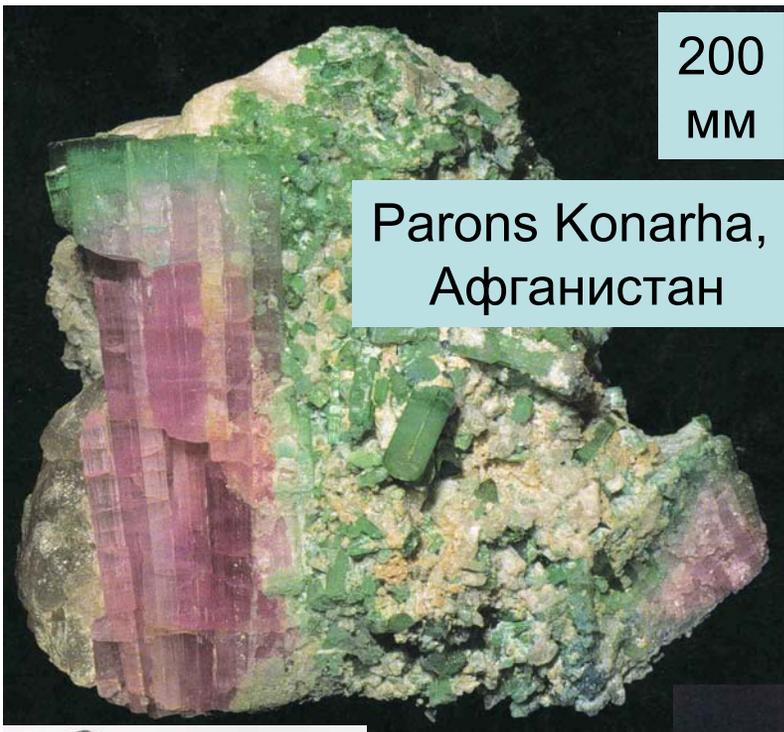
Хьюстон, США



Tourmaline Queen Mine,
Калифорния

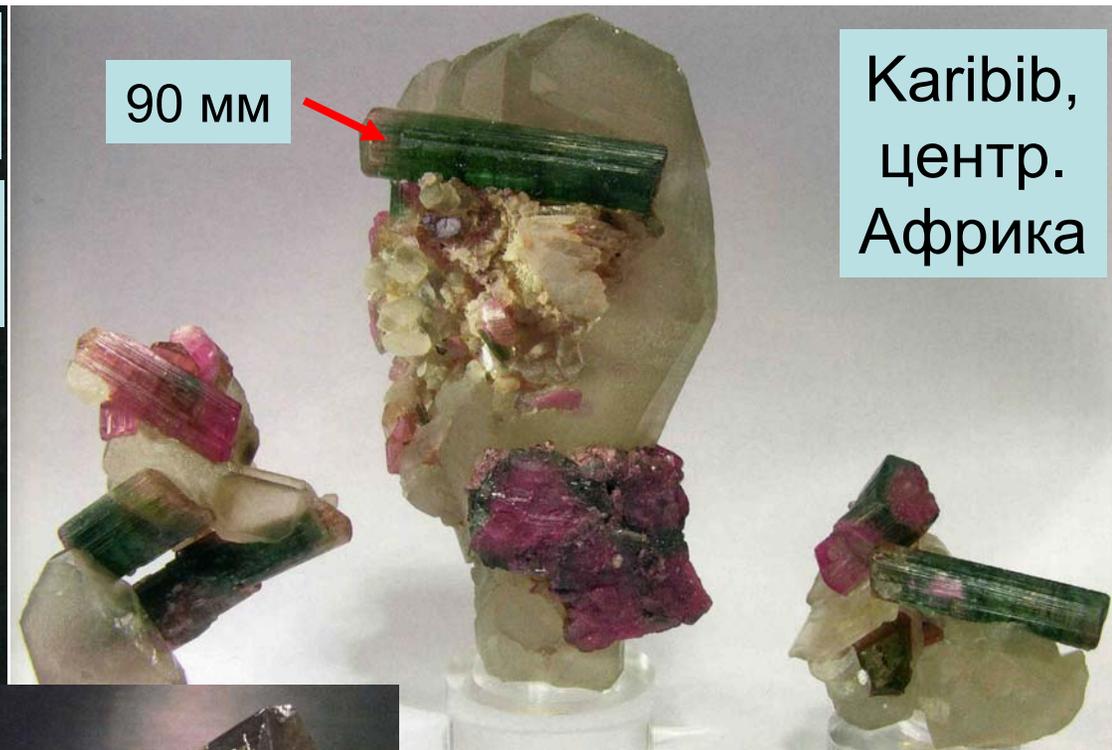
Инверсионный турмалин – эльбаит

сложно зональный



200
мм

Parons Koharha,
Афганистан



90 мм

Karibib,
центр.
Африка



120 мм.
Coronel
Murta,
Бразилия

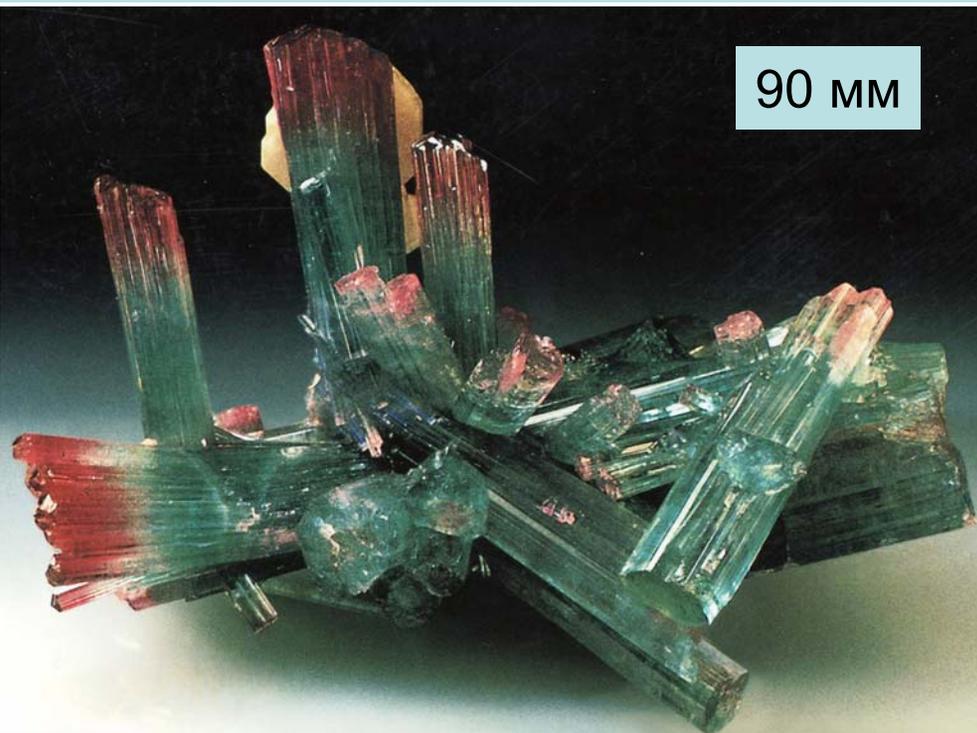


100 мм.
San Diego County,
Калифорния

Инверсионный турмалин - эльбаит

Сложно зональный

90 мм



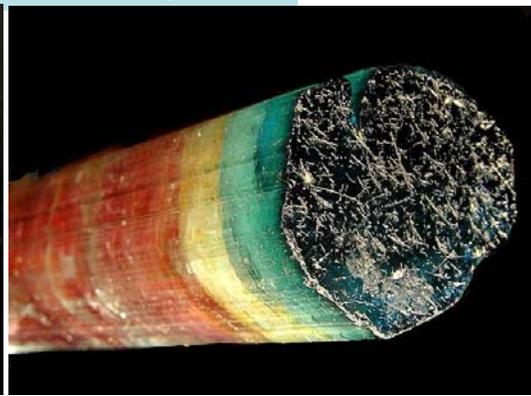
Pederneira Mine, Минас Жераис

250
мм



Araquaya,
Минас Жераис

94x30 мм.
Virgem
da Lapa,
Минас
Жераис



Инверсионный турмалин - эльбаит

Сложно
зональный



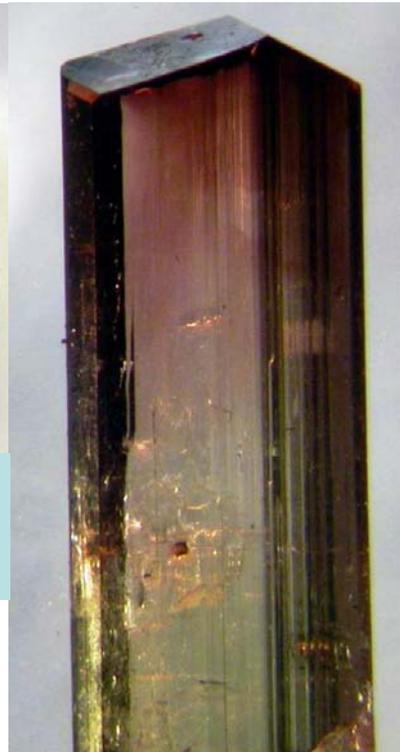
Ві-содержащий. 230x140 мм.
Афганистан



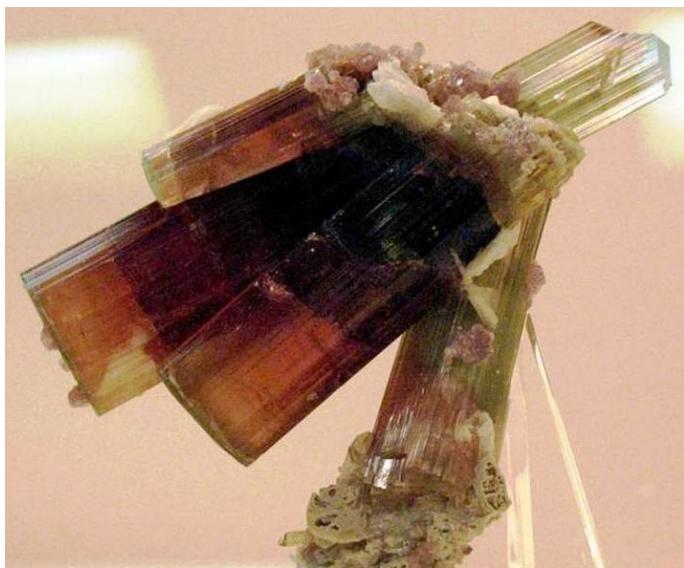
96 мм. Santa Rosa mine,
Минас Жераис, Бразилия

Инверсионный турмалин - эльбаит

Сложно
зональный



С апатитом. Мика, Рангульское
пегматитовое поле



Липовка, Ср. Урал

28
мм



Оggi,
остров
Эльба,
Италия



Santa Rosa mine,
Минас Жераис,
Бразилия

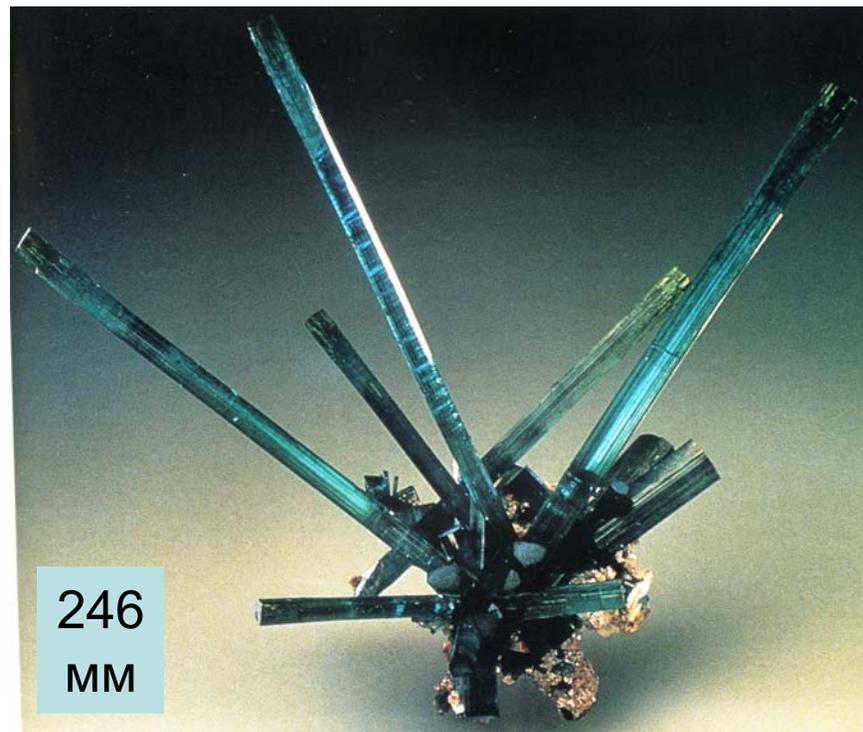
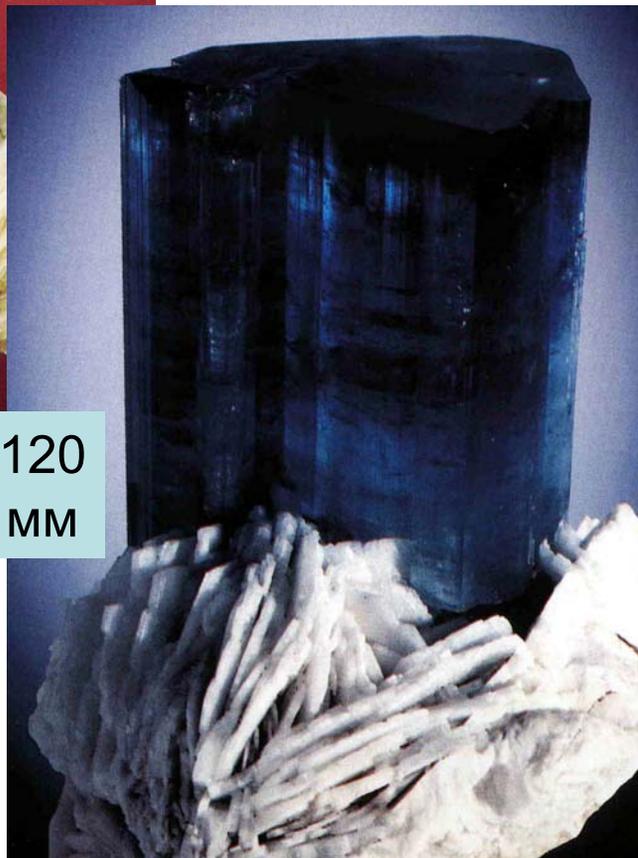
Himalaya Mine, Сан-Диего,
Калифорния

Инверсионный турмалин –

эльбаит - индиголит



120
MM



246
MM



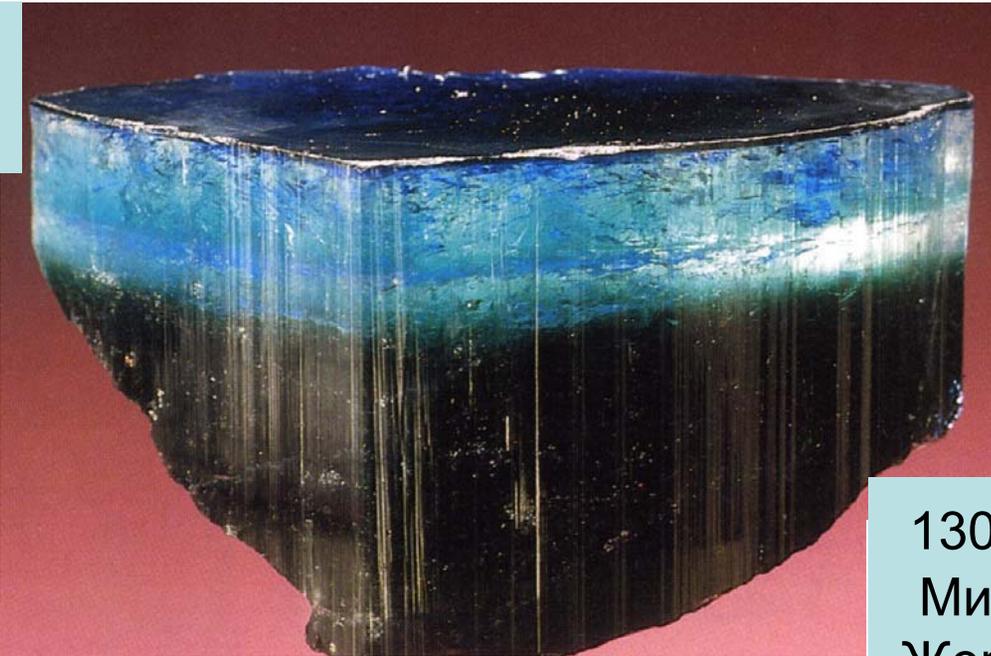
На альбите – клевеландите.
Реш, Кунар, Афганистан

Инверсионный турмалин – эльбаит – индиголит - верделит

92 мм. Паррок,
Афганистан



С лепидолитом.
110 мм. Паррок,
Афганистан



130 мм.
Минас
Жераис,
Бразилия



45x23 мм.
Barra do
Salinas,
Минас
Жераис



Инверсионный турмалин –

эльбаит - верделит.

Pederneira mine, Минас Жераис

70 мм



95x65 мм



С лепидолитом



С синим
апатитом

Инверсионный турмалин –

эльбаит - верделит.

Минас Жераис, Бразилия



Cruseiro mine



37x20 мм.
С кварцем

Chia mine

Инверсионный турмалин – эльбаит - верделит



Больший –
25 мм.
Восточное
Забайкалье

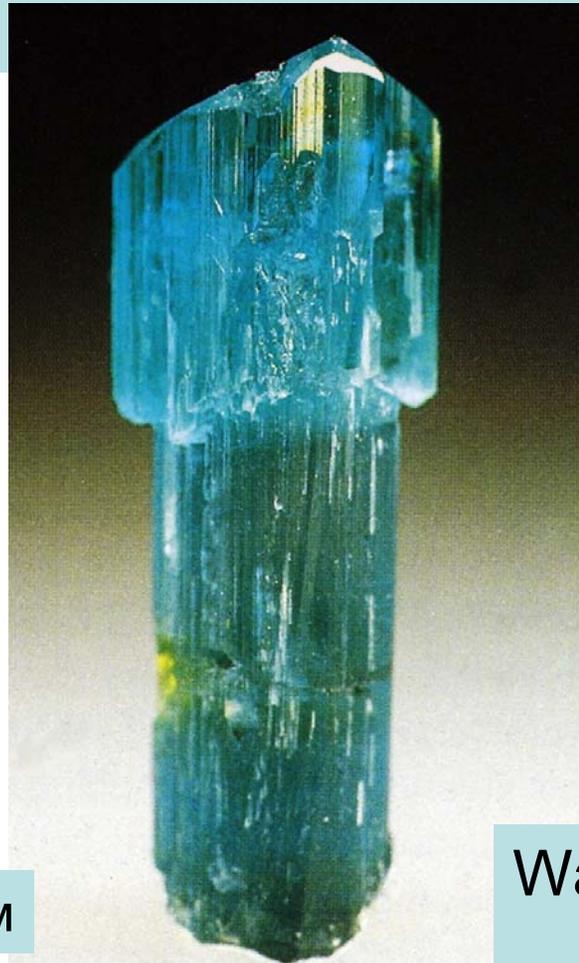


42x14 мм.
Конар,
Афганистан

Инверсионные турмалины – оленит–индиголит



Оленит возникает в специфических условиях – при дефиците железа, марганца и лития, при умеренно повышенной кислотности.



