

Э.М. Спиридонов

Минералы магматитов –
амфиболы

Параметры возникновения расплавов различного состава

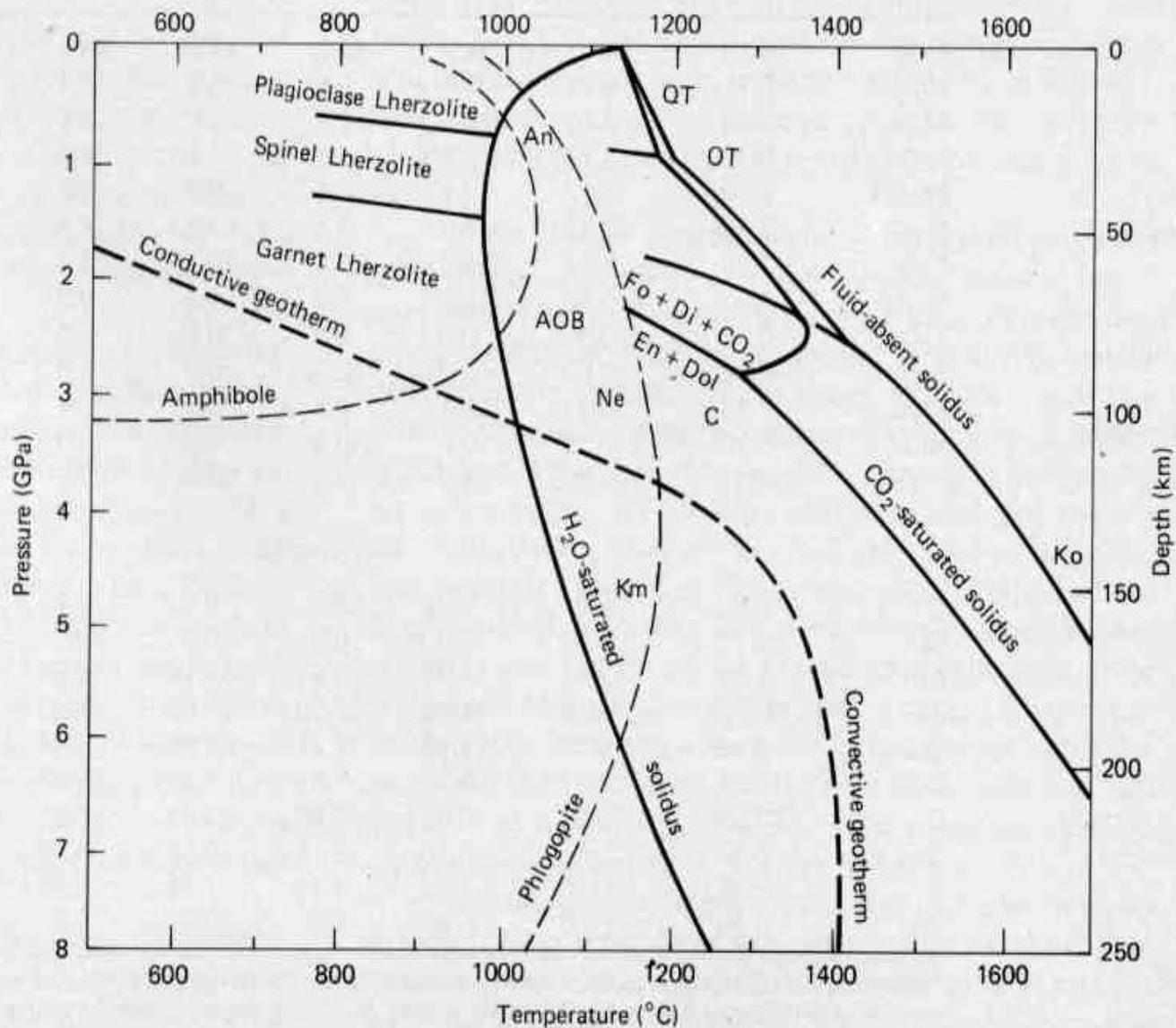
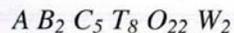


FIGURE 22-13 Approximate phase relations for a lherzolite mantle under fluid-absent, H₂O-saturated, and CO₂-saturated conditions. Sources of information same as in Figure 22-13, with H₂O-saturated solidus from Kushiro et al. (1968), and CO₂-saturated solidus from Eggler (1976) and Wyllie and Huang (1976). Probable source regions are indicated for the following rocks: quartz tholeiite (QT), olivine tholeiite (OT), komatiite (Ko), andesite (An), alkali olivine basalt (AOB), nephelinite (Ne), carbonatite (C), and kimberlite (Km).

The general formula for amphiboles may be written as



where $A = \square, Na, K, Ca, Pb^{2+}$; $B = Li, Na, Mg, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Ca$; $C = Li, Mg, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Zn, Co, Ni, Al, Fe^{3+}, Cr^{3+}, Mn^{3+}, V^{3+}, Ti^{4+}, Zr$; $T = Si, Al, Ti^{4+}$; $W = (OH), F, Cl, O^{2-}$. The A, B, C, T and W groups of this formula correspond to specific sites or groups of sites in the amphibole structure. Here, we will refer to the $C2/m$ structure, but the site nomenclature of the other amphibole structures is similar. It should be straightforward to correlate the correspondences given below with any other type of amphibole structure. The $C2/m$ amphibole structure is shown in Figure A1; this figure may be used to locate in the amphibole structure the sites mentioned below.

A group	A site
B group	M(4) site
C group	M(1), M(2), M(3) sites
T group	T(1), T(2) sites
W group	O(3) site

A1 B2 Y5 Z8 O22 (OH, F, Cl, O)2

A = Na, K, H₃O⁺, Ca, □

B = Ca, Na, (Mg, Fe²⁺, Mn²⁺)

Y = Mg, Fe²⁺, Mn²⁺, Al, Fe³⁺, Ti, Li, Cr, V

Z = Si, Al, Fe³⁺, B, P.....

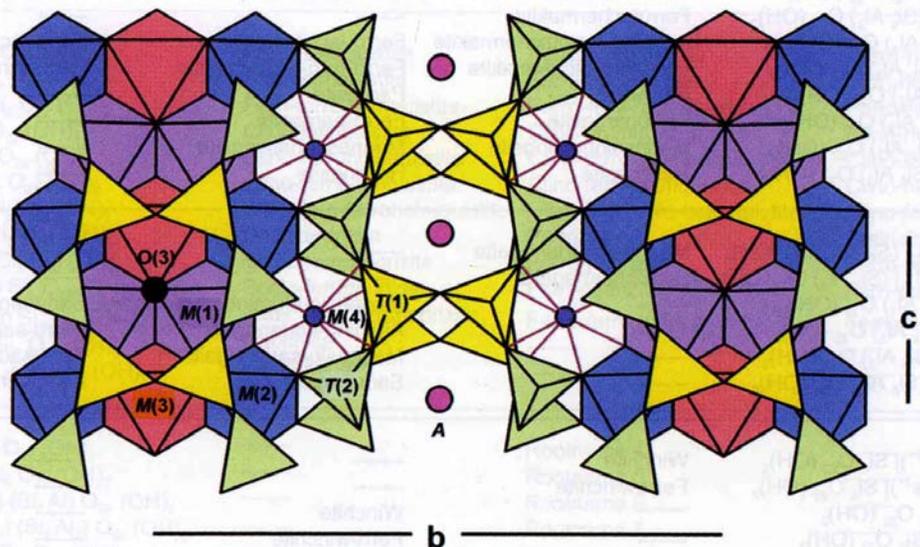


FIG. A1. The structure of $C2/m$ amphibole projected onto (001); T -group polyhedra are shaded yellow, $T(1)$, and green, $T(2)$; C -group polyhedra are shaded mauve, $M(1)$, blue, $M(2)$, and orange, $M(3)$; the B -group site is shown by the blue circle, $M(4)$; the A -group site is shown by the central pink circle, A .