30 мм

Ware Mine, San Diego County,
Калифорния, США

Инверсионные турмалины – богатые V_i Са-олениит-эльбаиты

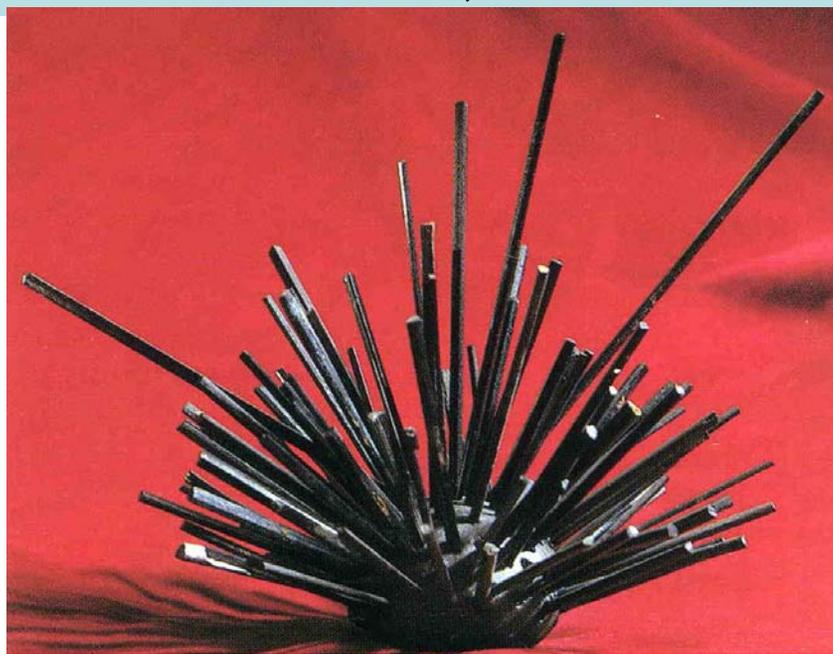


Кукурт,
Памир

Инверсионные турмалины – фойтит



Фойтит довольно характерный инверсионный турмалин. Знаменитые “testo negro” в гранитных пегматитах острова Эльба – это кристаллы светлого турмалина с чёрными головками, - чёрные головки слагает фойтит. Фойтит возникает в специфических условиях – при обилии железа (и магния) и повышенной кислотности. Железо и магний большей частью заимствуются из пород, окружающих пегматиты, частью попадают в поздние флюиды при замещении пегматитовых биотита, магнетита...

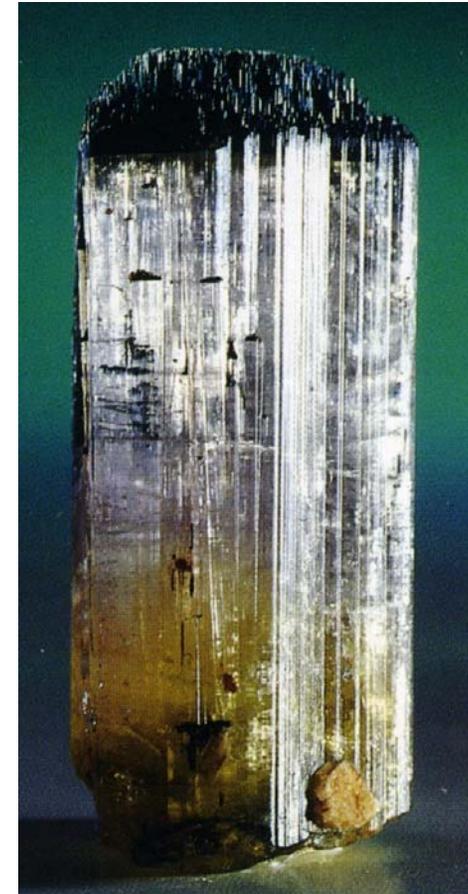


До 90 мм. Казенница, Ср. Урал

Инверсионные турмалины – фойтит



Тёмные головки кристаллов слагает фойтит - классические “testo negro”. Остров Эльба, Италия



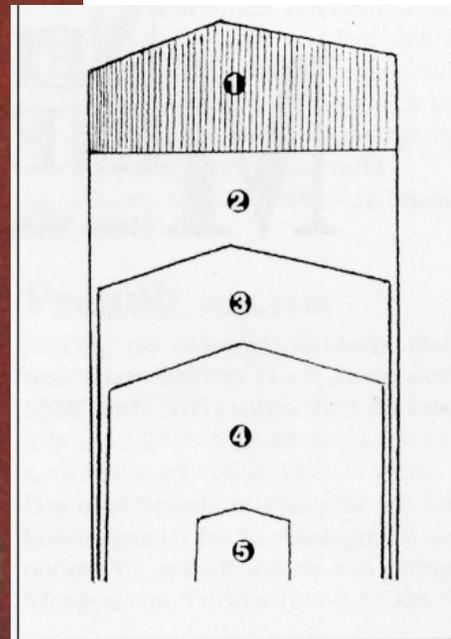
4 см. San Piero in Campo, Elba

Инверсионные турмалины – фойтит



Иглы до 12 мм.
Filone Rosina

Остров Эльба, Италия



*Schemaskizze eines zonargebauten
Turmalins aus dem Valle dei Forcioni,
Elba: 1=Foytit, 2=Rossmannit-Elbait,
3=Elbait, 4=Mn-Elbait, 5=Schörl.*



Тёмные головки кристаллов
слагает фойтит

Инверсионные турмалины – фойтит

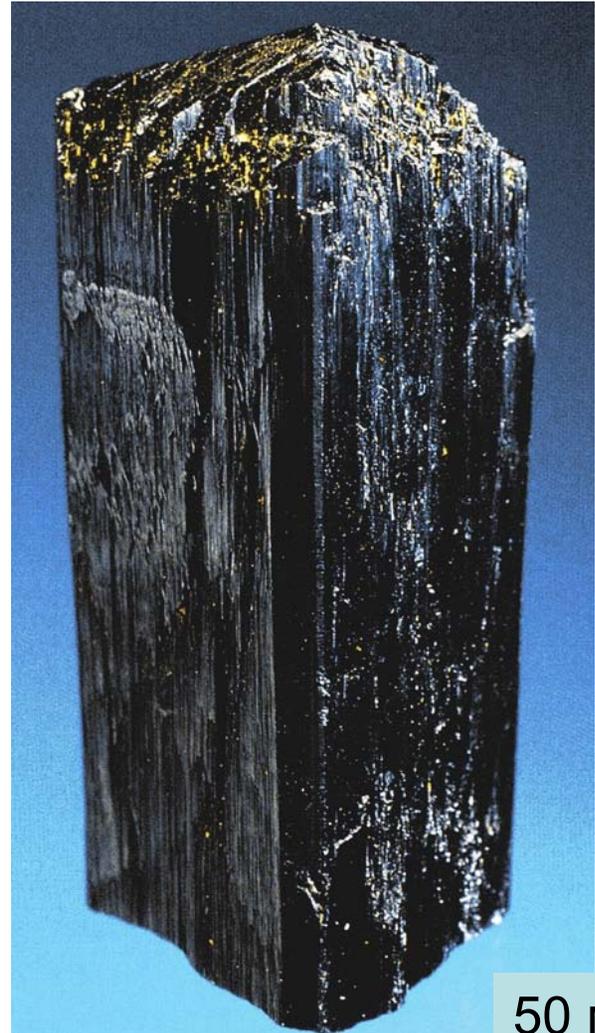


90x73
мм



Флюорит+берилл+фойтит

Erongo Mountains, Намибия



50 мм

Инверсионные турмалины – лиддикоатит



Кальциевый аналог эльбаита – лиддикоатит, - типичный раннеинверсионный турмалин. Назван в честь весьма симпатичного и эрудированного (редкое сочетание) американского минералога-геомолога. Распространён, так как многие типы пород, окружающие пегматиты, богаты кальцием. Окраска варьирует от бесцветной до чёрной, в зависимости от количества примесей железа, титана, хрома, ванадия...



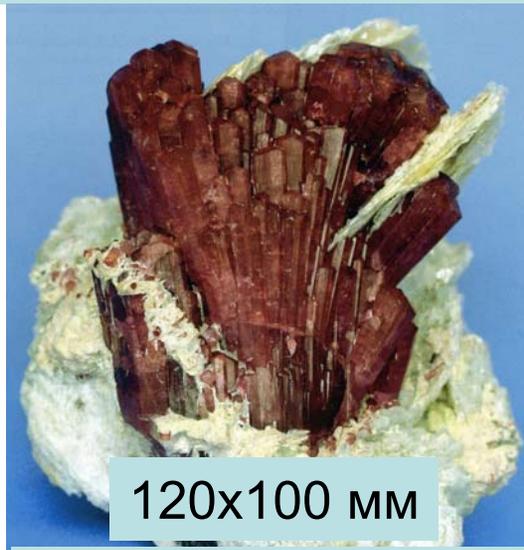
330x
230
мм

17.8 кг



230 мм

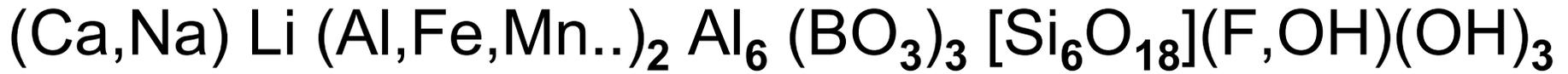
Мадагаскар



120x100 мм

Minh Tien, Вьетнам

Инверсионный лиддикоатит - рубеллит



Мадагаскар

Ankadilava

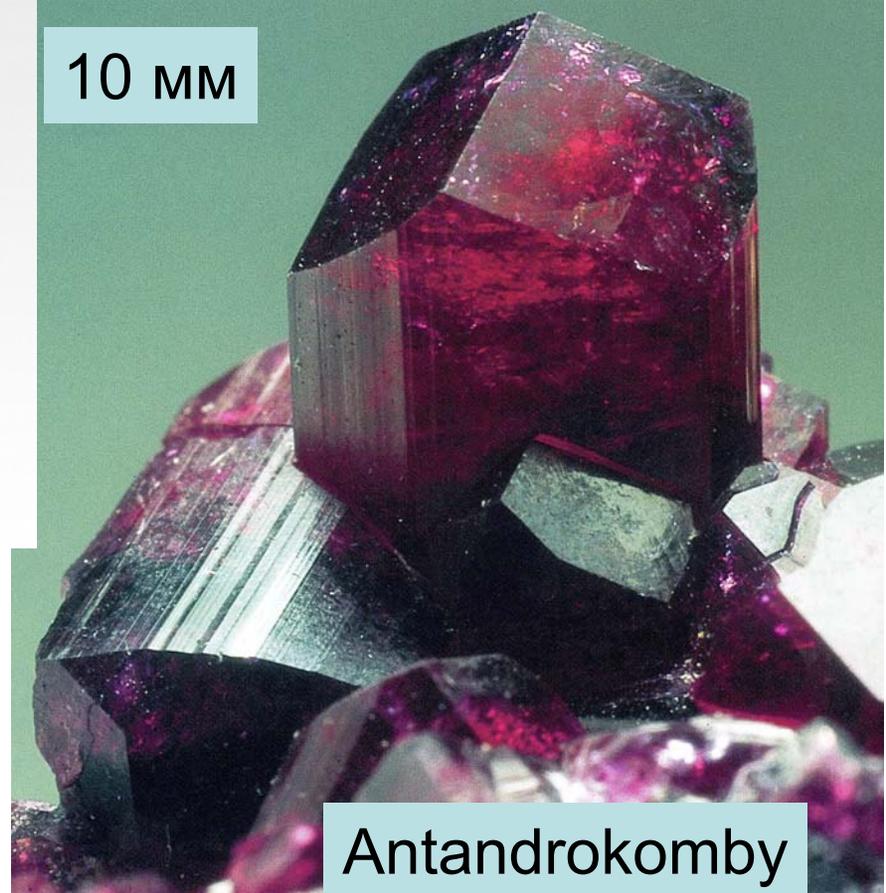


На шерле



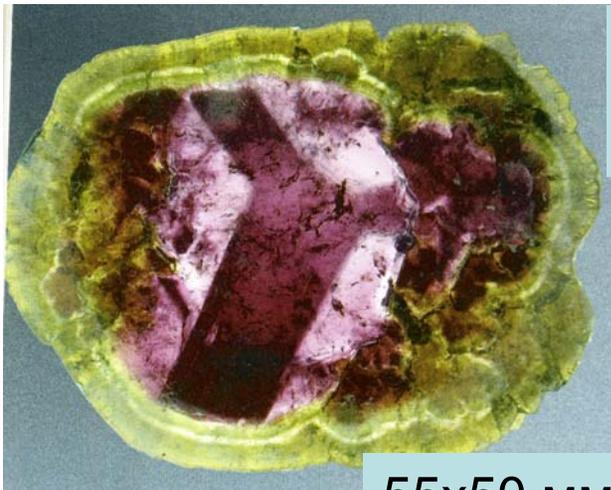
29x15
мм

10 мм



Antandrokomby

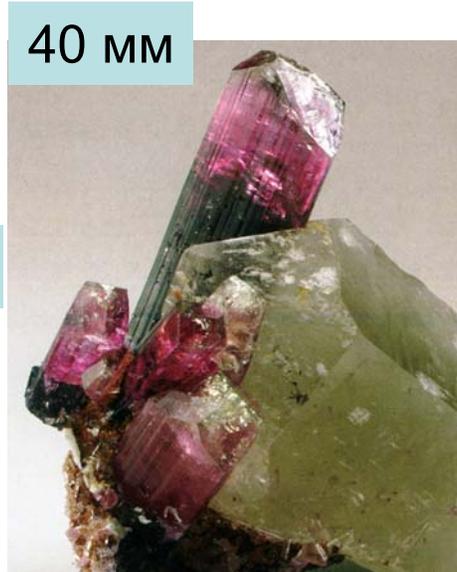
Инверсионный лиддикоатит - рубеллит



Арбузный.
An Phu, Вьетнам

Luc Yen, Вьетнам

55x50 мм



40 мм



Полихромный.
Долина Sahatany,
Мадагаскар



Мурзинка, Ср. Урал

Инверсионные турмалины – лиддикоатит



с инверсионным кварцем



Cruzeiro mine, Минас Жераис

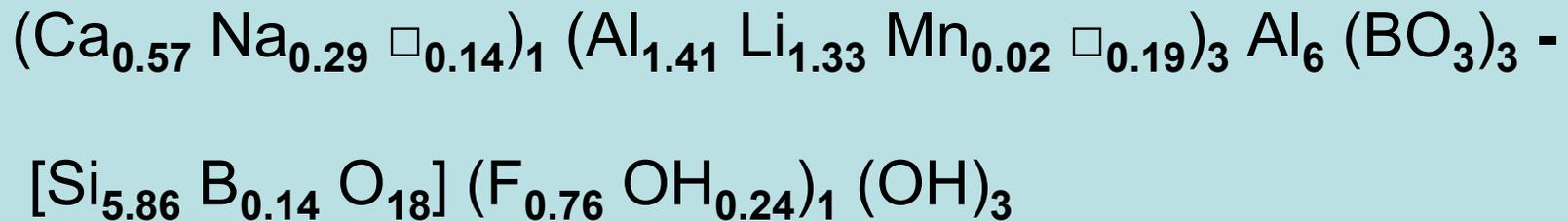


Anjahamiary, Мадагаскар

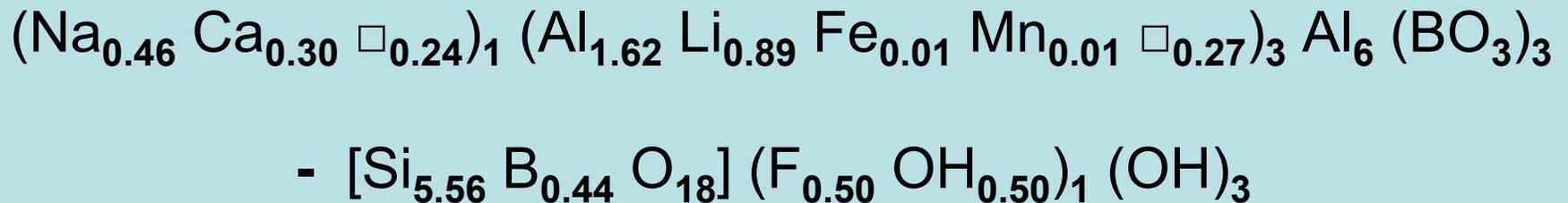
Инверсионные турмалины – лиддикоатит

Инверсионные турмалины серии эльбаит – лиддикоатит иногда (в гранитных пегматитах Мадагаскара) содержат заметное количество бора в тетраэдрической позиции. Борокислородные тетраэдры замещают кремнекислородные.

Типичный состав **лиддикоатита**:



Типичный состав **лиддикоатита – эльбаита**:



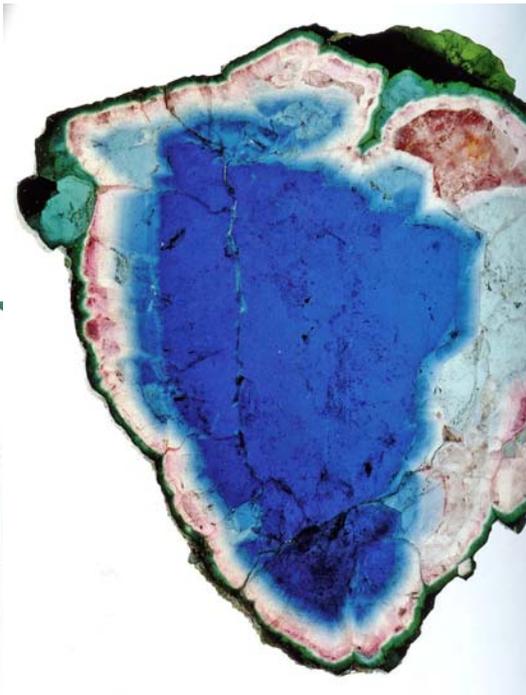
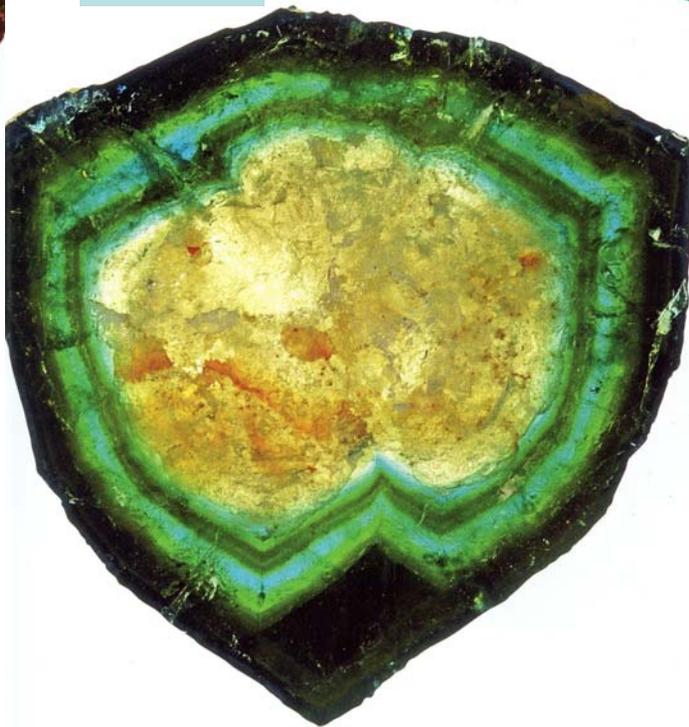
Инверсионные турмалины – лиддикоатит – дравит – бюргерит – увит

Neuschwaben mine, Karibib region, Намибия



49 мм

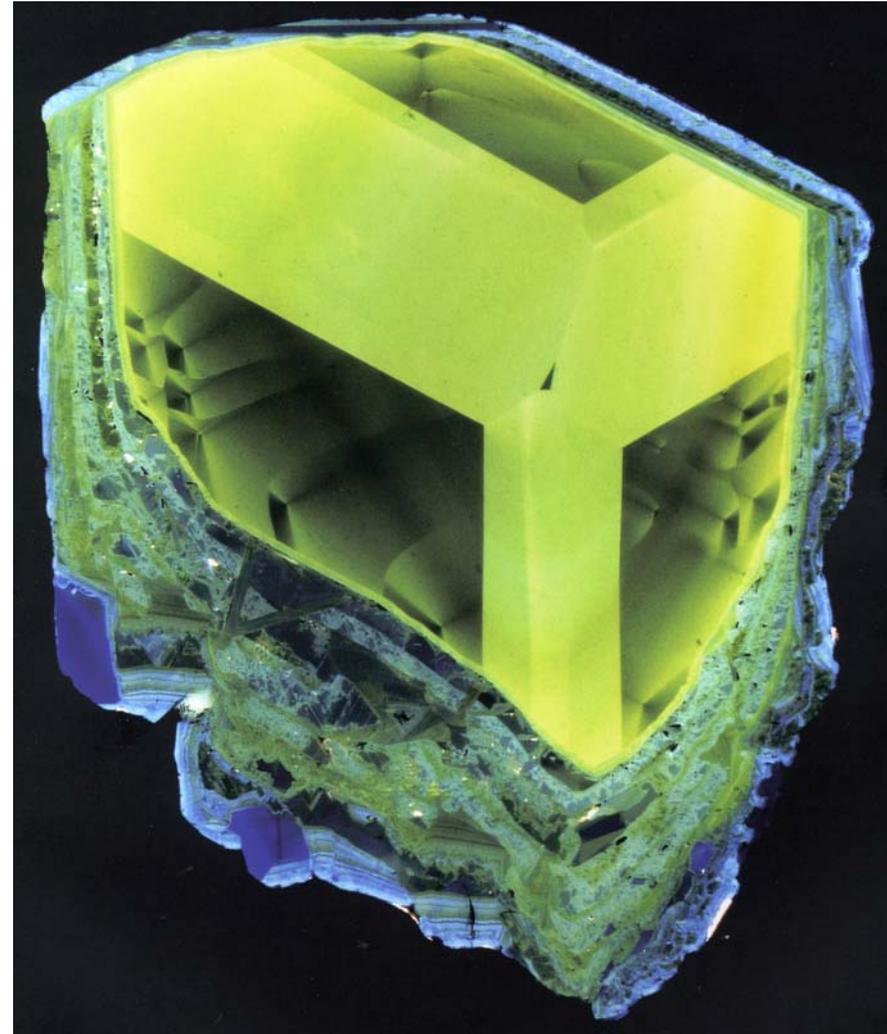
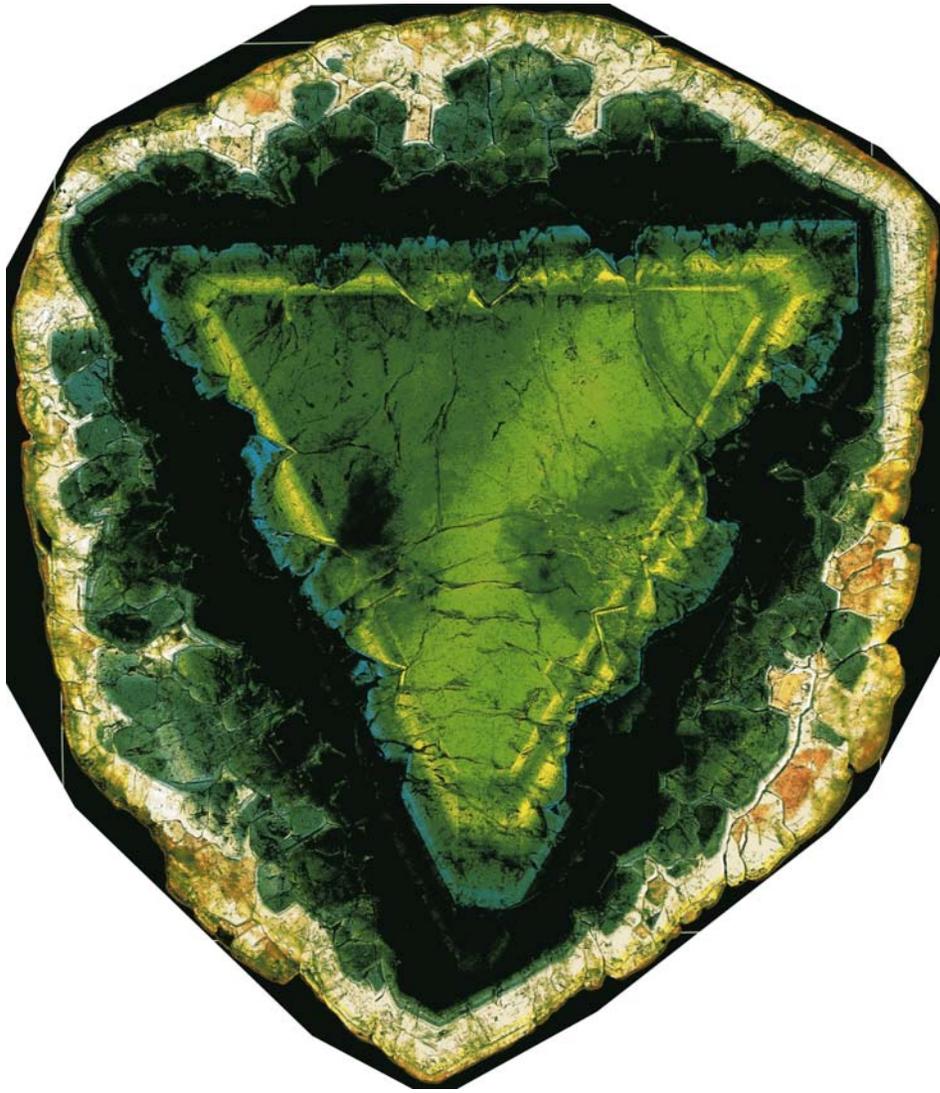
44 мм



37 мм

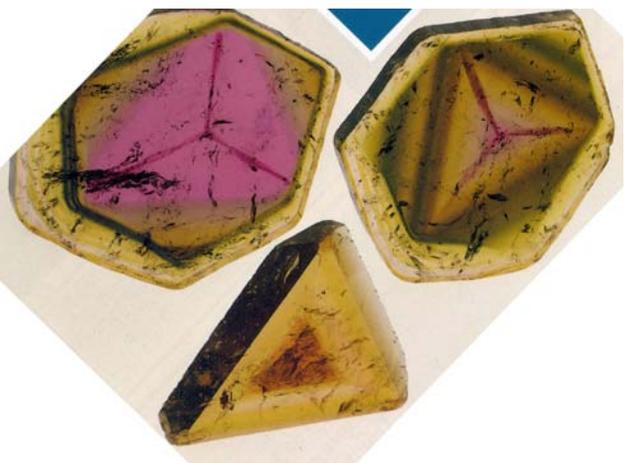
Инверсионные турмалины – шерл – лиддикоатит - дравит - бюргерит - увит

Мадагаскар

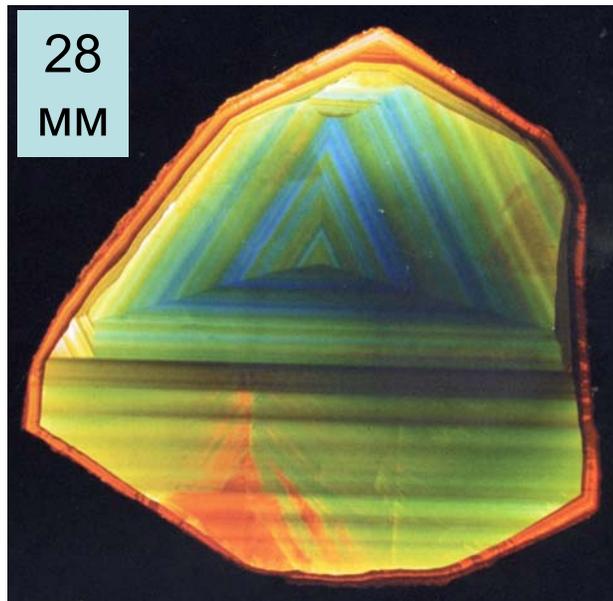


Инверсионные турмалины – шерл – лиддиикоатит - дравит - бюргерит - увит

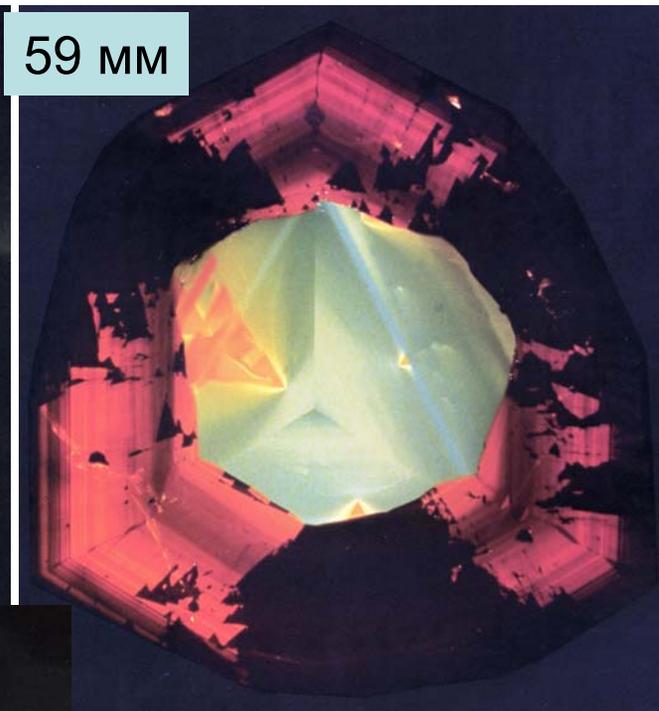
Мадагаскар



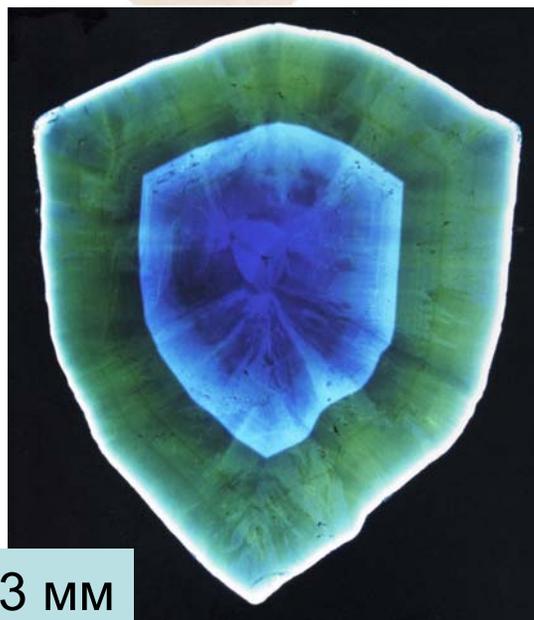
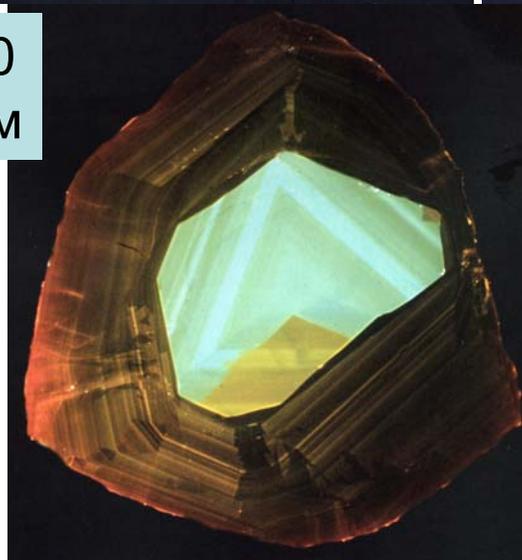
28
MM



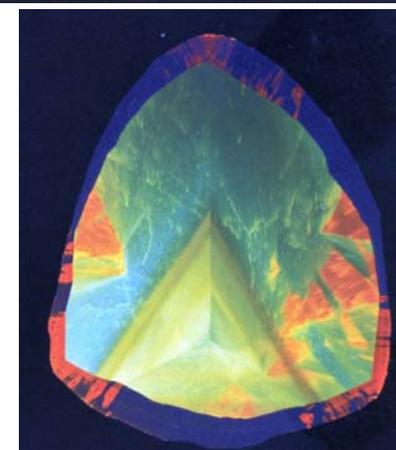
59 MM



10
MM

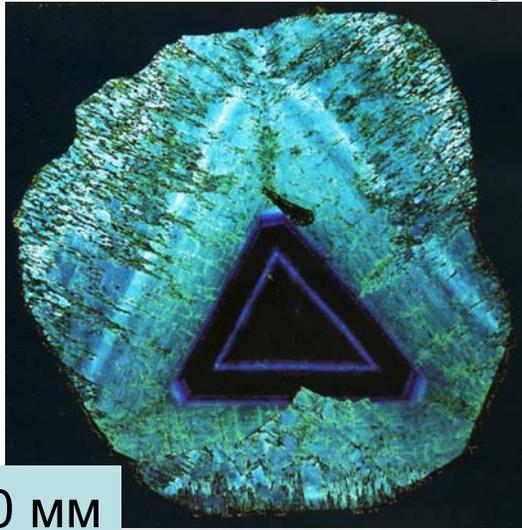


23 MM

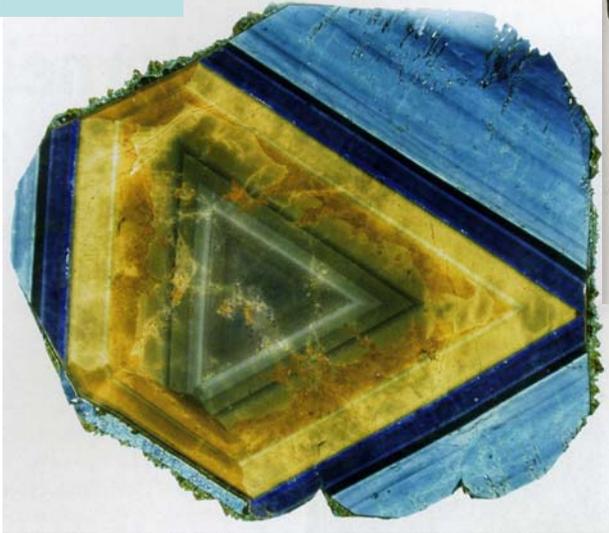


Инверсионные турмалины – шерл – лиддиикоатит - дравит - бюргерит - увит

Михай-
ловское,
Забай-
калье



30 мм



22 мм. Erongo,
Намибия



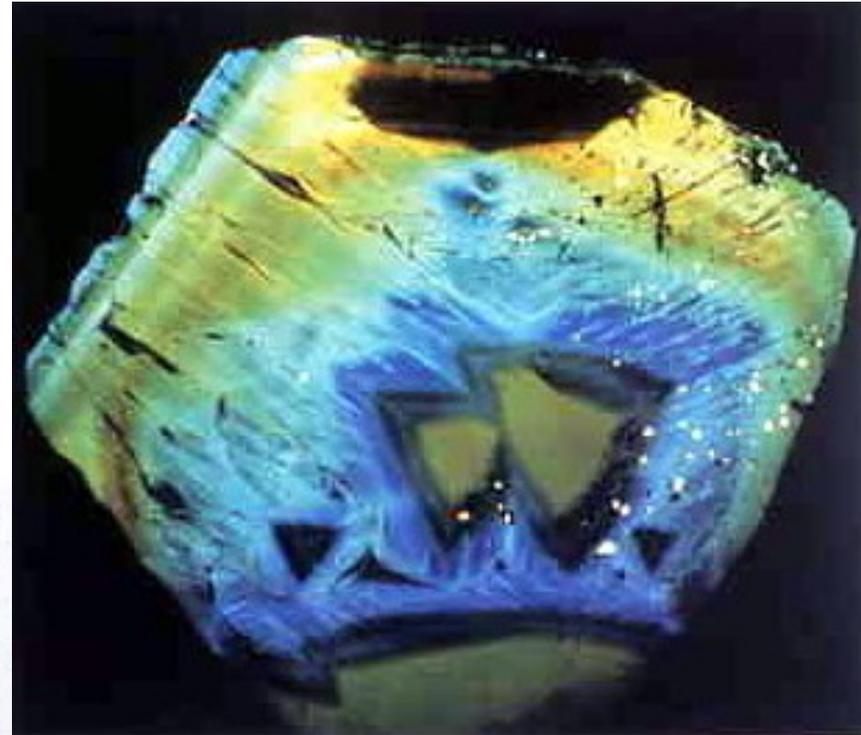
Различные сечения одного
сложного кристалла.
Мадагаскар