Структура амфиболов

Структура амфиболов

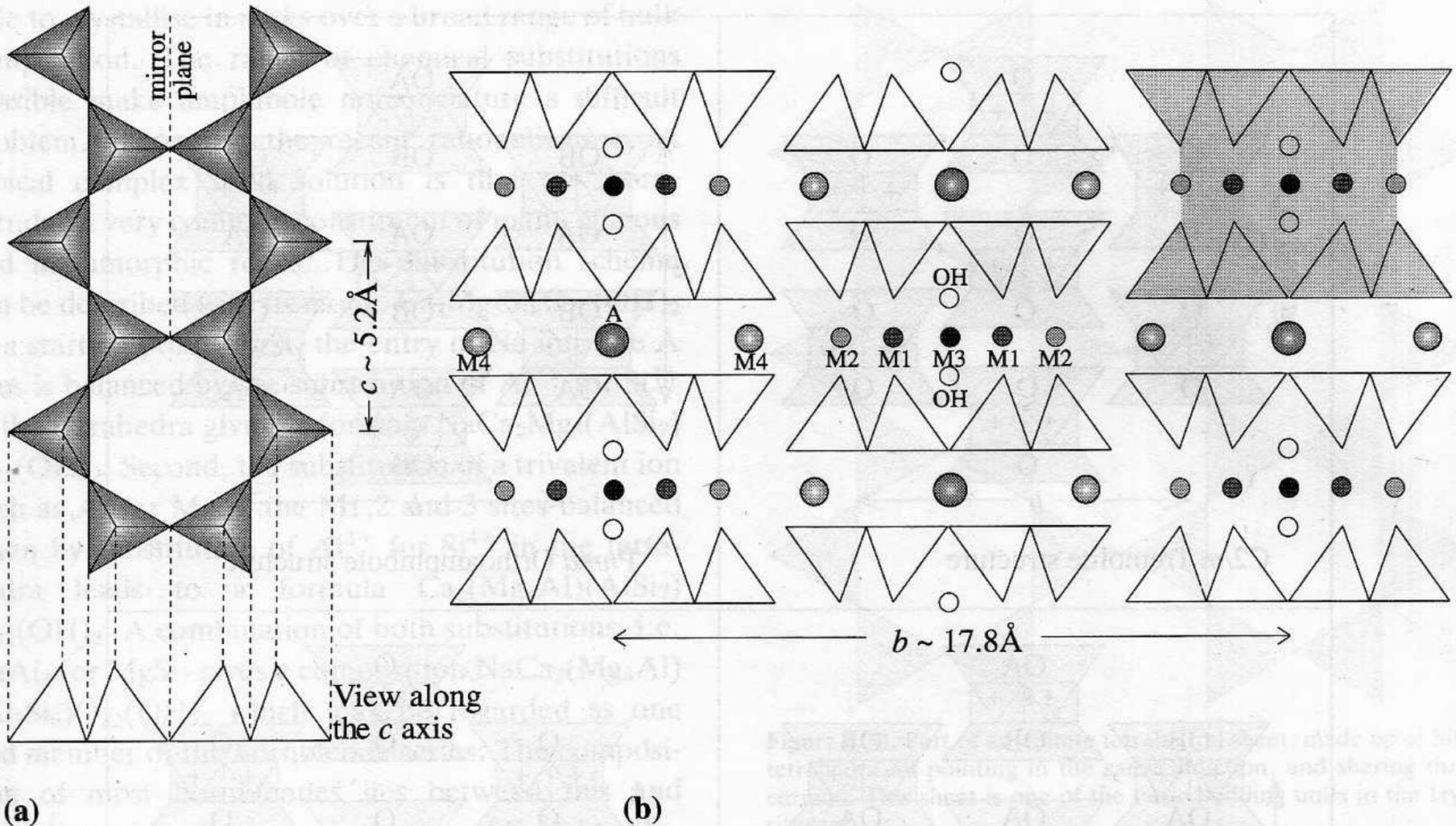


Figure 6.29. (a) A double chain of SiO_4 tetrahedra in amphiboles, extending along the c axis, and below, a schematic representation of this double chain viewed end-on. Here the chains are straight – in practice they are always slightly rotated as in Figure 6.30. (b) The arrangement of double chains in the amphibole structures, viewed along the c axis. The M1, M2 and M3 cations form chains of edge-sharing octahedra between the apices of the tetrahedra, while the larger M4 octahedra form similar chains between the bases of the tetrahedra. The A sites and the OH sites lie in the rings formed along the double chain. One I-beam, analogous to that in pyroxenes, has been shaded.

Моноклинные амфиболы - кальциевые и натриево-кальциевые

каннилоит	$\text{Ca Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4\text{Al} [\text{Al}_3\text{Si}_5\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
алюмочермакит	□ $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2 [\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
алюмоферрочермакит	□ $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_3\text{Al}_2 [\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
ферриферрочермакит	□ $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_3(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_2 [\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
феррочермакит	
паргасит	Na $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti}) [\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
ферропаргасит	
магнезиогастингсит	Na $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Ti}) [\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
гастингсит	Na $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_4(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Ti}) [\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
керсутит	Na $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_4(\text{Ti}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+}) [\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{O})_2$
феррокерсутит	
эденит	Na $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_5 [\text{AlSi}_7\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
ферроэденит	
магнезиогорнблендит	□ $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}) [\text{AlSi}_7\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
феррогорнблендит	
тремолит	□ $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
актинолит	
ферроактинолит	□ $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_5 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$

Магматические Na-Ca амфиболы

Само наличие магматических амфиболов свидетельствует о том, что расплавы породившие эти породы были водонасыщенные. Минимальные концентрации воды в расплавах гранодиоритового – андезитового состава для кристаллизации паргасита – около 4-6 масс. % для давления 2 кб и около 2.5-3 масс. % для давления 8 кб. При давлении 2 кб и содержании воды в расплаве андезито-базальтового состава около 6.5 масс. % максимальная температура устойчивости паргасита составляет 975°C .

Максимальная температура устойчивости магматических амфиболов установлена в расплавах щелочных базальтов – 1090°C при 13 кб.

Максимальное давление устойчивости амфиболов – 31.5 кб при температуре 1030°C (в расплаве оливиновых нефелинитов = высокощелочных базальтов).

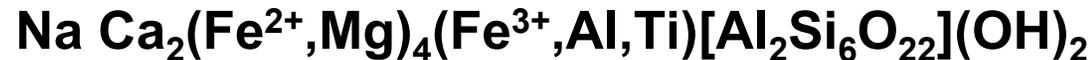
Магматические Na-Ca амфиболы

Ведущие типы амфиболов магматических пород нормального ряда :

паргасит



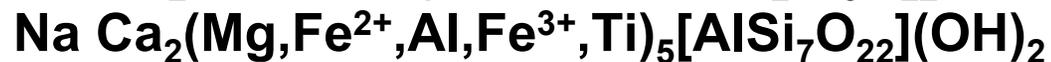
гастингсит



керсутит



эденит

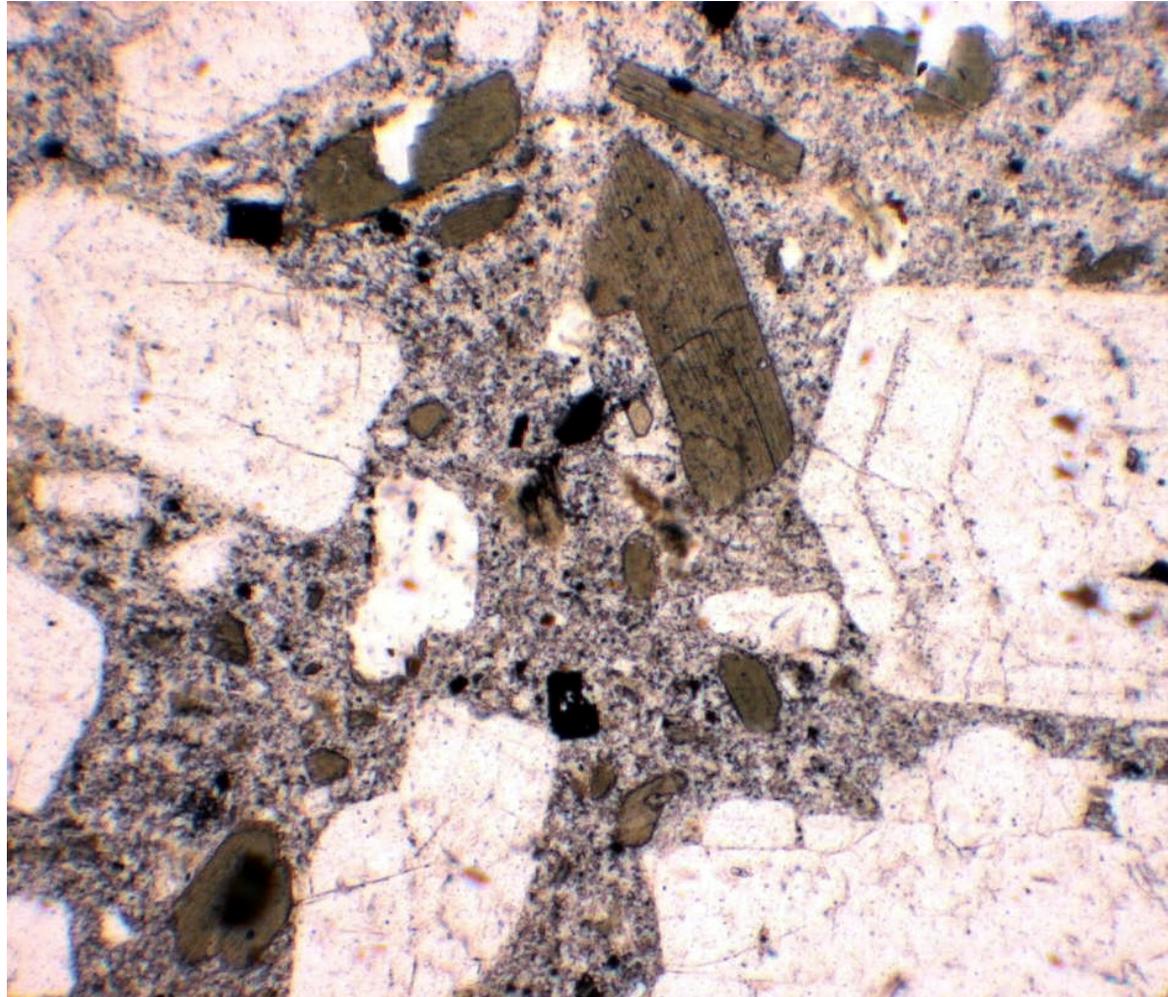


Самый обычный и распространённый из них – паргасит, который к тому же часто и самый ранний из амфиболов. Паргасит характерный минерал островодужных вулканитов от базальтов до риолитов, типичный позднемагматический минерал габброидов, раннемагматический минерал кварцевых диоритов – тоналитов – гранодиоритов – адамеллитов – гранитов; кроме того, развит в виде мегакристаллов в некоторых типах островодужных базальтов . Керсутит – типичный ранний минерал базитов повышенной и высокой щёлочности, широко развит в виде мегакристаллов в мантийных щелочных базальтах и во включениях в них. Гастингсит – типичный минерал гранитоидов. Эденит – поздний магматический амфибол разнообразных магматитов не высокой щёлочности. Обычные магматические амфиболы содержат $\text{Na}_2\text{O} > 1\text{-}2\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 5\%$, $\text{TiO}_2 > 1\%$, $\text{H}_2\text{O} \sim 2\%$.

Горнблендит и магнезиогорнблендит, как и тремолит – актинолит, – минералы послемагматические, относительно низкоТ.

Магматические Na-Ca амфиболы

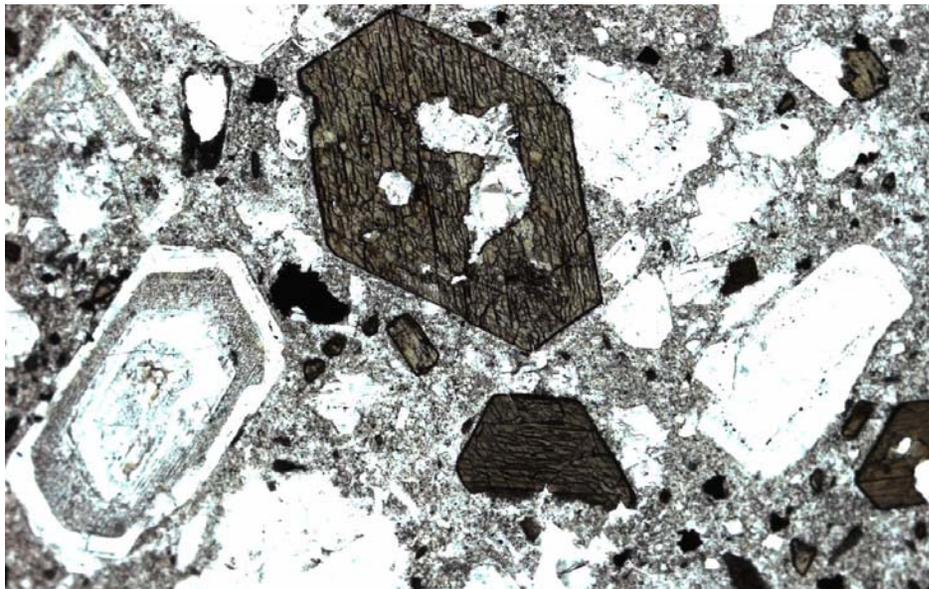
Стандартный тренд кристаллизации магматических амфиболов : паргасит → гастингсит → эденит. В ходе кристаллизации в составе амфиболов снижаются содержания Al, Mg и Ti, возрастают содержания Fe и Mn. Магматические амфиболы содержат не мало лёгких редкоземельных элементов.



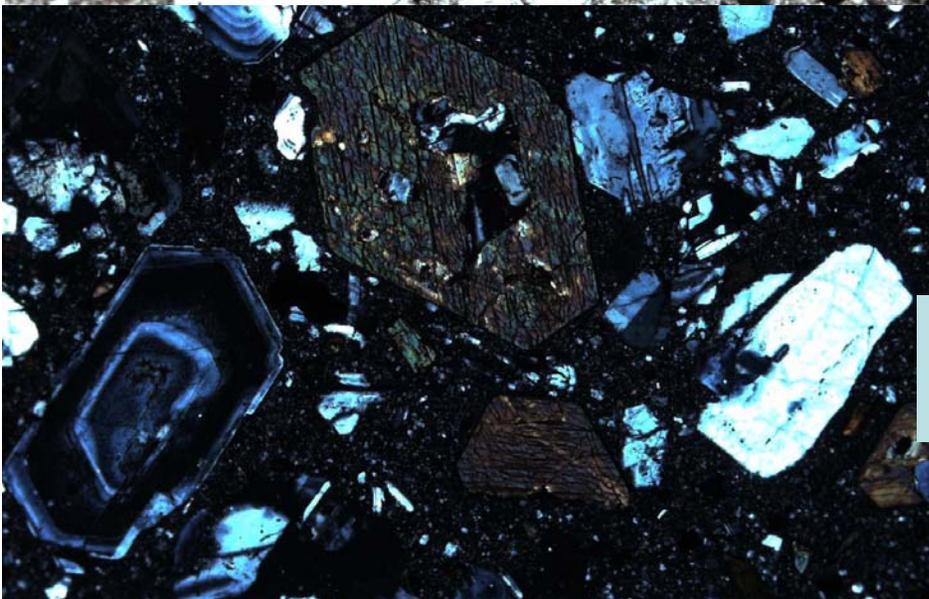
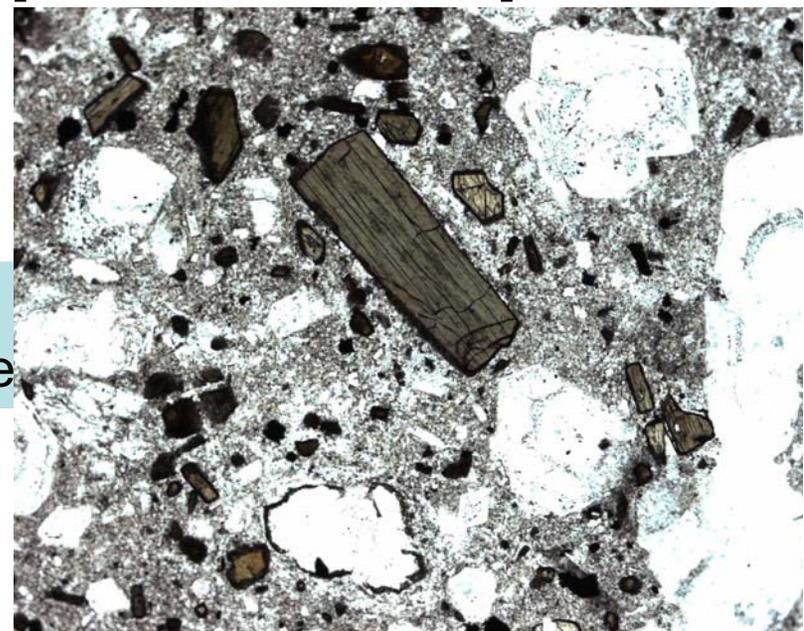
Паргасит

Вкрапленники паргасита и плагиоклаза в андезитах.
При 1 николе.
Балаклавский вулканический комплекс мелового возраста.
Горный Крым

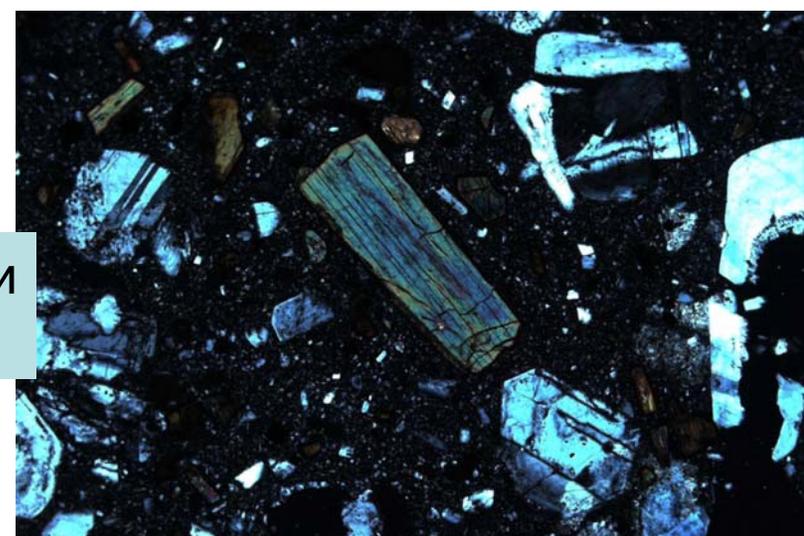
Магматические Na-Ca амфиболы. Паргасит



При 1
николе

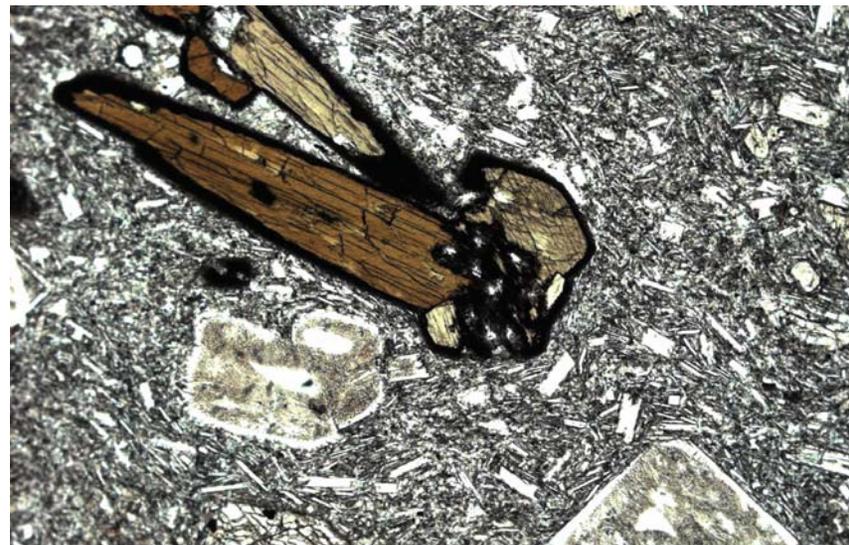


Николи
x

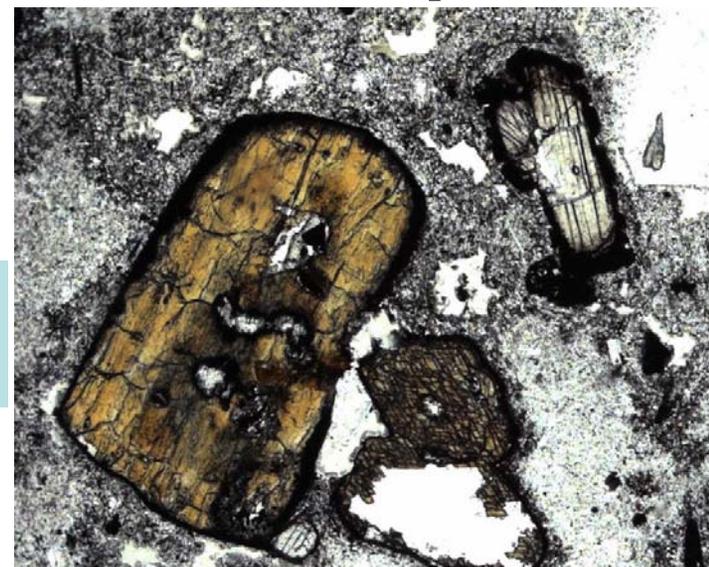


Вкрапленники паргасита и плагиоклаза в андезитах.
Вулканический комплекс Центральной Камчатки