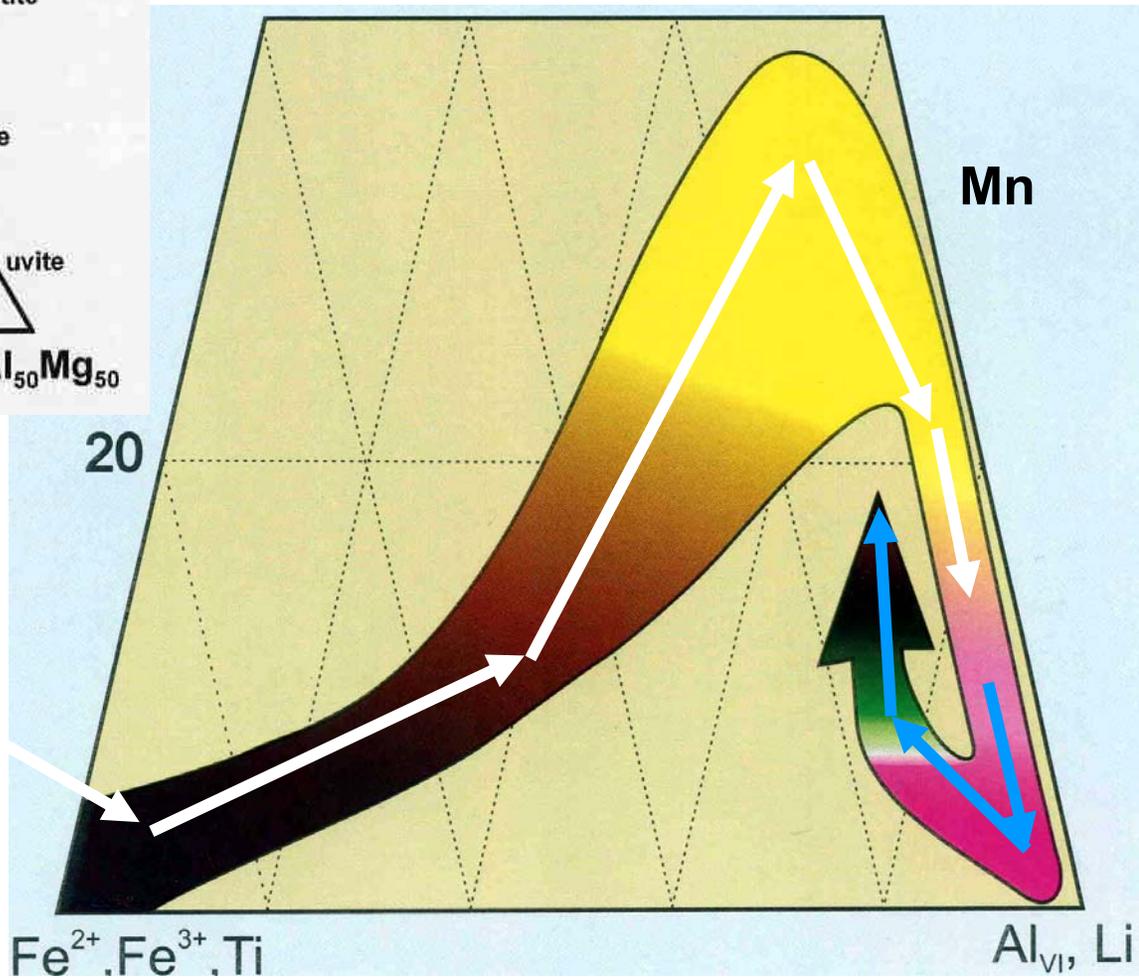
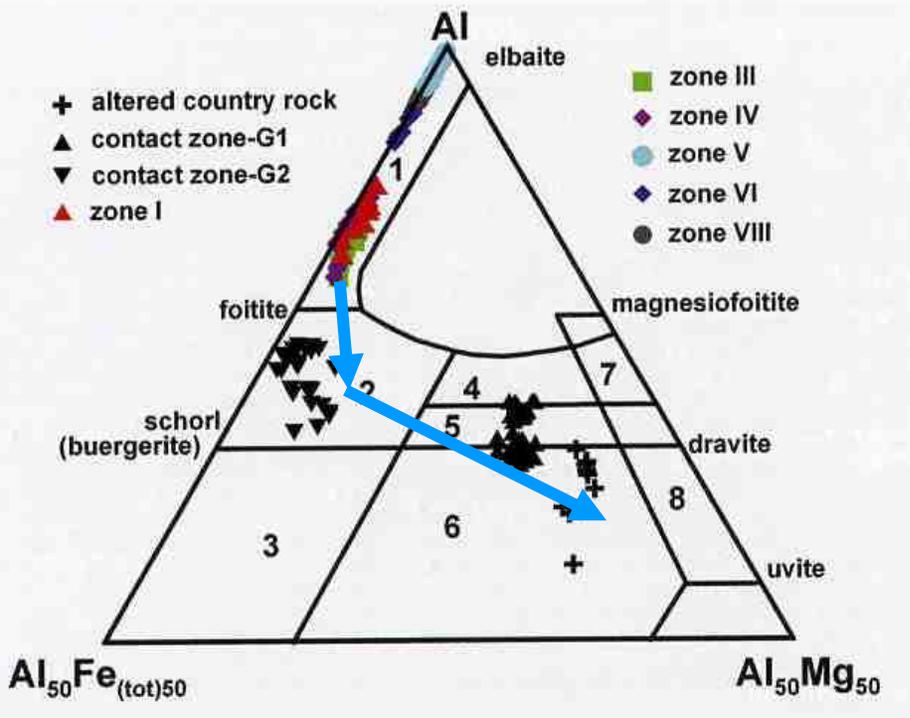


45 мм

Инверсионные турмалины – шерл – лиддиикоатит – дравит – бюргерит - увит

Многоядерные кристаллы.
Мадагаскар

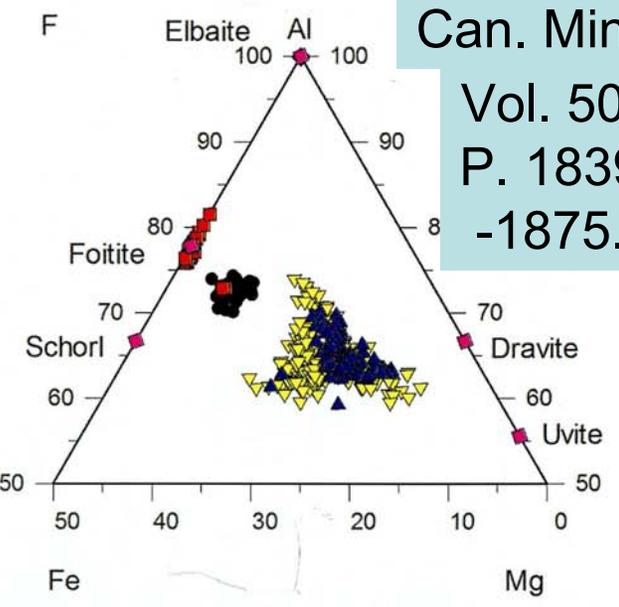
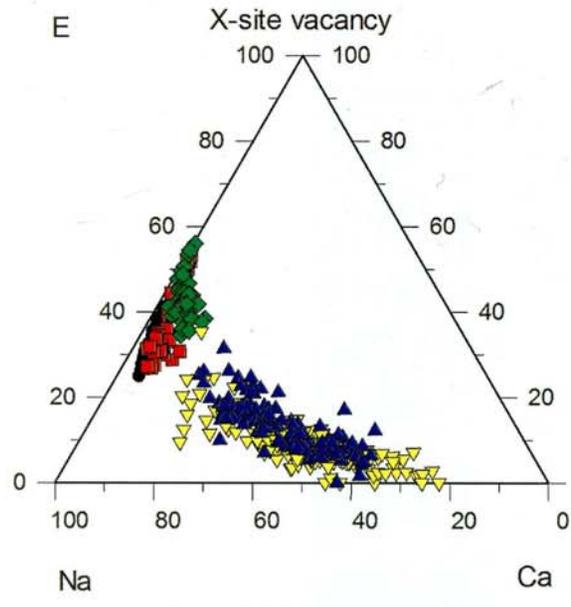
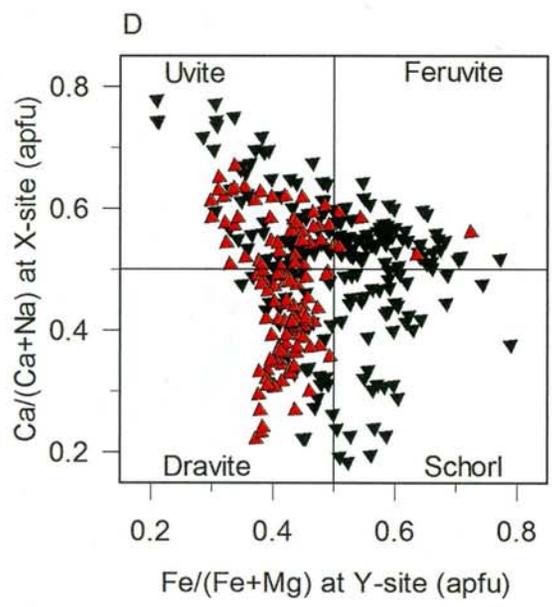
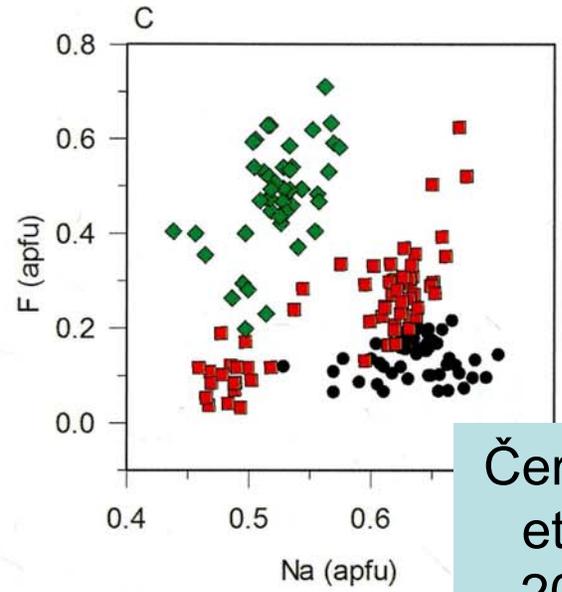
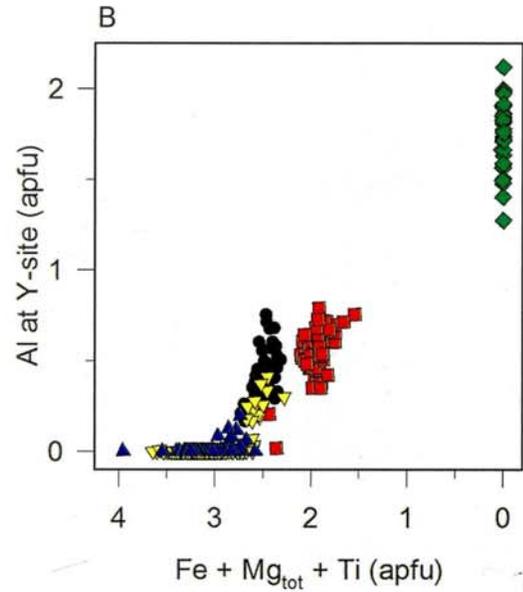
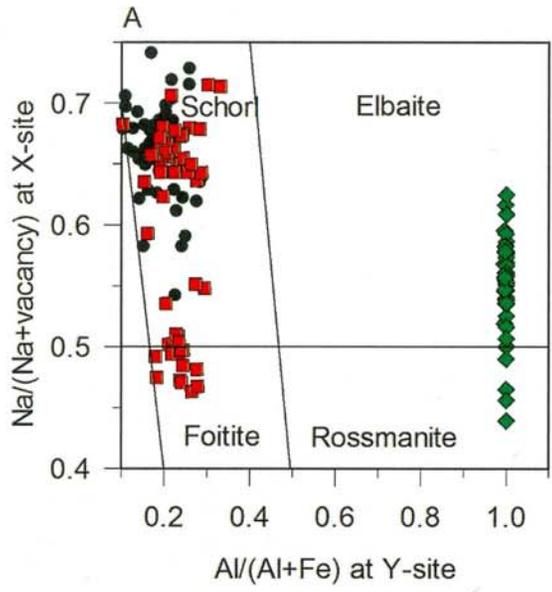




Химический состав
 турмалинов
 чистой линии
 и
 инверсионных

Эволюция состава турмалина. Малхан

Химический состав турмалинов гранит-пегматитов чистой линии и инверсионных. Red Cross Lake, Manitoba



Černý P.
et al.,
2012.
Can. Min.
Vol. 50.
P. 1839
-1875.

Инверсионный хромистый турмалин



Коктокай,
ЮВ Алтай



70 мм.
Реш, Кунар, Пакистан

Инверсионные медистые турмалины

Особый интерес вызывают синие эльбаиты São Jose da Batalha, Параиба и иных месторождений Бразилии, содержащие до 2,5 мас.% CuO и до 9 г/т Au; с ростом содержания Mn_2O_3 их цвет меняется на сине-фиолетовый (Brown, 1993).

Если для меди еще можно предположить, что она накапливается к концу процесса дифференциации пегматитов, то для Au это исключено, - следовательно, в данном случае и Cu, и Au заимствованы из пород рамы; вероятный механизм заимствования описан выше.

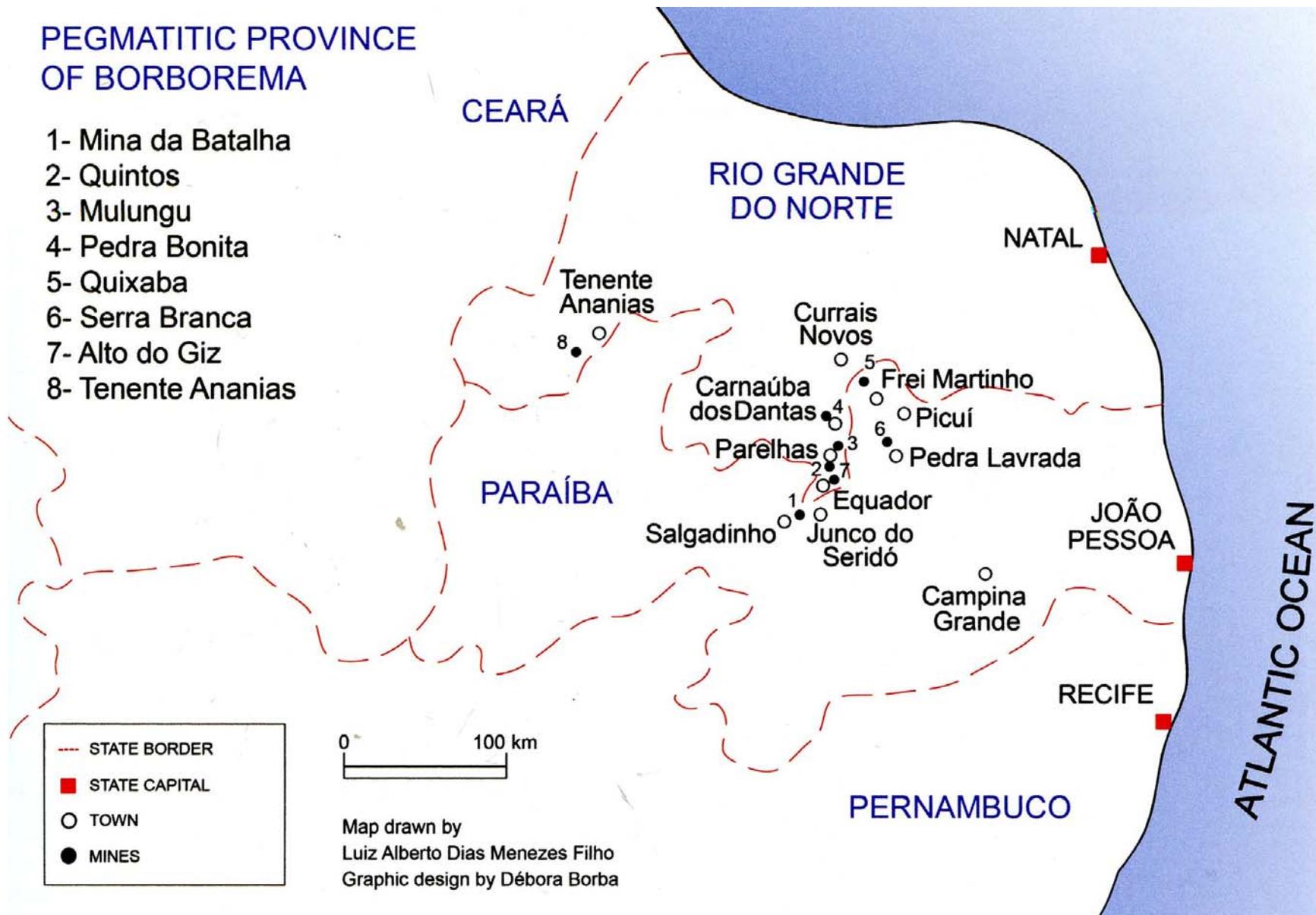
Окраска данных эльбаитов обусловлена комбинацией Mn^{3+} (отчасти и Fe^{3+}) и Cu^{2+} , обменным взаимодействием Mn^{2+} (отчасти и Fe^{2+}) $\leftrightarrow Ti^{4+}$ вместе с абсорбцией Cu^{2+} .

При эпигенетических процессах медистые турмалины не устойчивы и довольно легко теряют медь, которая чаще в виде самородной меди выполняет трещины в турмалине.