Магматические Na-Ca амфиболы. Паргасит



При 1
николе



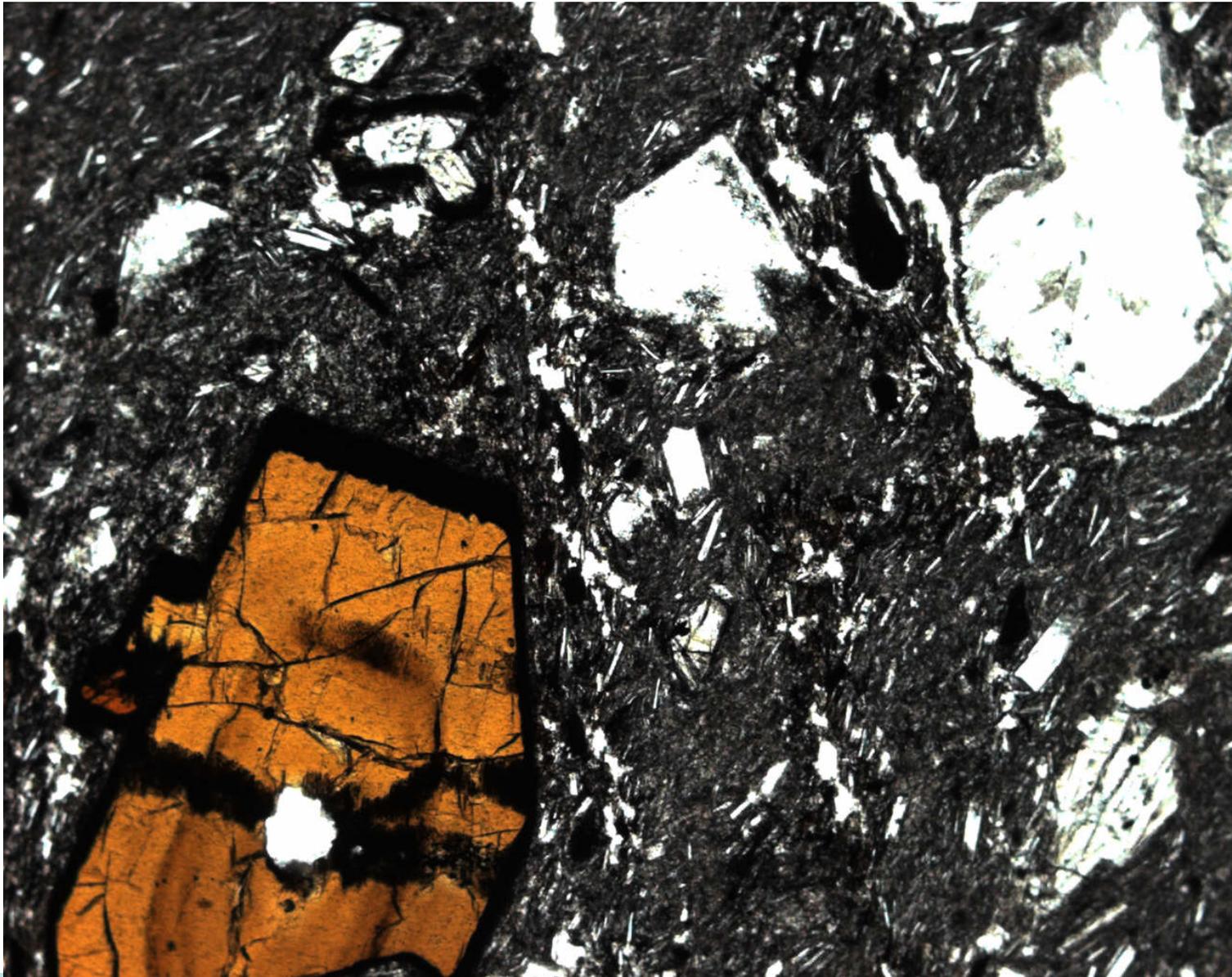
Николи
X



Вкрапленники паргасита с опацитовой каймой (продукты окисления – горения лавы на воздухе). Андезиты Центральной Камчатки

Магматические Na-Ca амфиболы. Паргасит

При 1
николе



Вкрапленник паргасита с опацитовою каймой (продукты окисления – горения лавы на воздухе). Андезиты Центральной Камчатки

Состав магматических Na-Ca амфиболов (в ассоциации с биотитом, кварцем, K-Na пол.шпато...)-

- глинозёмистость - геобарометр

Один из лучших – Johnson, Rutherford, 1989.

$$P (\pm 0.5 \text{ кб}) = - 3.46 + 4.23 \text{ Al форм.ед.}$$

(на 23 атома кислорода)

Al форм. ед. – P кб

0.9 - 0.3

1.0 - 0.8

1.3 - 2.0

1.6 - 3.3

1.8 - 4.2

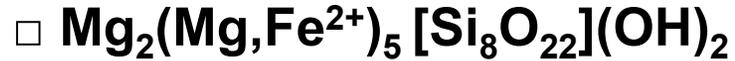
2.0 - 5.0

2.3 - 6.3

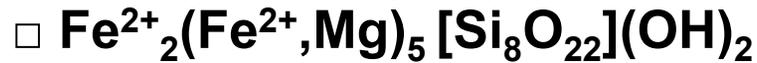
2.7 - 8.0

Моноклинные амфиболы - магнезиально-железистые

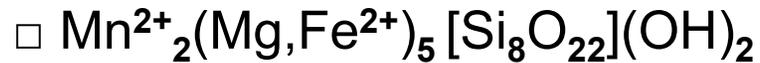
куммингтонит



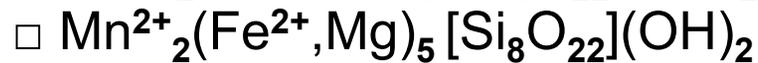
грюнерит



манганкуммингтонит

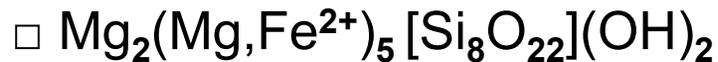


мангангрюнерит

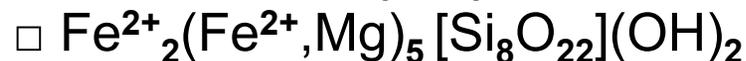


Ромбические амфиболы - магнезиально-железистые

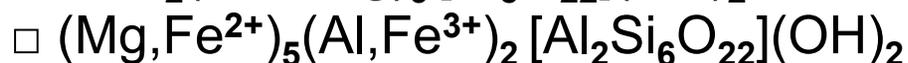
антофиллит



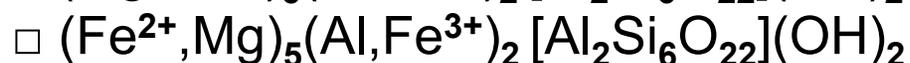
ферроантофиллит



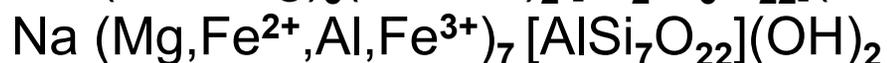
жедрит



феррожедрит



натровый жедрит



холмквистит



феррохолмквистит



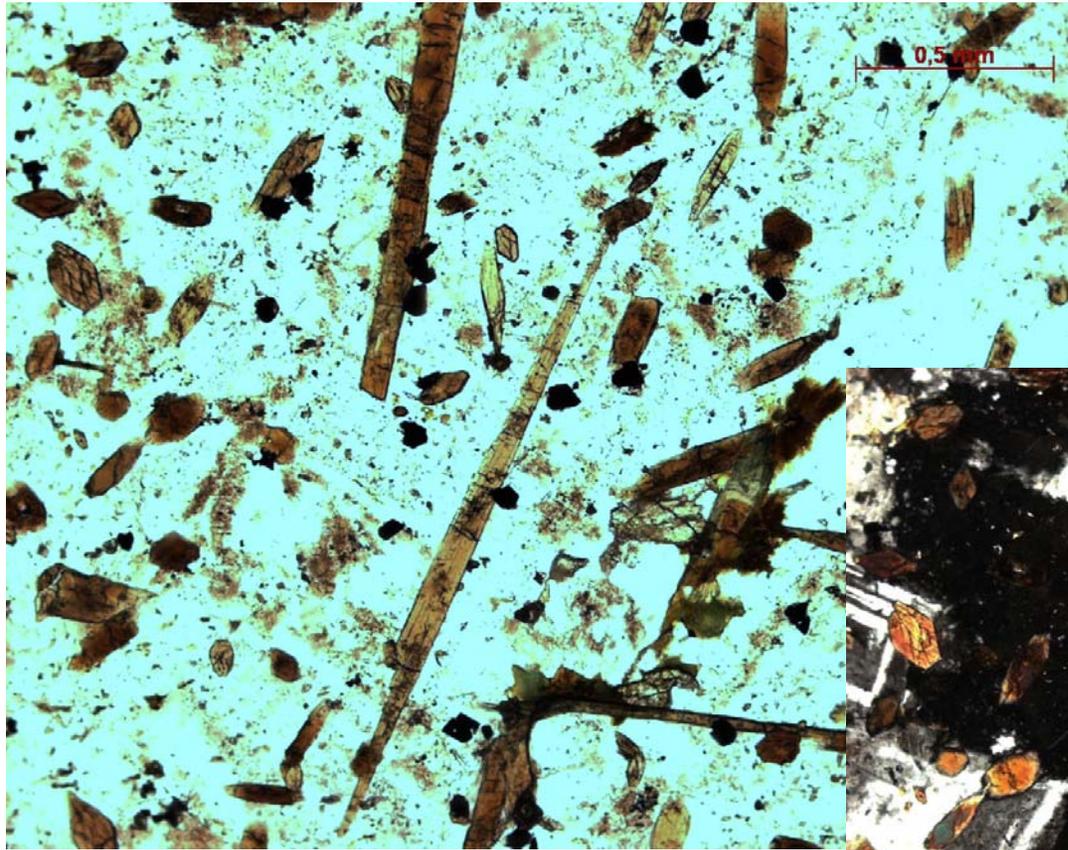
Магматические Fe амфиболы. Грюнерит

НизкоСа Mg-Fe амфиболы не редки в кремнекислых магматитах

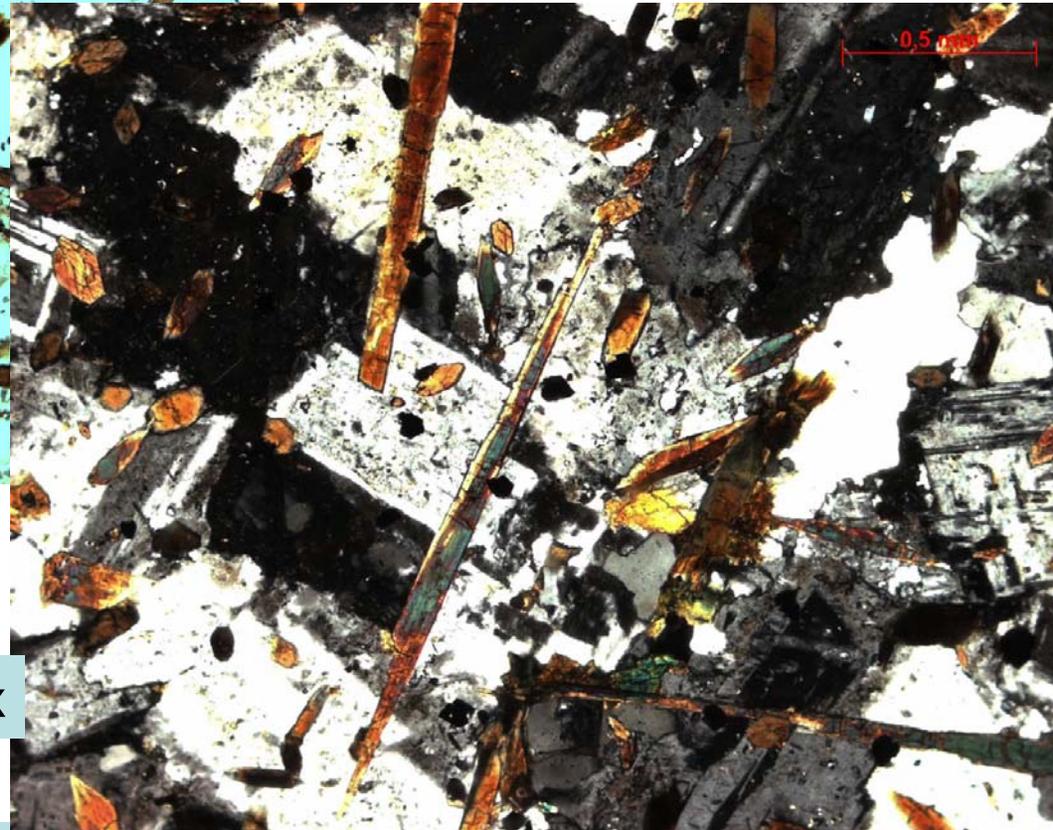


Радужная игра
мексиканских
обсидианов
обусловлена
массой
мельчайших
ориентированных
включений
грюнерита
в
вулканическом
стекле