Инверсионные медистые турмалины

PEGMATITIC PROVINCE OF BORBOREMA

- 1- Mina da Batalha
- 2- Quintos
- 3- Mulungu
- 4- Pedra Bonita
- 5- Quixaba
- 6- Serra Branca
- 7- Alto do Giz
- 8- Tenente Ananias



Пегматитовые поля северной Бразилии

Инверсионные медистые турмалины



Mina Quintos de Baixo, Paraíba, северная Бразилия

Инверсионные турмалины – медистый эльбаит

**São Jose
da Batalha,
Paraíba,
Бразилия**

**Pederneira mine,
Бразилия**

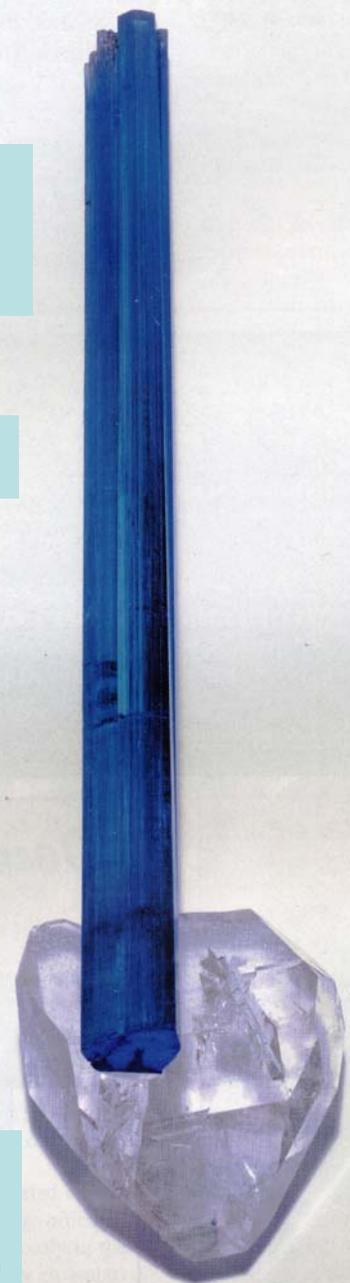
130 мм

Медистый эльбаит

**содержит до
2.5 мас. % CuO
и 9 г/т Au**

50 мм

**Горный
хрусталь**

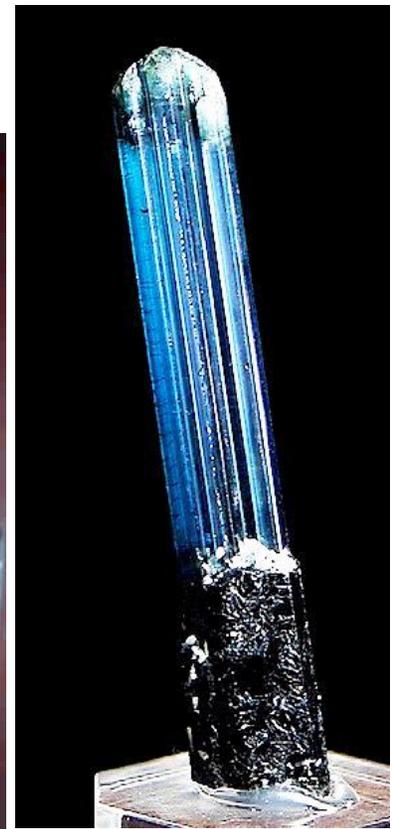


Инверсионные турмалины – медистый эльбаит

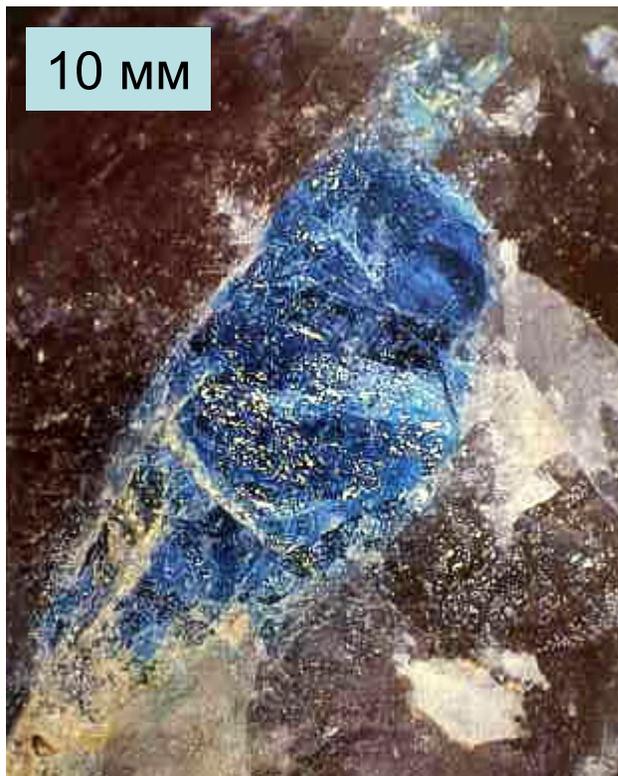
**Batalha a Nova
Era mine,
Paraiba,
Бразилия**



**São Jose
da Batalha,
Paraiba,
Бразилия**



10 мм



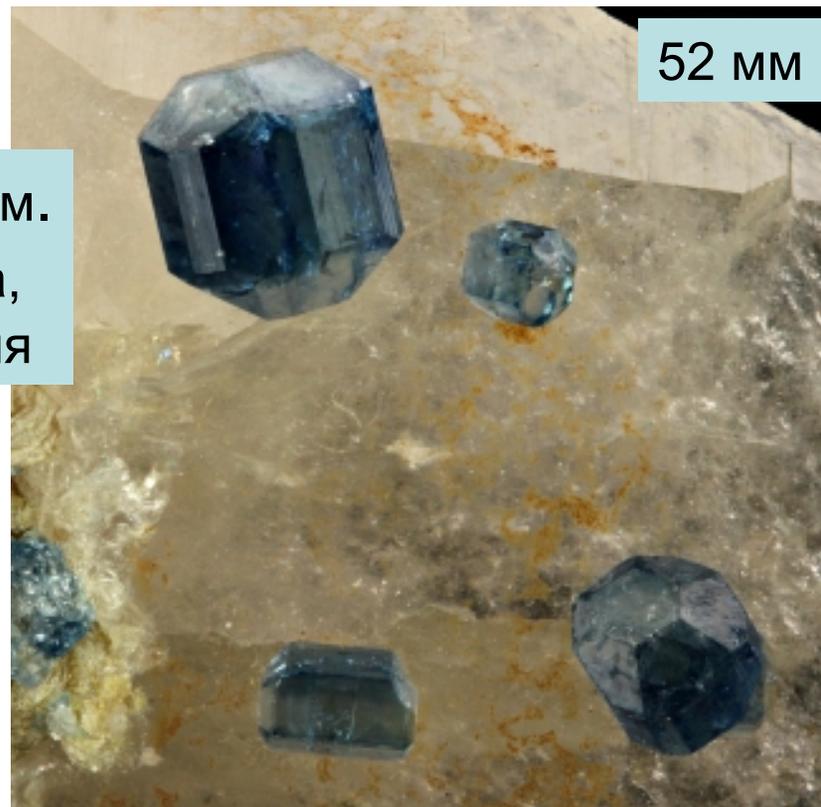
КРИСТАЛЛОНОСНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

Инверсионный фторапатит



55 мм

С кварцем.
Paraiba,
Бразилия



52 мм



С эльбаитом.
Paraiba,
Минас
Жераис,
Бразилия

Эронго, Намибия

Инверсионный фторапатит



25x18 мм.
Карибид,
Намибия

Мокруша,
Ср. Урал



25x18 мм

С мусковитом, аквамаарином.
Чумар-Бакхур, Пакистан

Со спессартином
и кварцем.
Гилгут, Пакистан



45 мм



ИНВЕРСИОННЫЕ АПАТИТЫ

Фторапатит типичного для пегматитов цвета

42x38 мм. Дара-и-Печ, Афганистан

35 мм



На
эльбаите.
Педернейра.
Минас Жераис,
Бразилия



С эльбаитом.
Newry, Мэн, США

40 мм



ИНВЕРСИОННЫЕ АПАТИТЫ

Фторапатит.

Pulsifer quarry, Auburn, Мэн, США



43 мм



31
мм



31 мм



35x22 мм

ИНВЕРСИОННЫЙ фторапатит

Sapo mine, Minas Gerais, Бразилия



15 MM

Инверсионные топазы

Топаз (по-русски тяжеловес). Волынские топазы обычно зональные - центр кристаллов голубой, внешние зоны чайной окраски различной густоты (Лазаренко и др., 1973). Голубые топазы с Fe^{2+} отвечают пегматитам чистой линии. Поздние генерации топаза коричневого или чайного цвета, которые обогащены Fe^{3+} , - инверсионные образования. В Волынском месторождении найдены уникальные полихромные топазы: прозрачные чистой "воды" кристаллы размером до 20x10x15 см с внешней зоной густого чистого винно-коричневатого цвета шириной 3-5 см и внутренней зоной ярко голубого цвета, в которой "плавают" клиновидные срастания тонких палочковидных кристаллов снежно-белого флюорита размером до 1-2 см, - полная иллюзия стаи белых лебедей в голубом небе.

Пирамиды роста в кристаллах топаза

По закону Бекке пирамиды роста разных простых форм имеют различные физические свойства: показатели преломления, твёрдость, электропроводность, степень интенсивности радиационной окраски (дымчатый кварц), плотность точечных дефектов и дислокаций.

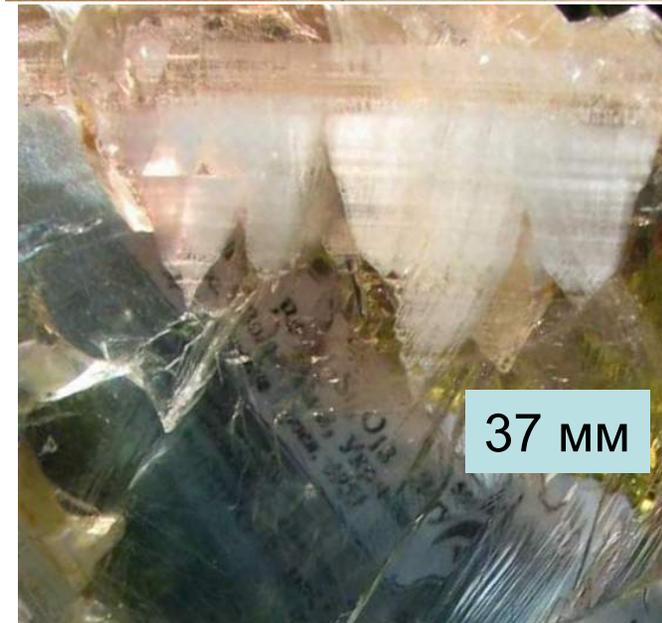
Различные грани кристаллов обычно по разному сорбируют примеси из среды питания. Интересны пирамиды роста топаза. Грани [120] (более тупые ромбические призмы) и [112] (более тупые, точнее сплюснутые бипирамиды) активно поглощают Fe^{2+} , их пирамиды роста окрашены в голубой цвет. Кристаллы топаза, образованные такими гранями, - из пегматитов Мурзинки, Ильмен... – голубого цвета.

Грани [110] (более острые призмы) и [111] (более острые бипирамиды) активно поглощают Fe^{3+} , их пирамиды роста окрашены в чайный, розовый, жёлтый, фиолетовый цвета. Кристаллы, образованные такими гранями, - из кварцевых жил Бразилии, Южного Урала, Пакистана - розовые, жёлтые, фиолетовые.

Кристаллы топаза, где развиты пирамиды роста граней [120] и [110], [112] и [110]..., - двуцветные: пирамиды роста граней [120] голубого цвета, пирамиды роста граней [110] чайного цвета различной густоты окраски; таковы много цветные кристаллы топаза из пегматитов Волыни.

Доинверсионные и инверсионные топазы

Волынское месторождение, Украина



37 мм



160x140 мм

Белые скелетные кристаллы флюорита

Инверсионные топазы

Волынское месторождение, Украина



Белые скелетные кристаллы флюорита

Грань [120]



Грань [110]

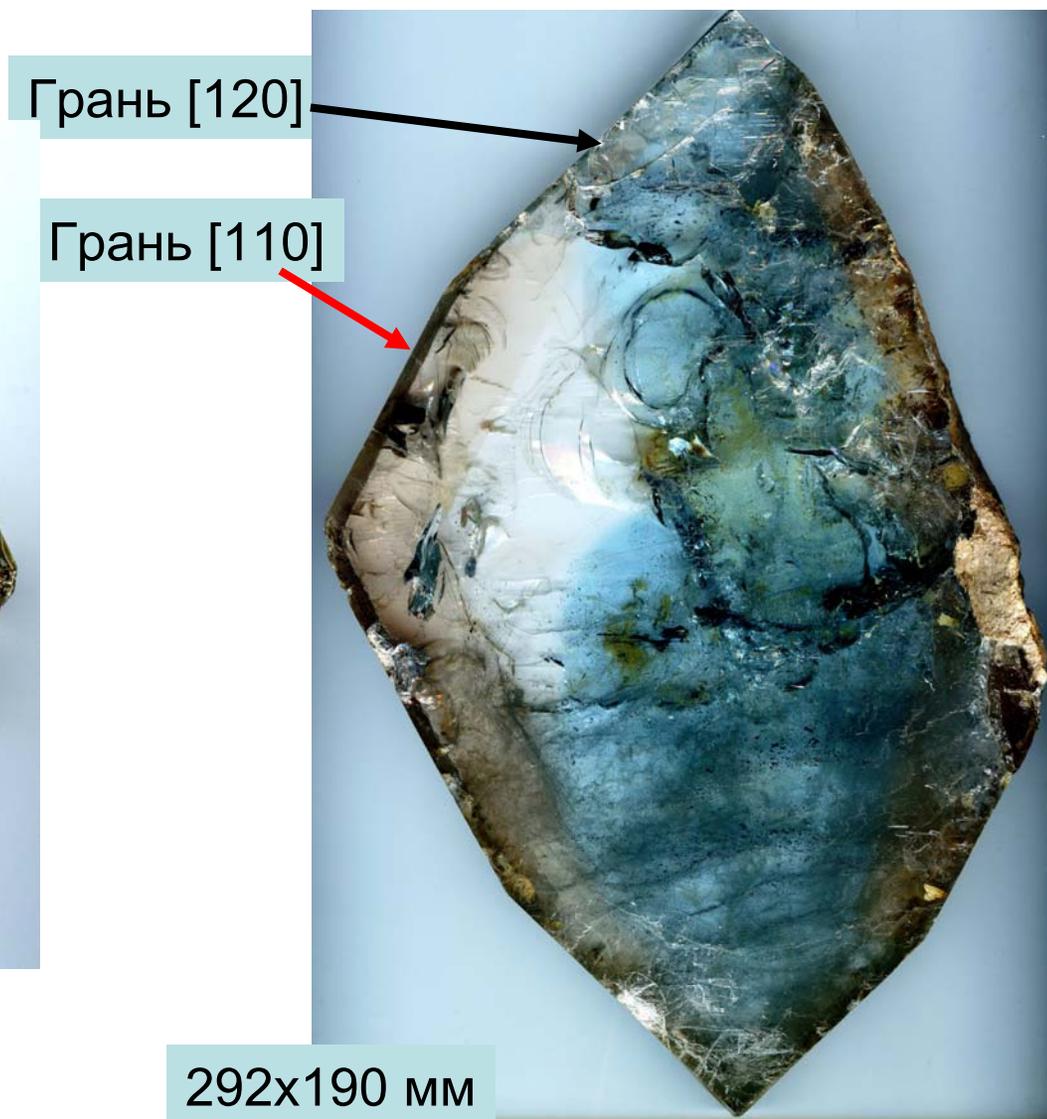


**Пирамиды
роста
разной окраски =
разного состава
в кристаллах
топаза из
пегматитов
Волыни,
Украина**

171x146 мм



Пирамиды роста в кристаллах топаза из пегматитов Волыни, Украина



Инверсионные топазы

В пегматитах иных регионов окраска топазов инверсионного периода от оранжево-желтой до розовой (примеси Mn^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} !). Пегматиты Среднего Урала содержат поздние инверсионные золотистые и винно-желтые топазы. Великолепные винные топазы находятся в гранит-пегматитах Кукуртского месторождения (Памир) (Скригитиль, 1996).



Знаменитый кристалл топаза
красного цвета
академика
Н.И. Кокшарова

Инверсионные топазы

80 мм



110 мм



Cr-Fe³⁺
- топаз.
Долина
Shigar,
Пакистан

Cr - топаз. Sussy, Haramosh, Пакистан

Инверсионный андалузит (Al,Fe,Mn,Cr...)₂[SiO₄]O



Андалузит плеохроирующий до 12 мм. Агасиаи, Минас Жераис

Восточный
Памир



Инверсионные топазы

80 мм



Бразильский гигант
277 кг

Топаз чайный и шерл на альбите.
Shardu, Пакистан

ИНВЕРСИОННЫЙ БЕРИЛЛ

Берилл - гелиодор. Замечательные кристаллы гелиодора густого спаржевого, зелёно-желтого и винно-жёлтого цвета длиной до 27 см содержали миароловые гранитные пегматиты Среднего Урала - месторождения Мурзинское, Алабашское, Адуйское (Ферсман, 1925; Киевленко и др., 1974). Каждый десятый камерный пегматит Волынского месторождения (Украина) содержит гелиодор ювелирного качества (кристаллы до 5,3 кг). Окраска гелиодора обусловлена в основном малой примесью Fe^{3+} .

В пегматитах Бразилии нередки крупные кристаллы полихромных бериллов, где на розовый Li-Cs берилл - воробьевит (морганит) выросли широкие каймы низкощелочного голубого Na-Fe-Mg-берилла.

Берилл - воробьевит – морганит с примесями Fe^{3+} и Mn^{3+} тёплого и довольно густого коричневатого-розового с оранжевым оттенком.. цвета ассоциирует с инверсионными турмалинами.

ИНВЕРСИОННЫЙ БЕРИЛЛ

Берилл - гелиодор Волынского месторождения (Украина)



25 мм

80x30 мм



78 мм



ИНВЕРСИОННЫЙ БЕРИЛЛ

Берилл – гелиодор

Берилл – гелиодор (чайный)