Магматические Na-Ca амфиболы. Керсутит



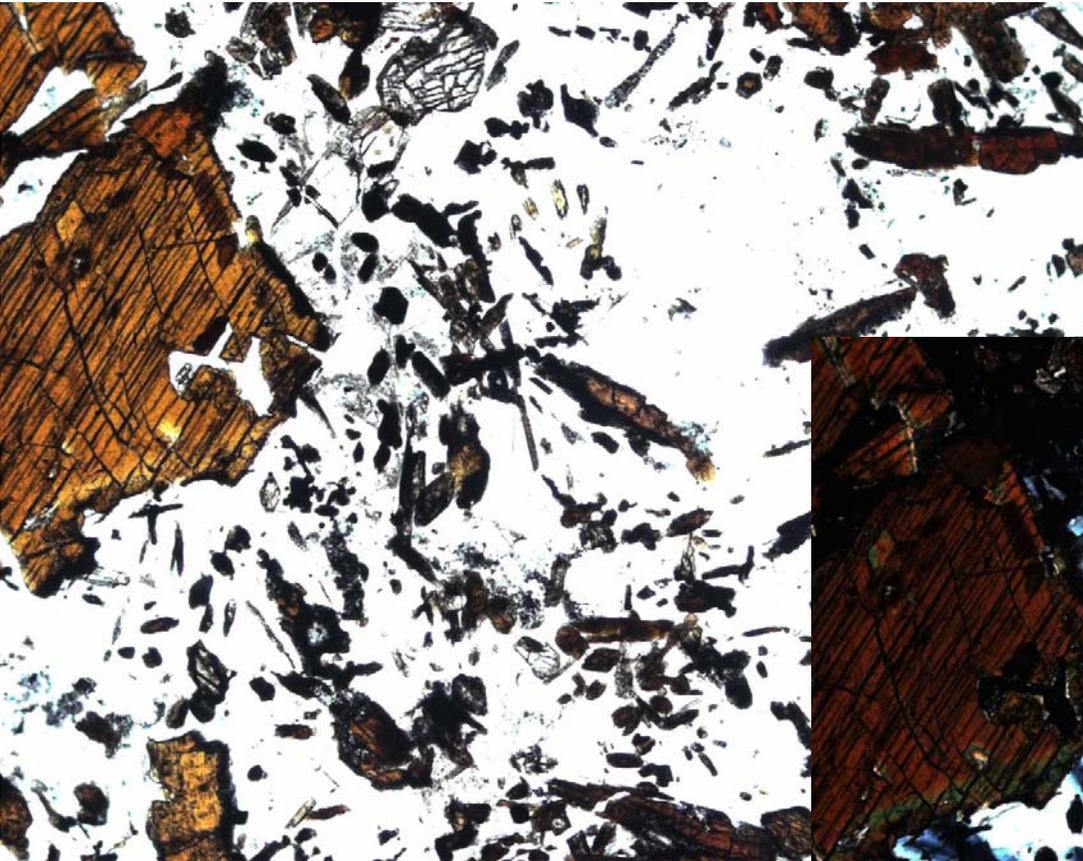
При 1
николе



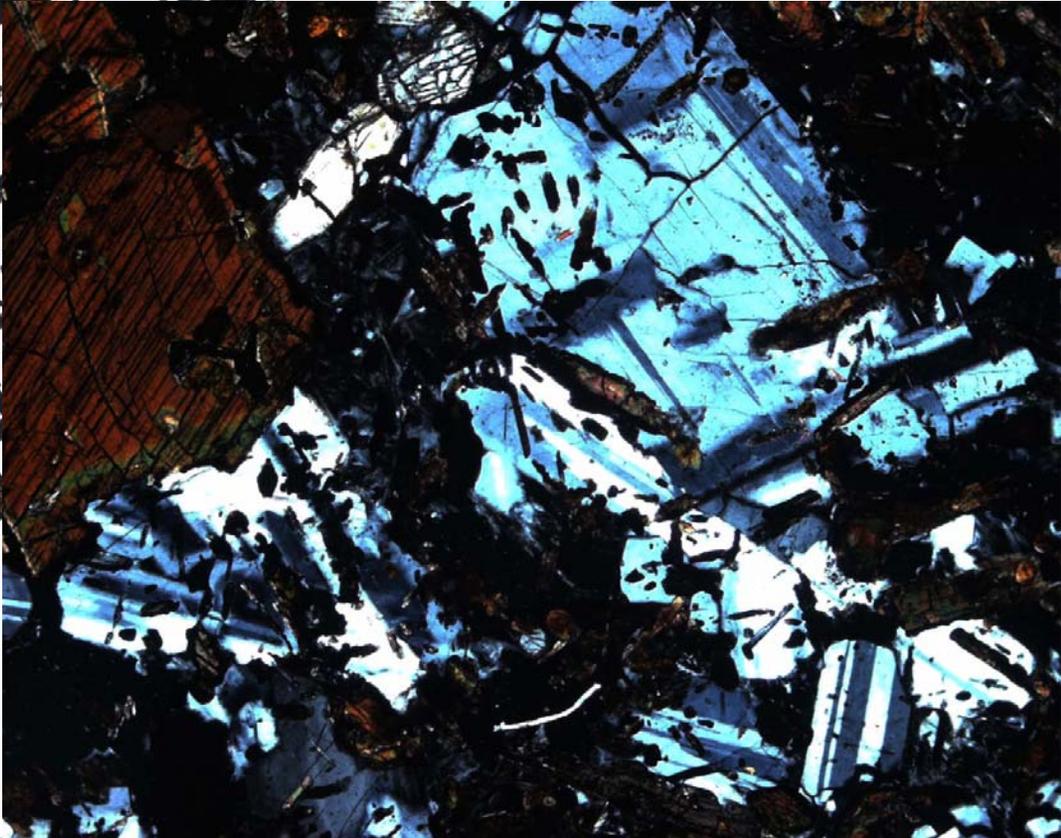
Николи х

Керсутитовые лампрофиры. Дайка в щелочных гранитах.
Интрузив Чека. Южный Урал

Магматические Na-Ca амфиболы. Керсутит



При 1
николе



Николи X

Керсутитовые эссекситы (габброиды повышенной щёлочности).
Кузнецкий Алатау

Моноклинные амфиболы - щелочные натриевые и калиевые

алюмобарруазит	$\square \text{NaCa}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2 [\text{AlSi}_7\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
барруазит	$\square \text{NaCa}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3\text{AlFe}^{3+} [\text{AlSi}_7\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
ферробарруазит	$\square \text{NaCa}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_3\text{AlFe}^{3+} [\text{AlSi}_7\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
винчит	$\square \text{NaCa}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti}) [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
тарамит	$(\text{Na}, \text{K}) \text{NaCa}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_3(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Ti})_2 [\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
магнезиокатофорит	$\text{Na} \text{NaCa}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti}) [\text{AlSi}_7\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$
катофорит	$(\text{Na}, \text{K}) \text{NaCa}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_4(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Ti}) [\text{AlSi}_7\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$
рихтерит	$(\text{Na}, \text{K}) \text{NaCa}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})_5 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$
фторкал. рихтерит	$\text{K} \text{NaCa}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Ti})_5 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{F}, \text{OH})_2$
глаукофан	$\square \text{Na}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
магнезиорибекит	$\square \text{Na}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3\text{Fe}^{3+}_2 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$
рибекит	$\square \text{Na}_2\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}_2 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$
экерманит	$(\text{Na}, \text{K}) \text{Na}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}) [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$
арфведсонит	$(\text{Na}, \text{K}) \text{Na}_2\text{Fe}^{2+}_4\text{Fe}^{3+} [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$
обертиит	$\text{Na} \text{Na}_2 \text{Mg}_3\text{Fe}^{3+}\text{Ti} [\text{Si}_8\text{O}_{22}]\text{O}_2$
ликит	$(\text{Na}, \text{K}) \text{Na}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2\text{Fe}^{3+}_2\text{Li} [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$
козулит	$(\text{Na}, \text{K}) \text{Na}_2(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_4(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}) [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$
унгареттиит	$(\text{Na}, \text{K}) \text{Na}_2(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})_2(\text{Mn}^{3+}, \text{Fe}^{3+})_3 [\text{Si}_8\text{O}_{22}]\text{O}_2$

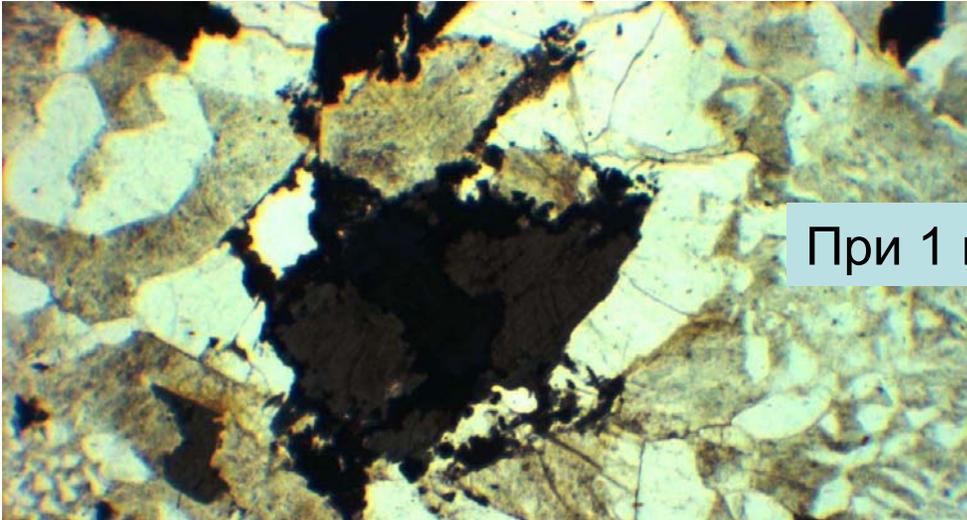
Моноклинные амфиболы - щелочные натриевые и калиевые

Стандартный тренд кристаллизации магматических щелочных амфиболов: (тарамит) → катофорит → **рибекит** → **арфведсонит** со снижением содержаний Ca, Al, Mg, Ti и накоплением Na, K, Fe²⁺, Fe³⁺, Mn, Li, F, Zn, Zr. Рибекит и арфведсонит содержат соответственно ~ 50 и 45 % SiO₂, ~35 % FeO+Fe₂O₃, ~ 10 и 15 % Na₂O (+K₂O). Многие магматические щелочные амфиболы содержат несколько %% титана, марганца, фтора, нередко до 1% и более лития, цинка, циркония.

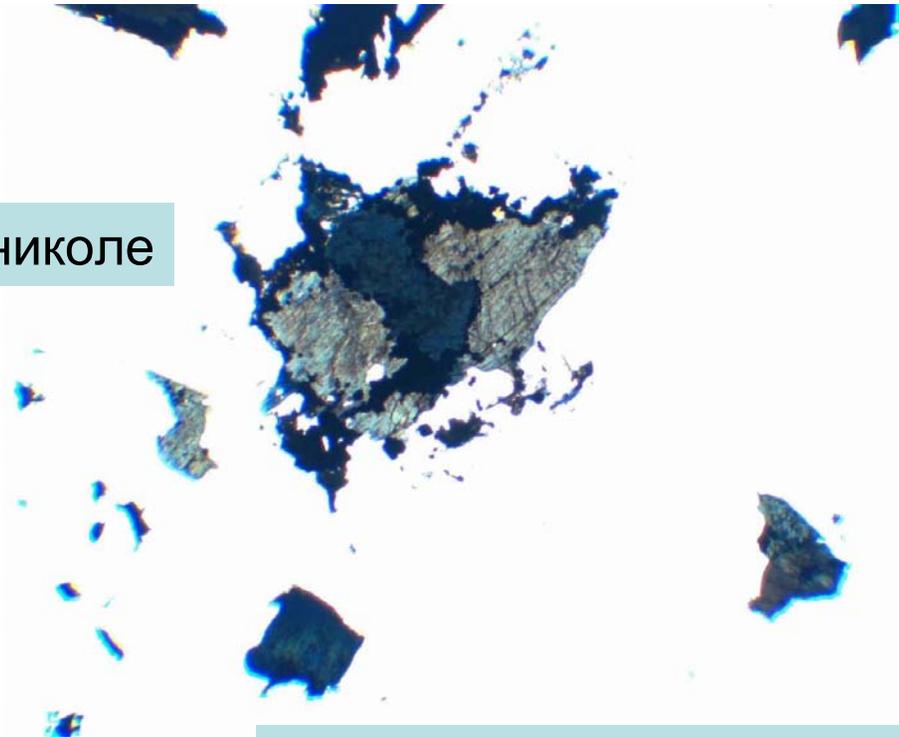
Поскольку в составе щелочных амфиболов много и двух- и трёхвалентного железа, окраска этих минералов варьирует от синей (для более магнезиальных – сине-голубая до голубой) через разнообразную зелёную до чернильно-синей, реально практически чёрной (не только макро, но даже в шлифах). Особо это характерно для рибекитов. Чтобы выявить их синюю – голубую «душу» нужен сильный источник света. Для щелочных амфиболов характерен интенсивный плеохроизм.

Макроскопически магматические породы с заметным количеством щелочных амфиболов, особенно тонко- и мелкозернистые такие, как гранит-порфиры, имеют отчётливый голубоватый цвет (или оттенок).

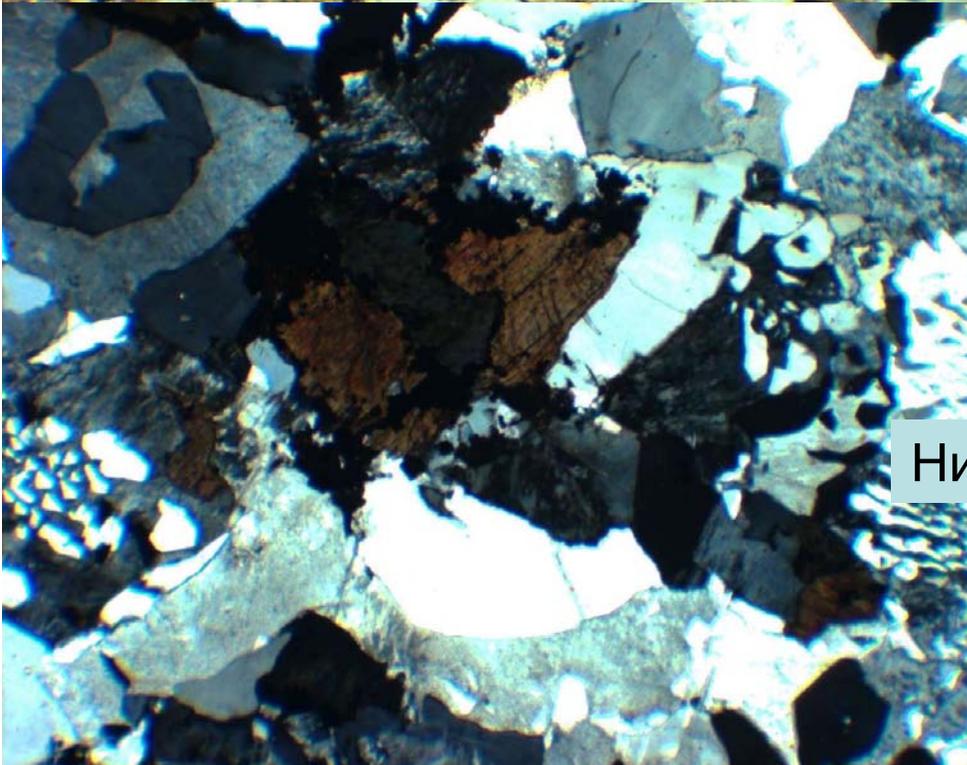
Магматич. щелочные амфиболы. Ті рибекит



При 1 николе



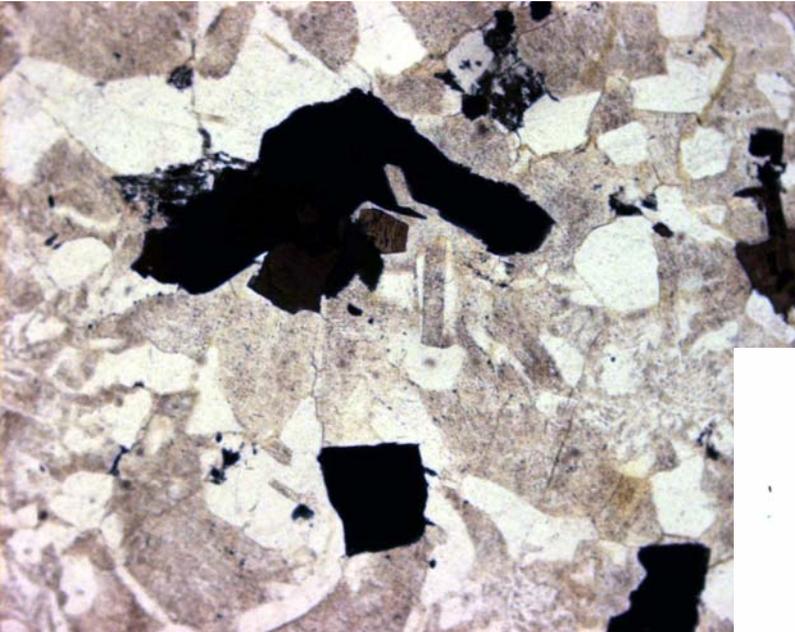
Интенсивное освещение.
Хорошо видны истинные
окраски и плеохроизм



Николи x

Щелочные граниты
интрузива Чека.
Южный Урал

Магматич. щелочные амфиболы. Ті рибекит



Стандартное освещение

Щелочные граниты интрузива Чека.
Южный Урал

При 1 николе



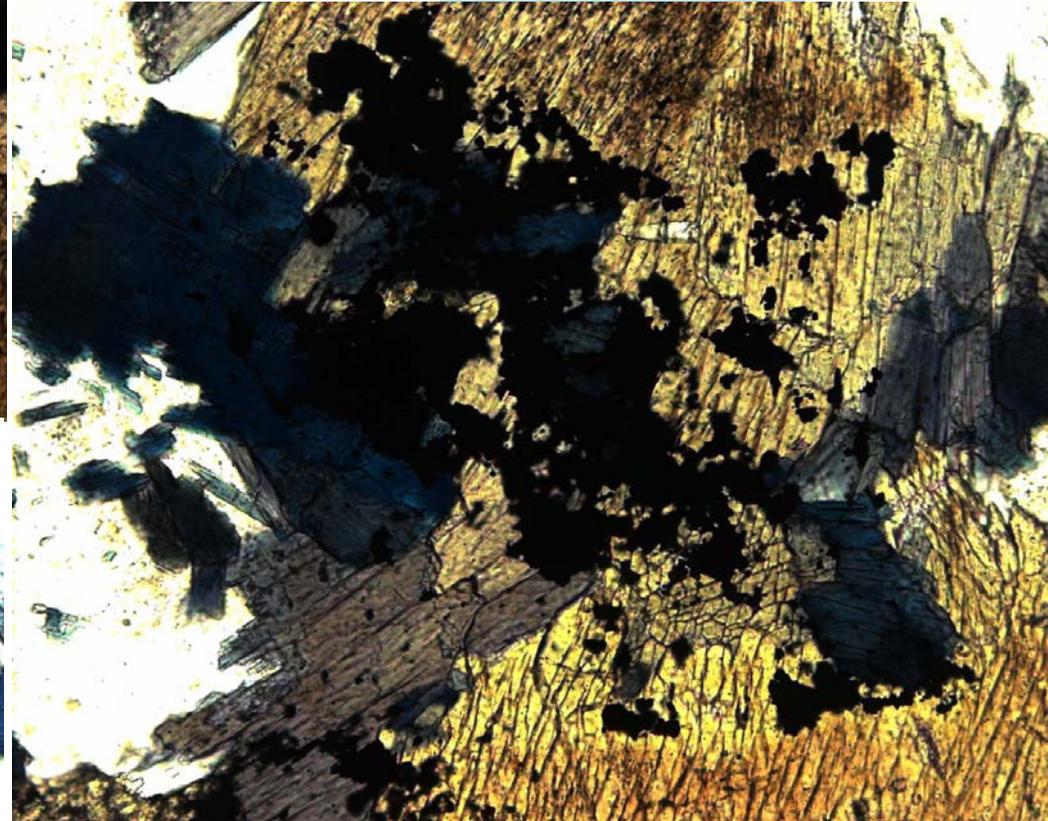
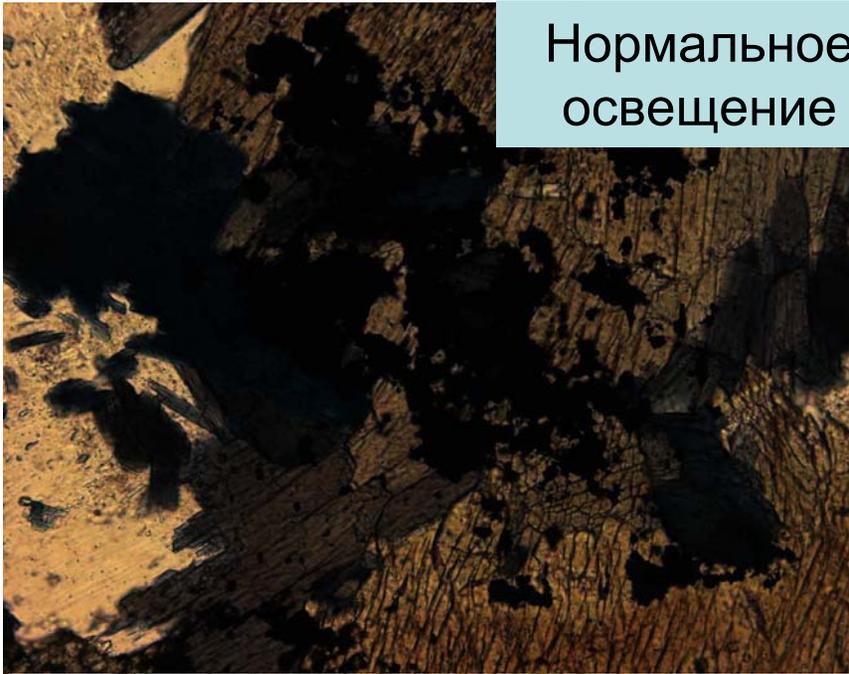
Более интенсивное и
наиболее интенсивное освещение.
Хорошо видны истинные
окраски и плеохроизм

Магматич. щелочные амфиболы. Ті рибекит

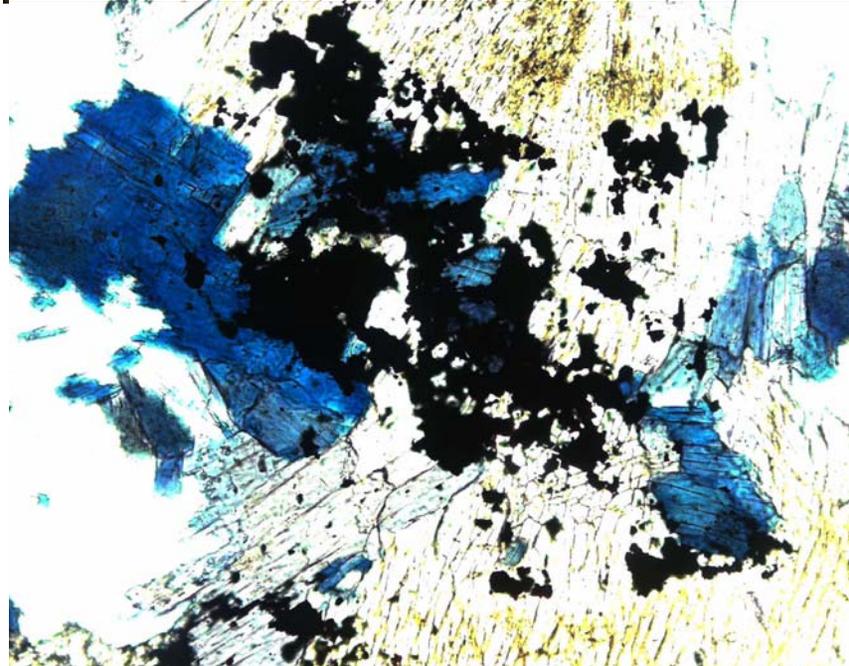
Нормальное
освещение

Щелочные граниты интрузива Чека.
Южный Урал

При 1 николе



Более интенсивное и наиболее
интенсивное освещение. Хорошо видны
истинные окраски и плеохроизм