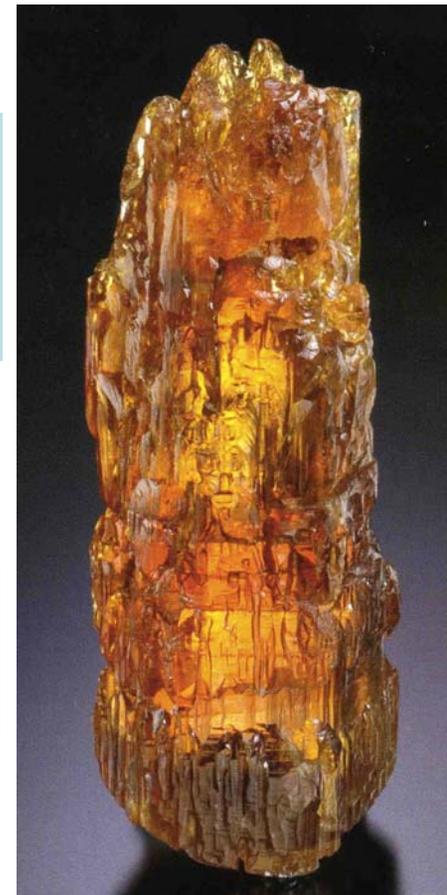
87x27 мм

55 мм

Мурзинка,
Средний Урал



Beryl mine,
Luumiaki,
Финляндия



87 мм. Green
Walking
Stick mine,
Зимбабве

Доинверсионный и инверсионный берилл



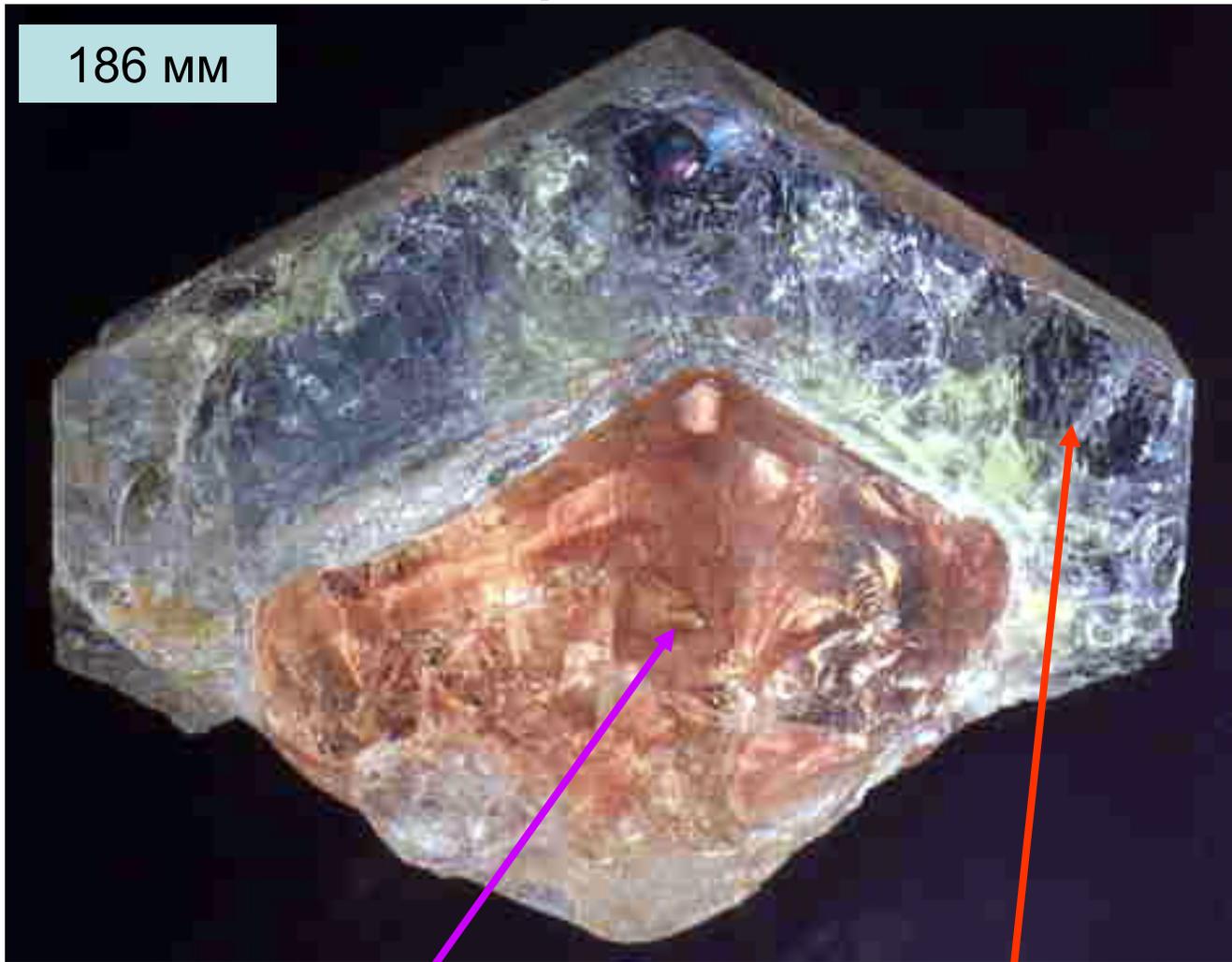
Воробьевит

→ синий Fe- Mg берилл.
85 кг. Минас Жераис

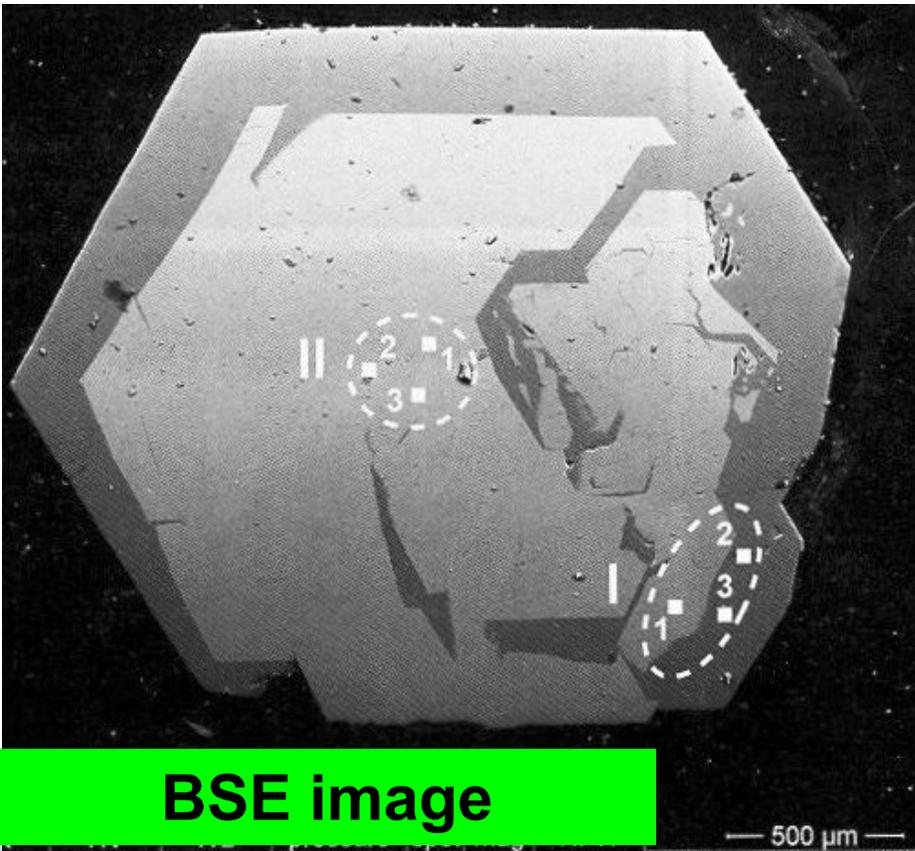


Воробьевит → Fe-Mg берилл. Минас Жераис

Доинверсионные и инверсионные бериллы



Морганит → Na-Fe-Mg-берилл.
Bananal mine, Минас Жераис



BSE image

— 500 μm —

**Ядро -
воробьевит = морганит.**

Кайма замещения

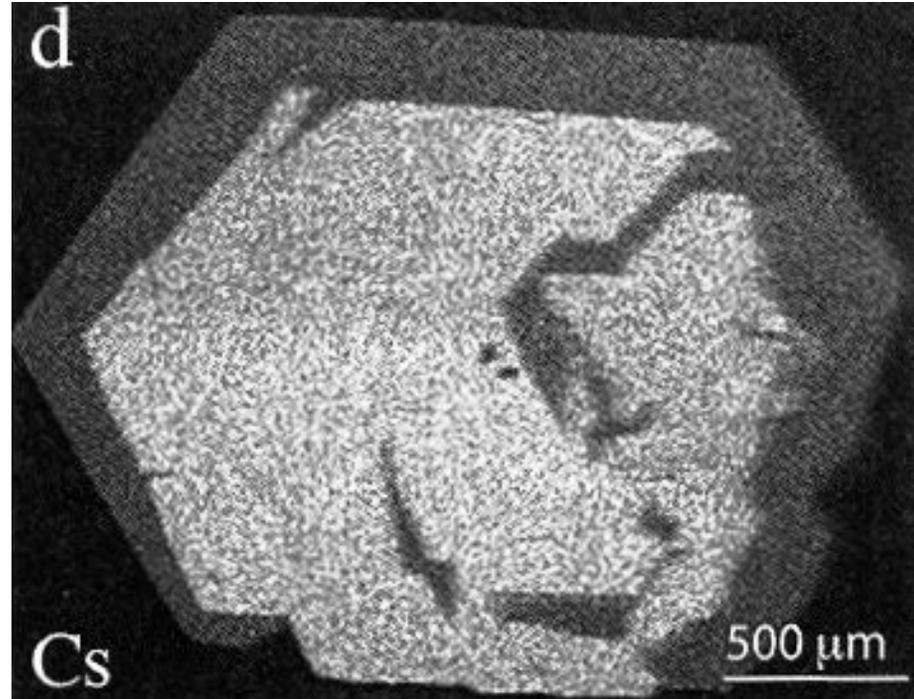
Инверсионный

Na-Fe-Mg берилл.

**Миароловый гранитный пегматит,
остров Эльба, Италия**

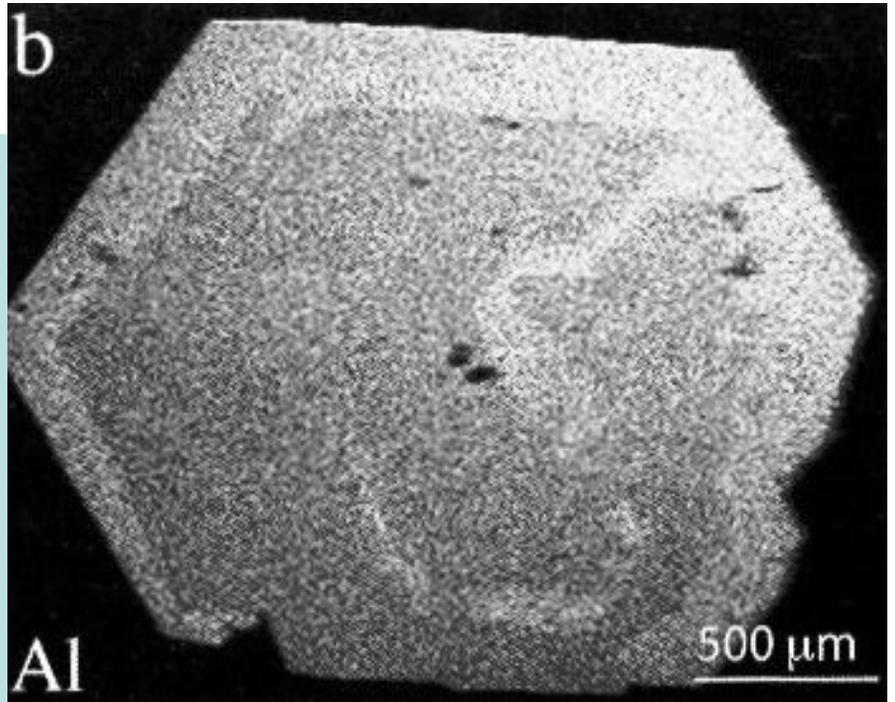
(Aurisicchio C. et al., 2012.

Canad. Mineral. Vol. 50. P. 1467-1488)



Cs

500 μm

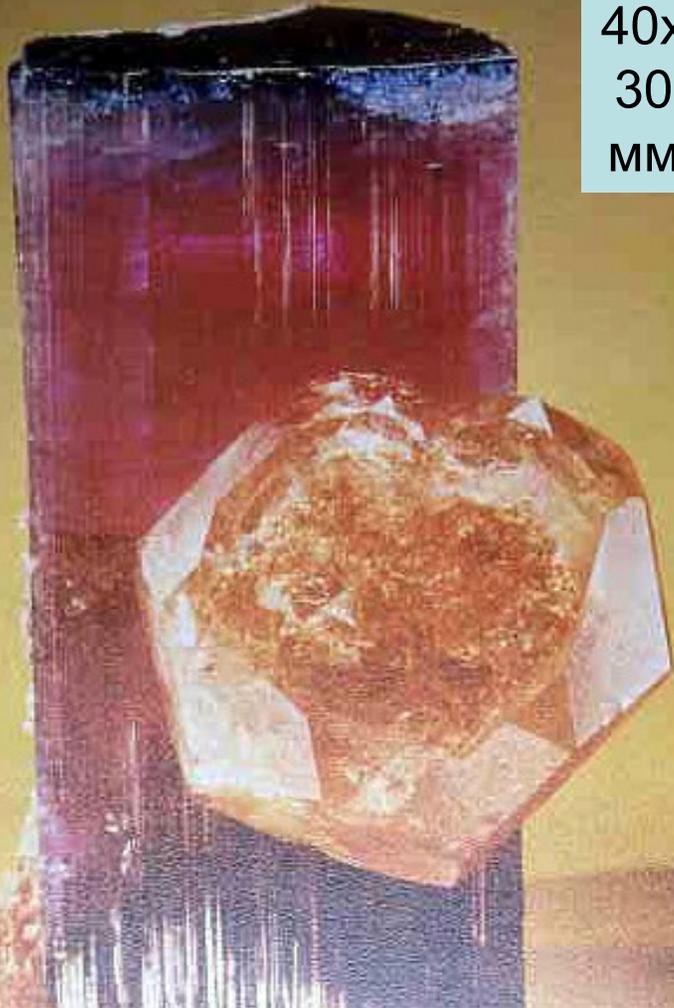


Al

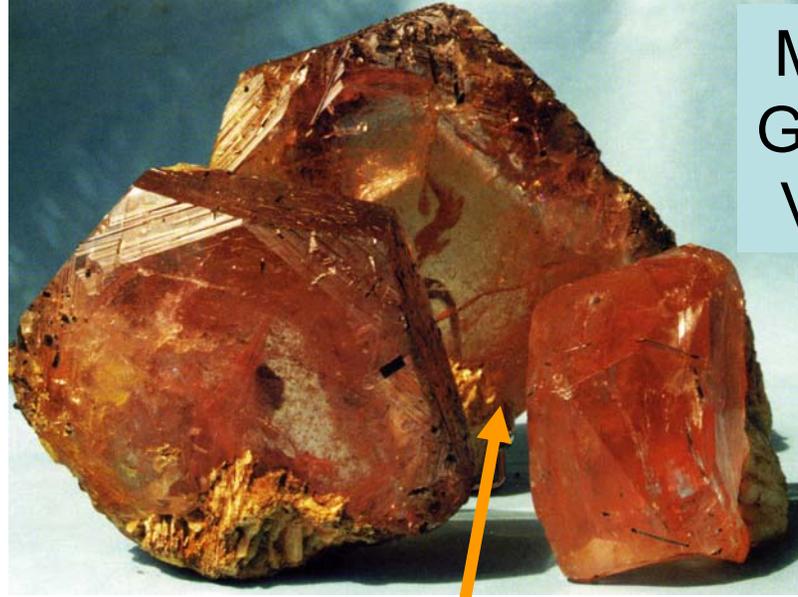
500 μm

Инверсионные бериллы

40x
30
мм



Воробьевит - мorganит
на полихромном
эльбаите. White
Queen, Pala, Калифорния



Мorganит.
Governador
Valadares.

Минас
Жераис,
Бразилия

120x110x50 мм

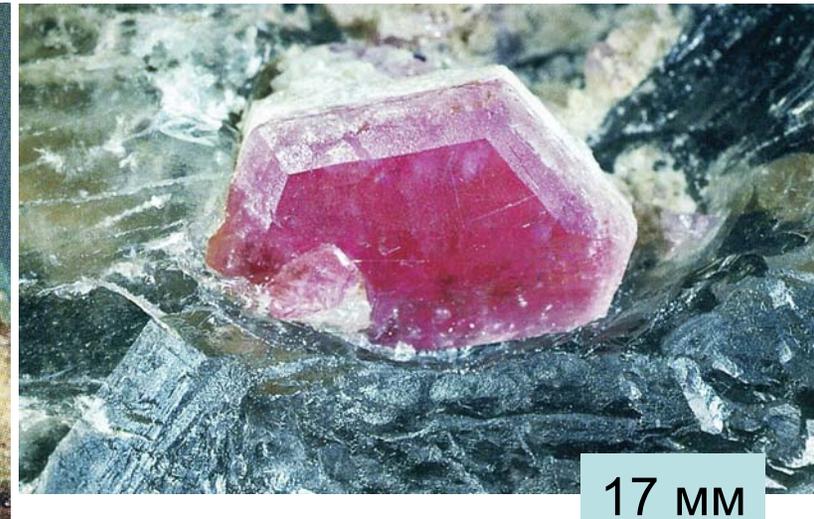
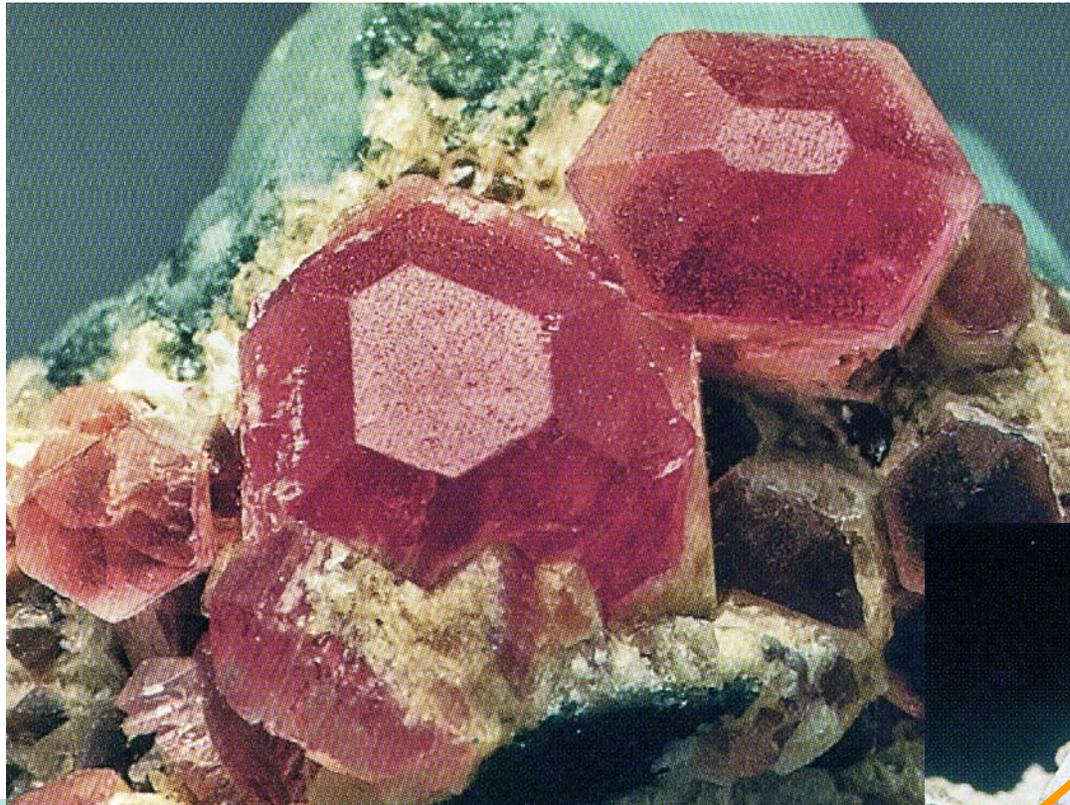
66 мм



Воробьевит
—
morganит.
Conselheiro
Pena,
Минас
Жераис

Инверсионные бериллы

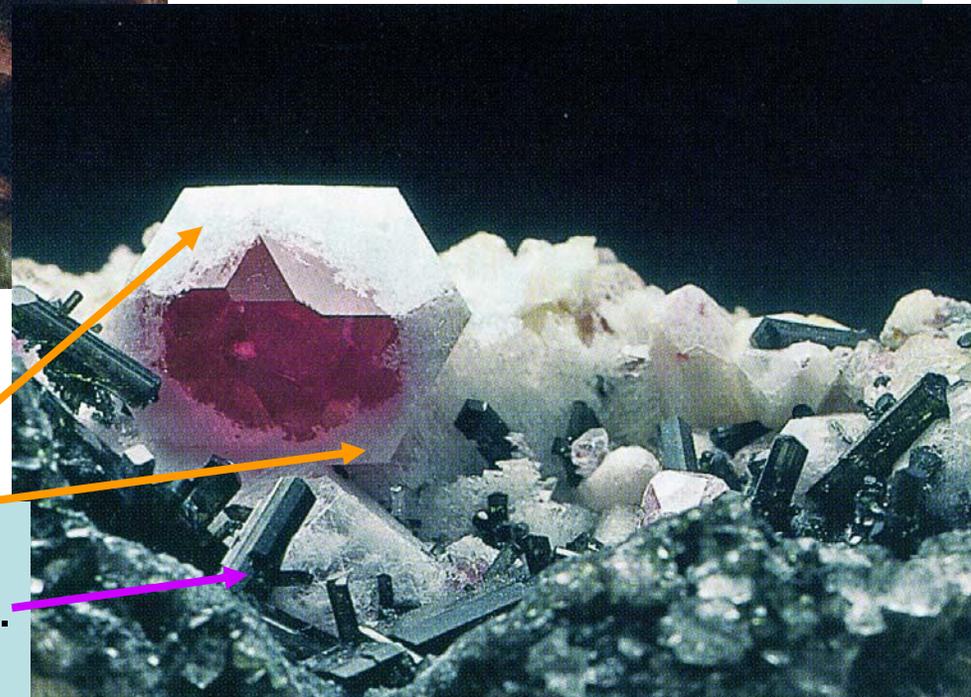
Берилл – пезоттаит



17 мм

С лепидолитом и альбитом.
Мадагаскар

Пезоттаит → низко щелочной берилл. Синеватый лиддикоатит.
Anjanabonoina, Мадагаскар



КРИСТАЛЛОНОСНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

Хризоберилл $\text{Be Al}_2 \text{O}_4$



18 мм. Липовка, Средний Урал

КРИСТАЛЛОНОСНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

Дюмортьерит $\text{Al}(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_6[(\text{O}, \text{OH})_3/\text{BO}_3/(\text{SiO}_4)_3]$

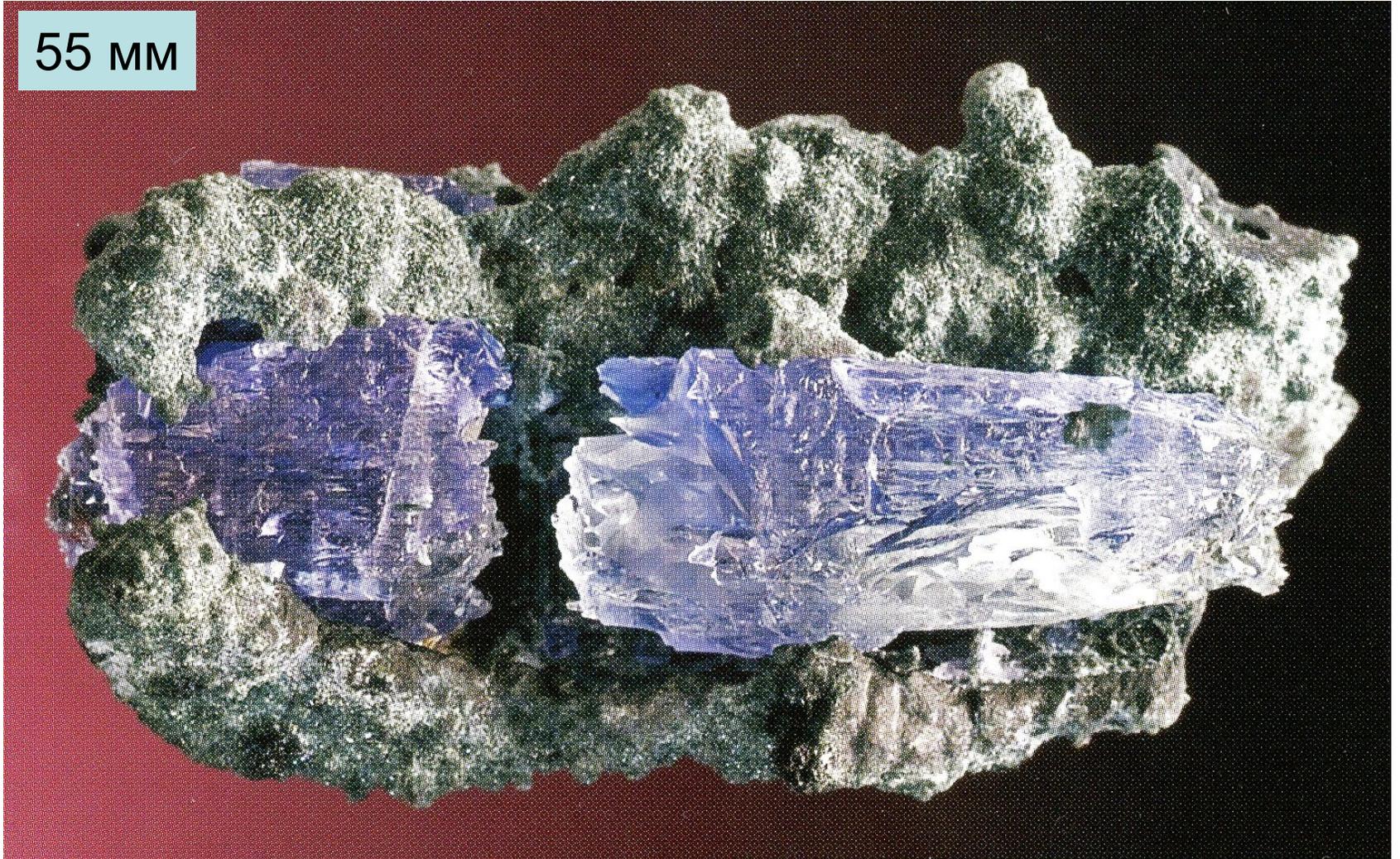


18 мм. Липовка, Средний Урал

КРИСТАЛЛОНОСНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

Инверсионный еремеевит $\text{Al}_6[(\text{F}, \text{OH})_3/(\text{BO}_3)_5]$

55 мм



На агрегате фойтита. Эронго, Намибия

КРИСТАЛЛОНОСНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

Инверсионный еремеевит $\text{Al}_6[(\text{F},\text{OH})_3/(\text{BO}_3)_5]$

55 мм



25
мм



10 мм



1.7 мм



Cape Cross, Erongo Mountain, Swakopmund, Намибия

ИНВЕРСИОННЫЙ СПОДУМЕН

Сподумен $\text{Li}(\text{Al}, \text{Mn}^{3+})[\text{Si}_2\text{O}_6]$. Кунцит замечательного сиреневого и светло-фиолетового цвета обилен в крупных плитообразных телах сподуменовых пегматитов Афганистана, Памира, Пакистана (Нуристана), известен в пегматитах Калифорнии (Himalaya Mine) и Бразилии (Urucum Mine, Минас Жераис). Уникальное м-ние кунцита Кулам. Прозрачный сподумен – кунцит образуется ниже 500°C , ассоциирует с клевеландитом и лепидолитом. При наличии во вмещающей среде серпентинитов с феррихромитом в сподуменовых гранитных пегматитах в этих условиях появляется зелёный хромсодержащий гидденит.

80 мм.

Кулам,

Нуристан,

Афганистан



ИНВЕРСИОННЫЙ СПОДУМЕН

Уникальное месторождение кунцита Кулам – часть (1200 м) крупной (3000x5-40 м) пологой (10-20°) жилы сложно дифференцированных альбит-микроклиновых гранитных пегматитов среди габбро-норитов. От основной жилы отходят многочисленные круто падающие апофизы 200-400x2-10 м. Полости с кунцитом развиты в основном у всячего контакта главной пегматитовой залежи и в апикальных частях апофиз пегматита. Минерализованные зоны 1 типа – с массой полостей размером 0.5 – 3 м, которые развиты в блоковой микроклиновой зоне с размером кристаллов микроклина до 5 м и с биотитом. Стенки полостей покрыты множеством коротко столбчатых кристаллов микроклина и горного хрусталя. На них местами выросли агрегаты голубого тонко пластинчатого альбита – клевеландита, мусковита, лепидолита, розового сподумена и кунцита, воробьевита, поллукита. Они интенсивно замещают микроклин. Минерализованные зоны 2 типа – грубозернистые агрегаты микроклина (10-100 см), кварца (10-100 см), бело-розового досковидного сподумена (4-5 – 70 см), промежутки между которыми заполнены агрегатами клевеландита и лепидолита, - с массой неравномерно распределённых полостей до 2.5x1.5 м. В полостях – клевеландит, лепидолит, кунцит, воробьевит, поллукит, касситерит, мангантанталит, манганопатит, микролит... Размер кристаллов кунцита от 2x1x1 см до 45x20x4 см (Россовский, 1980).

ИНВЕРСИОННЫЙ СПОДУМЕН - КУНЦИТ



Kulam, Nuristan,
Афганистан

Mawi, Laghman,
Афганистан



ИНВЕРСИОННЫЙ СПОДУМЕН - КУНЦИТ



Мави, Laghman,
Афганистан



114 мм



Полихром-
ный. Парок,
Nuristan,
Афган



ИНВЕРСИОННЫЙ СПОДУМЕН - КУНЦИТ



С альбитом

С воробьевитом

Афганистан

ИНВЕРСИОННЫЙ СПОДУМЕН - КУНЦИТ

83 мм



Urucum mine, Minas Gerais



Urucum mine, Itambacuri,
Минас Жераис,
Бразилия

ИНВЕРСИОННЫЙ СПОДУМЕН - КУНЦИТ

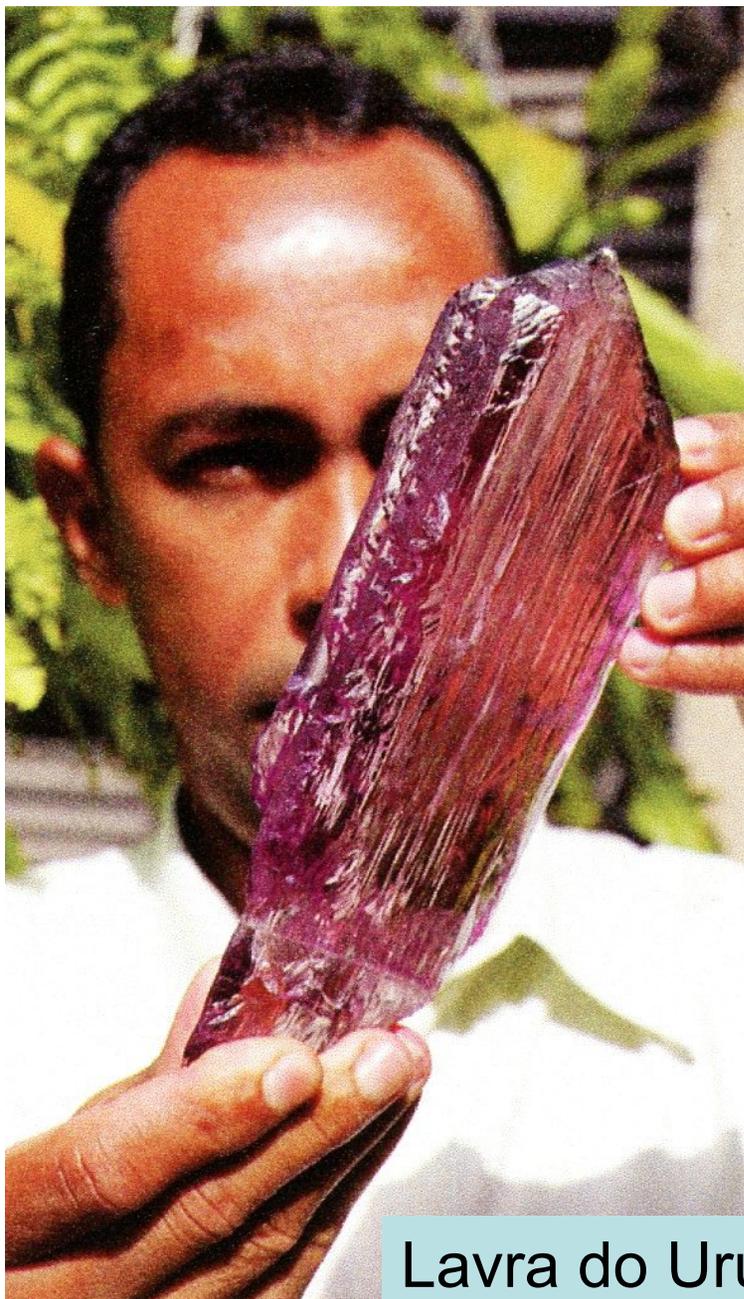


95x28 мм. Lavra do Urucum, Galilea. Минас Жераис



Lavra do Urucum, Galilea. Минас Жераис

ИНВЕРСИОННЫЙ СПОДУМЕН - КУНЦИТ



Лавандовый
сподумен

350x170 мм



Lavra do Urucum, Galilea. Минас Жераис

ИНВЕРСИОННЫЙ СПОДУМЕН ПОЛИХРОМНЫЙ КУНЦИТ - ГИДДЕНИТ

68x
34
мм



Мави, Лагман,
Афганистан



Урукум,
Минас-Жераис,
Бразилия



Конар,
Афганистан



ИНВЕРСИОННЫЙ ГИДДЕНИТ

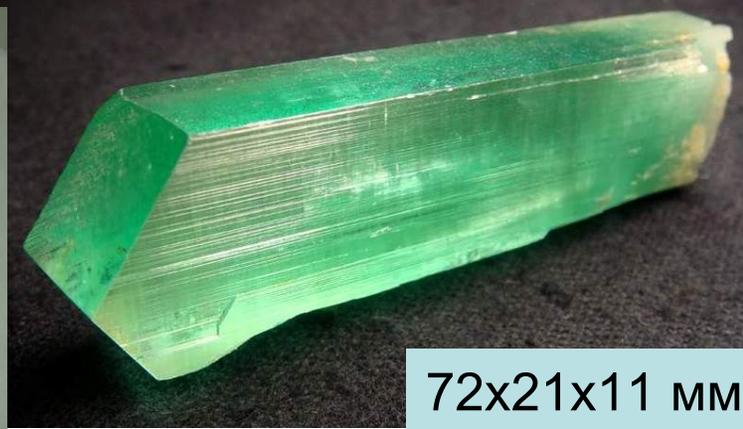
67
мм



Северная
Каролина,
США



Kunar Valley, Нуристан, Афганистан



72x21x11 мм

КРИСТАЛЛОНОСНЫЕ ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

Инверсионный лепидолит



Зональный кристалл 50 мм.
Usakos, Намибия



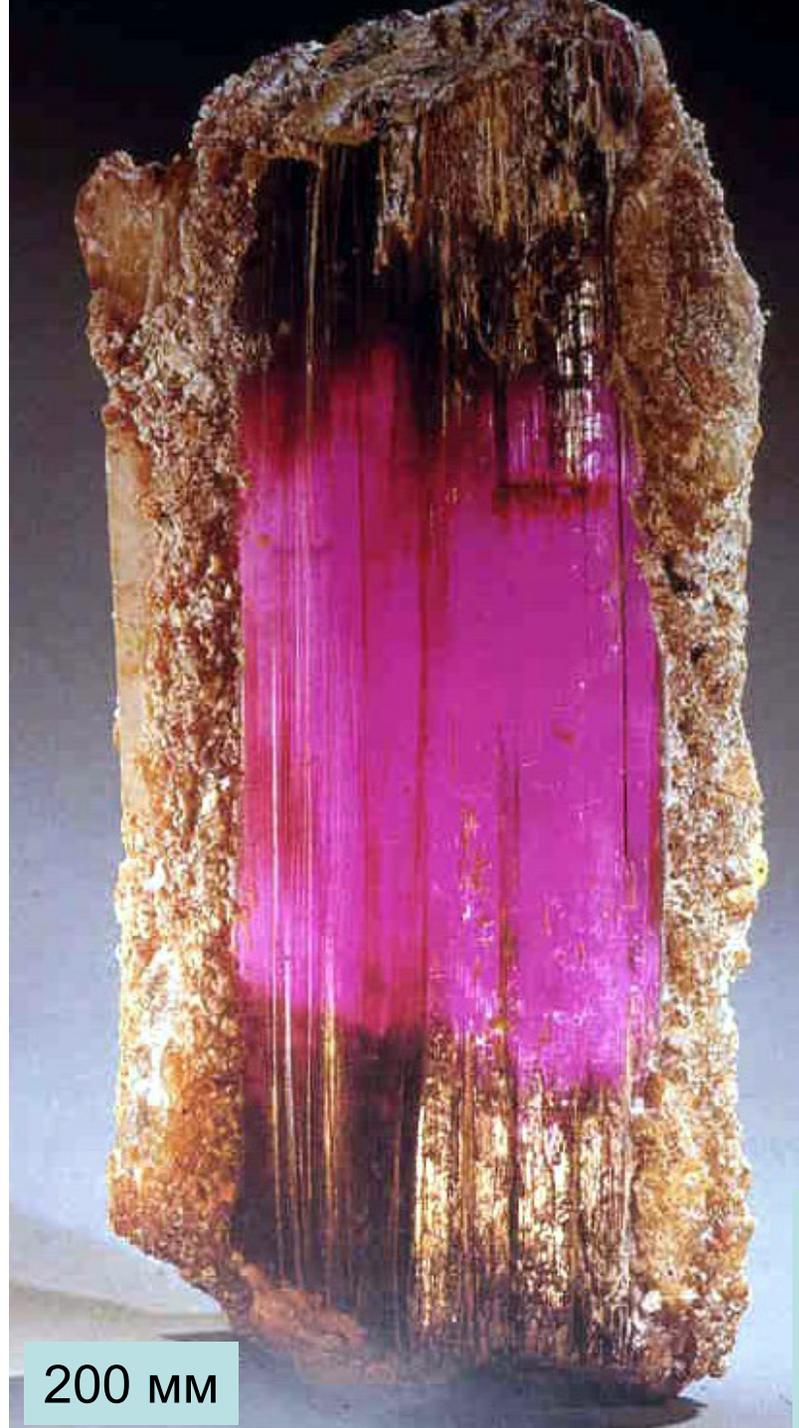
Лепидолит политипа 1М.
Анцунгумбату, Бетафу,
Мадагаскар

Инверсионный лепидолит с Fe^{3+} - Mn^{3+}

Лепидолит



фантастически яркого розово-карминного цвета находится в пегматитах Cruzeiro Mine, Минас Жераис, Бразилия. Самоцветный лепидолит развит и в пегматитах Londonderry и Plenty River, Австралия.



200 мм

Cruzeiro mine,
Минас Жераис,
Бразилия

ИНВЕРСИОННЫЙ ДАНБУРИТ

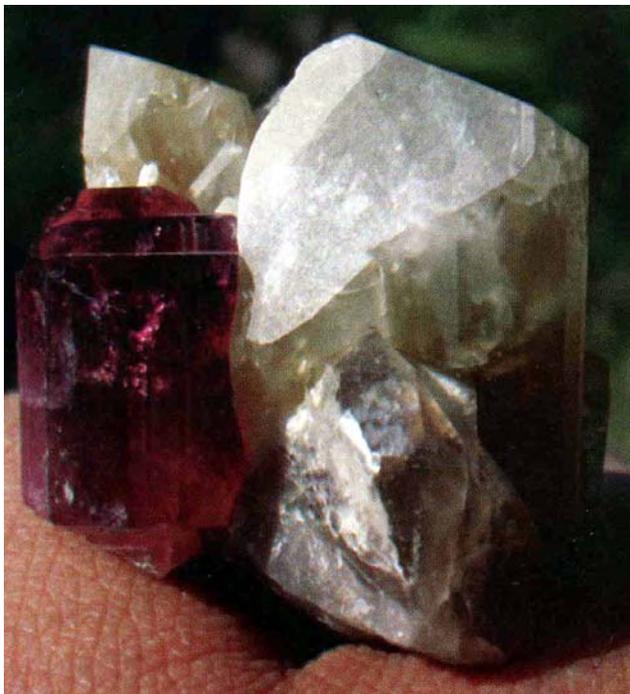
Данбурит $\text{Ca B}_2 [\text{SiO}_4]_2$

Кукурт,
Вост. Памир,
Таджикистан



Малхан,
Восточное
Забайкалье

30x25 мм



40x35 мм.
С рубеллитом

Минералогенез
гранитных пегматитов
миаролитовых.

3 часть.

**ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ
ОБРАЗОВАНИЯ – продукты кристаллизации
из щелочных растворов.**

Отходы пегматитового «производства»

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФТОРИДЫ – криолит Na_3AlF_6 , хиолит $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$

Продукты кристаллизации из щелочных растворов



110x80 мм.

Агрегат
криолита и
хиолита.

Блюмовская копь,
Ильменские горы

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – бразилианит $\text{NaAl}_3[(\text{OH})_4/(\text{PO}_4)_2]$

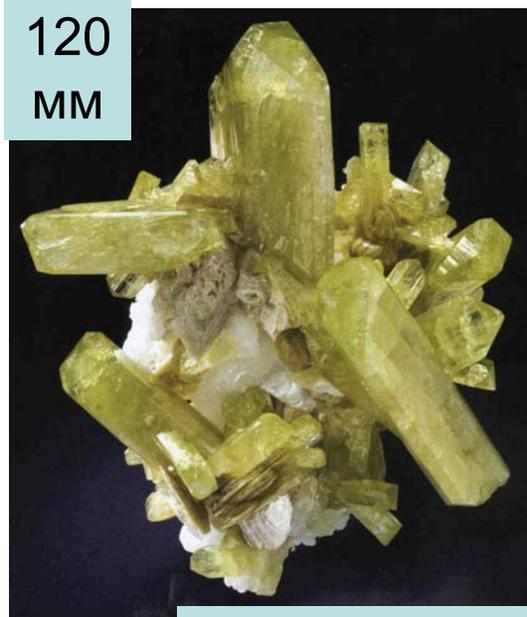
Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов - апатита, литиофиллита...

Минас Жераис

С альбитом

Друза 350 мм

120
мм



Telirio mine

95 мм



73x49 мм.
Sao Geraldo
do Baixio



Linopolis

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – бразилианит $\text{NaAl}_3[(\text{OH})_4/(\text{PO}_4)_2]$

Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов - апатита, литиофиллита...

Corredo Frio, Минас Жераис



С альбитом



23 мм



47
мм

На мусковите

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – бразилианит $\text{NaAl}_3[(\text{OH})_4/(\text{PO}_4)_2]$

Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов - апатита, литиофиллита...



63 мм. Corredo Frio

Минас Жераис



кварц

54 мм

Mendes Pimental

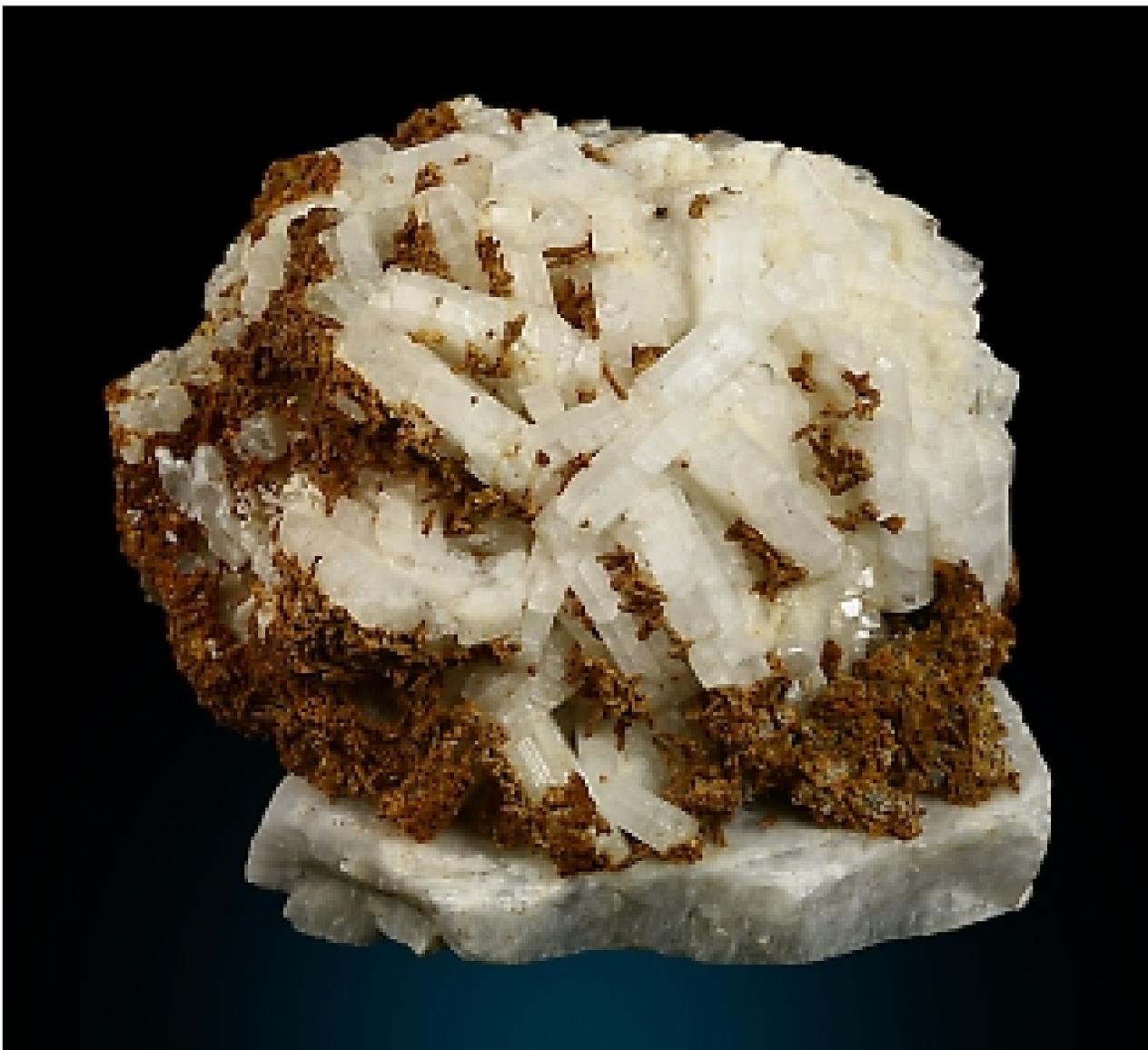


180
мм

микроклин-пертит

Lavra do Marcel

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – эсфорит $\text{Mn}^{2+} \text{Al} [(\text{OH})_2 / \text{PO}_4] \cdot (\text{H}_2\text{O})$

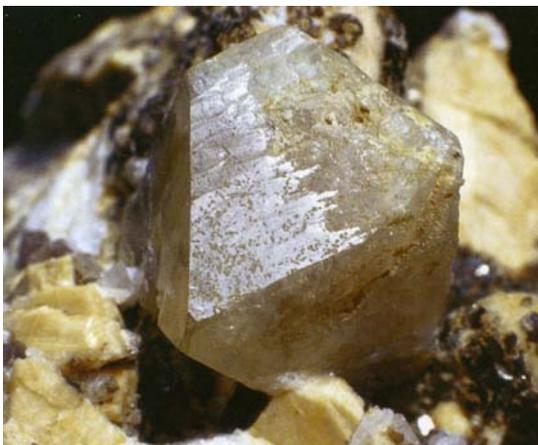


Эсфорит
с альбитом.
89x80 мм.
Арасуаи,
Минас Жераис,
Бразилия

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – фторгердерит $\text{Ca Be [(F,OH)/PO}_4\text{]}$

Продукт кристаллизации из щелочных $\text{Mn}^{2+}\text{Al}[(\text{OH})_2/\text{PO}_4]\cdot(\text{H}_2\text{O})$ растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов и берилла

70 мм. С турмалином –
верделитом



13 мм. Zufurt,
Fichtelgebirge,
Германия



Marilac, Бразилия



100 кг.
Governador
Valadares,
Минас Жераис

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – фторгердерит $\text{Ca Be [(F,OH)/PO}_4\text{]}$

Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов и берилла (гельвина)

14 мм



Группа кристаллов на мусковите.

С флюоритом и кварцем
Ehrenfridensdorf,
Германия

14 мм



ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – гидроксилгердерит $\text{Ca Be [(\text{OH}, \text{F})/\text{PO}_4]}$

Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов и берилла (гельвина)



Бразилия



35
мм

С турмалином.
Erongo complex, Намибия



90x75 мм



Гилгит -
Скарду,
верховья
реки Инд,
Пакистан

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – гидроксилгердерит $\text{Ca Be}[(\text{OH}, \text{F})/\text{PO}_4]$

Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов и берилла (гельвина)



Гидроксилгердерит на
выщелоченном пертите
88x82 мм.

Lavra do Xanda,
Virgem da Lapa,
Минас Жераис

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – вэйриненит $\text{Be}(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})[(\text{OH}, \text{F})/\text{PO}_4]$

Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов и берилла (гельвина)



Shigar-Tal, Гилгут, Пакистан

Shengus, Пакистан

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – бериллонит $\text{Na Be} [\text{PO}_4]$

Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов и берилла (гельвина)

230x60 мм



105x90 мм



80
мм

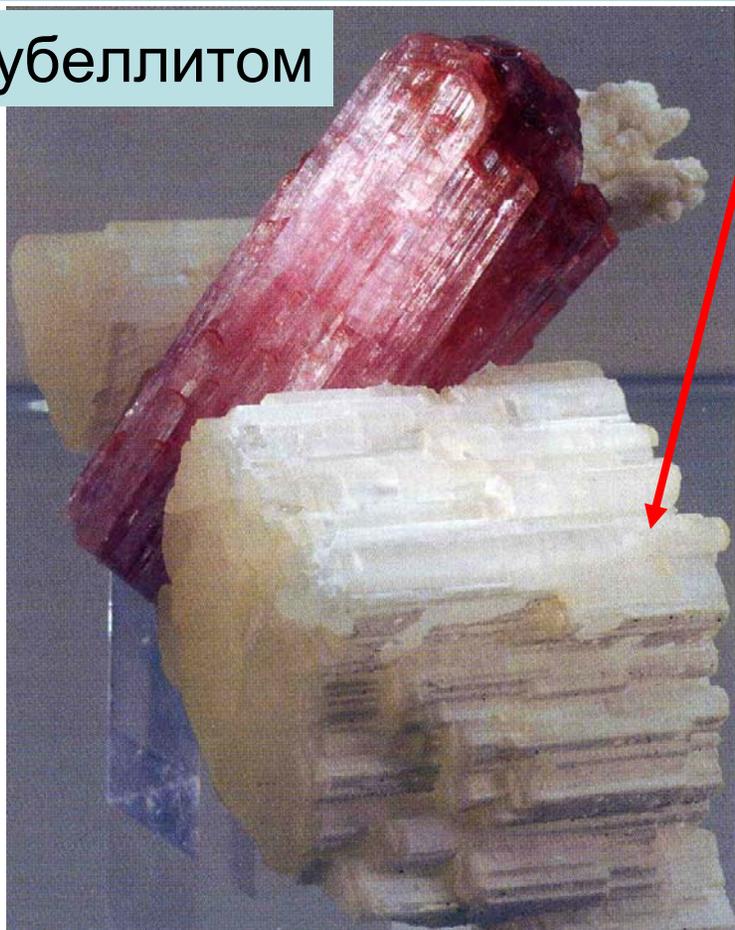


Рарок, Кунар, Нуристан, Афганистан

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – бериллонит $\text{Na Be [PO}_4\text{]}$

Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов и берилла (гельвина)

С рубеллитом



Рарок, Кунар, Нуристан, Афганистан

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ ФОСФАТЫ – виитамьенит $\text{Be}(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})[(\text{OH}, \text{F})/\text{PO}_4]$

Продукт кристаллизации из щелочных растворов. Возник за счёт вещества более ранних фосфатов – апатита, литиофиллита...



Кристалл 170 мм

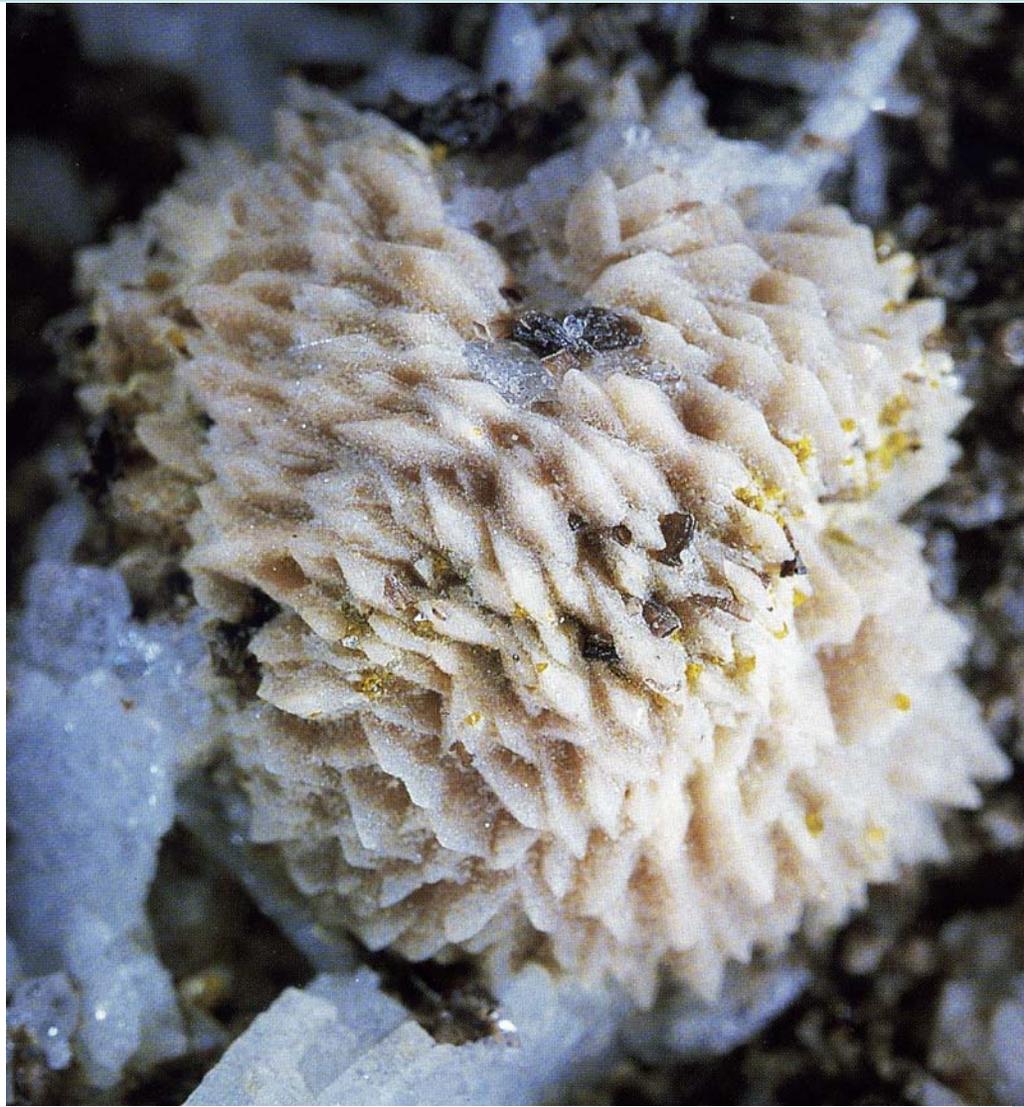
на агрегате
эльбаита и
лепидолита.

Рарок,
Нуристан,
Афганистан

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ СИЛИКАТЫ

Стоксит $\text{Ca}_2\text{Sn}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}] \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$

Возник за счёт вещества более ранних минералов олова



50x45 мм

До 10 мм
на альбите –
клевеландите.
Corrego do Urucum,
Galilei, Бразилия

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ СИЛИКАТЫ

Бертрандит $\text{Be}_4[(\text{OH})_2/\text{Si}_2\text{O}_7]$

Возник за счёт вещества более ранних минералов бериллия

Bertrandite (28 x 35 mm)
and black tourmaline in
cookeite, Alto da Golconda,
old Lavra do Tino,
Governador Valadares,
Minas Gerais. Collection of
Julio Landmann. Photograph
taken by Marcelo Lerner.



35x28 мм.

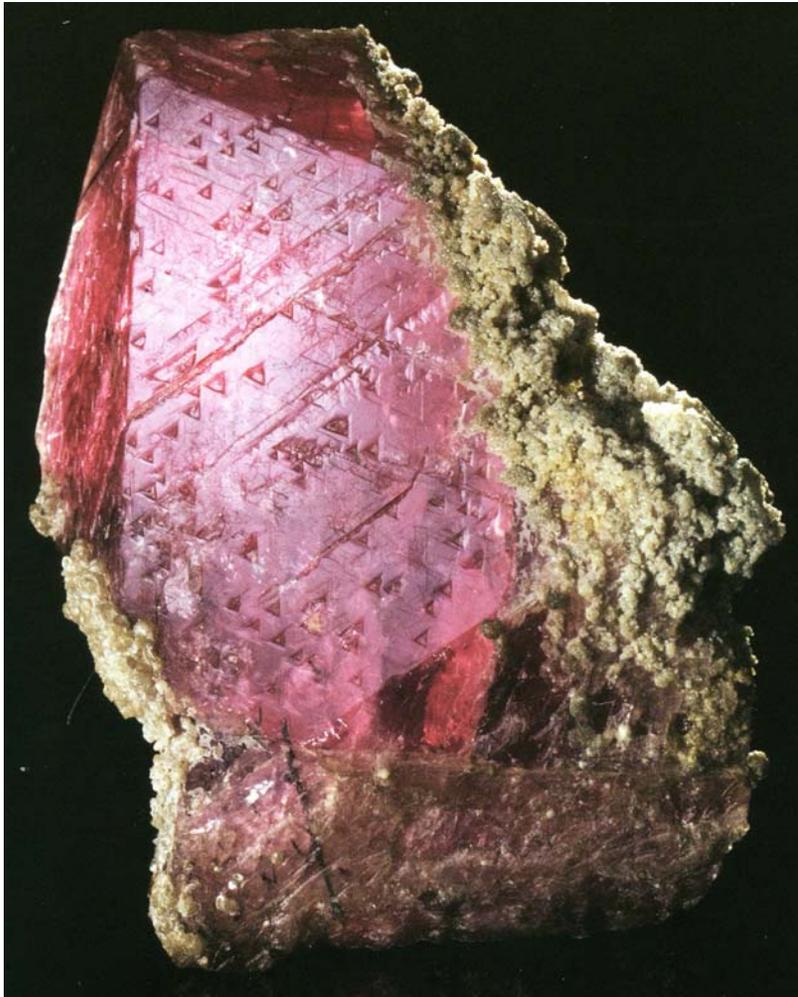
С турмалином
и кукеитом.

Alto da Golconda,
old Lavra do Tino,
Минас Жераис

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ СИЛИКАТЫ

Родохрозит, турмалин и кукеит $\text{LiAl}_4[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_8$

Возникли за счёт вещества более ранних минералов лития



64x45 мм.
Lavra do Turquinho,
Sao Jose do Safira,
Минас Жераис

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ СИЛИКАТЫ

Кукеит $\text{LiAl}_4[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_8$

Возник за счёт вещества более ранних минералов лития



Кукеит + фторапатит 37x26 мм.
Urucum mine, Минас Жераис,
Бразилия



Кукеит – сферолиты по 3 мм.
Зона изменений
натрово-литиевых
пегматитов.
Средняя Азия

ПОЗДНЕПЕГМАТИТОВЫЕ СИЛИКАТЫ

Кукеит $\text{LiAl}_4[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_8$

Возник за счёт вещества более ранних минералов лития



103x64 мм

На альбите



Кукеит на пластинах альбита и на лепидолите.
Itambe, Бахия, Бразилия