Магматич. щелочные амфиболы. Ті рибекит

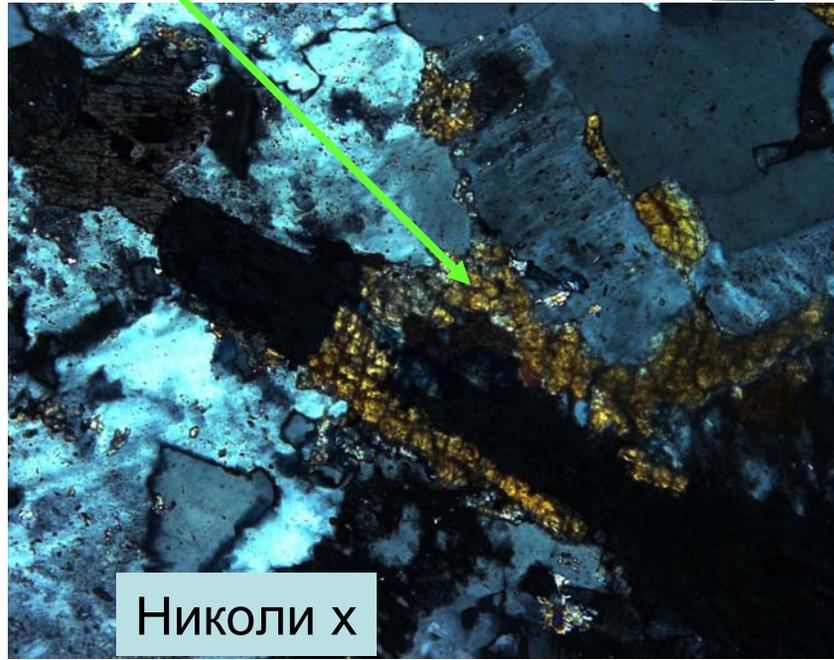
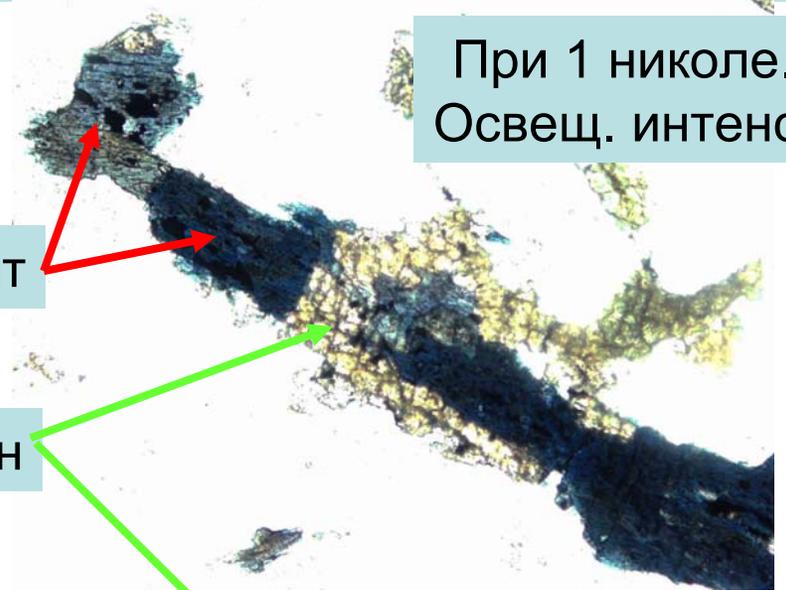
Щелочные граниты интрузива Чека

При 1 николе.
Освещ. интенс.

Рибекит

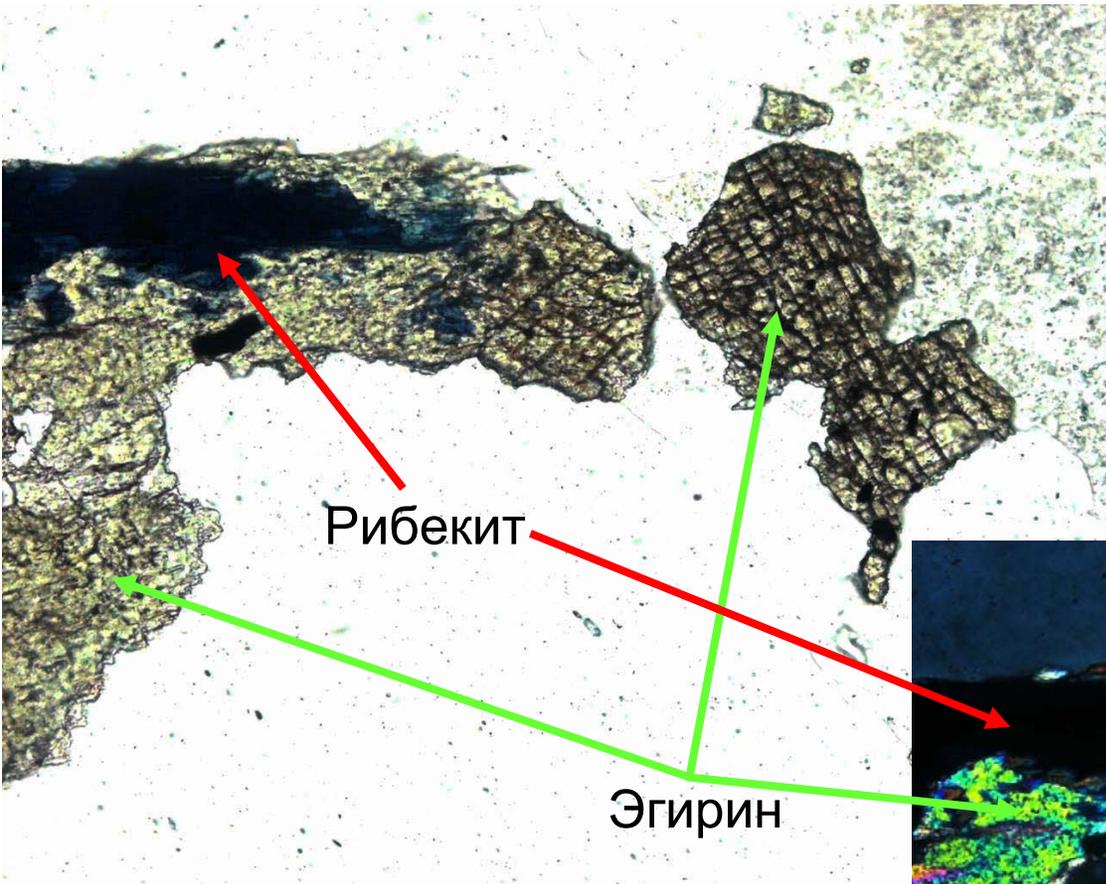
Эгирин

Николи х



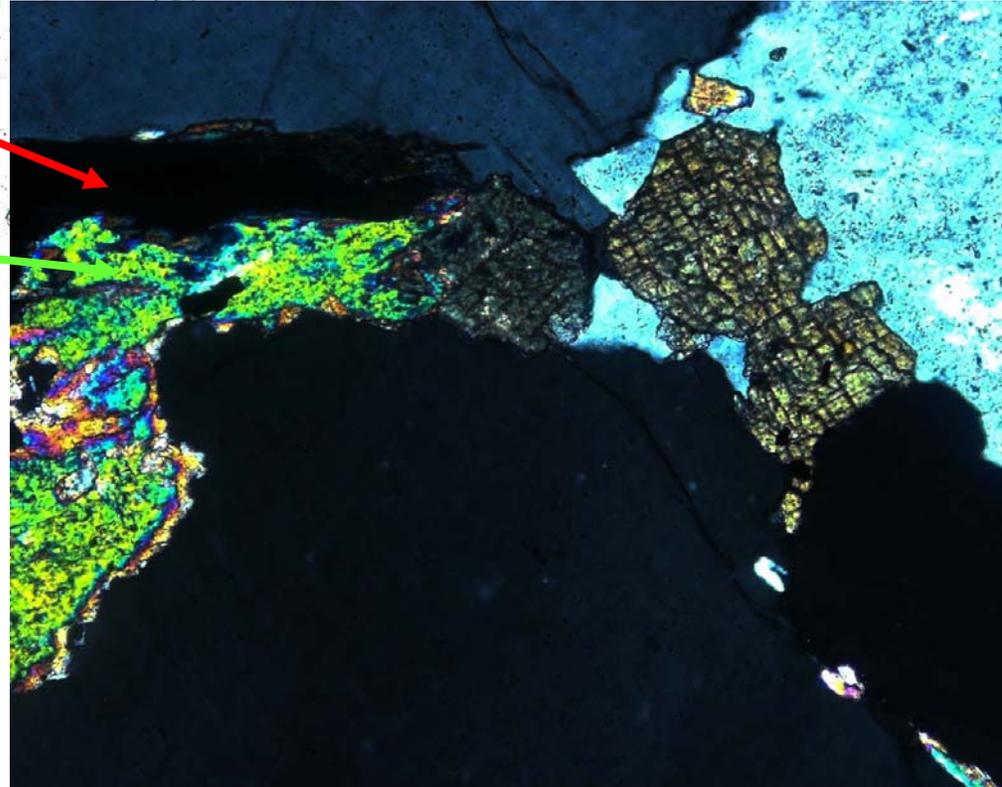
Магматич. щелочные амфиболы. Ті рибекит

Щелочные граниты
интрузива Чека



При 1 николе.
Освещение усилено

Николи х



Параметры устойчивости рибекита и эгирина

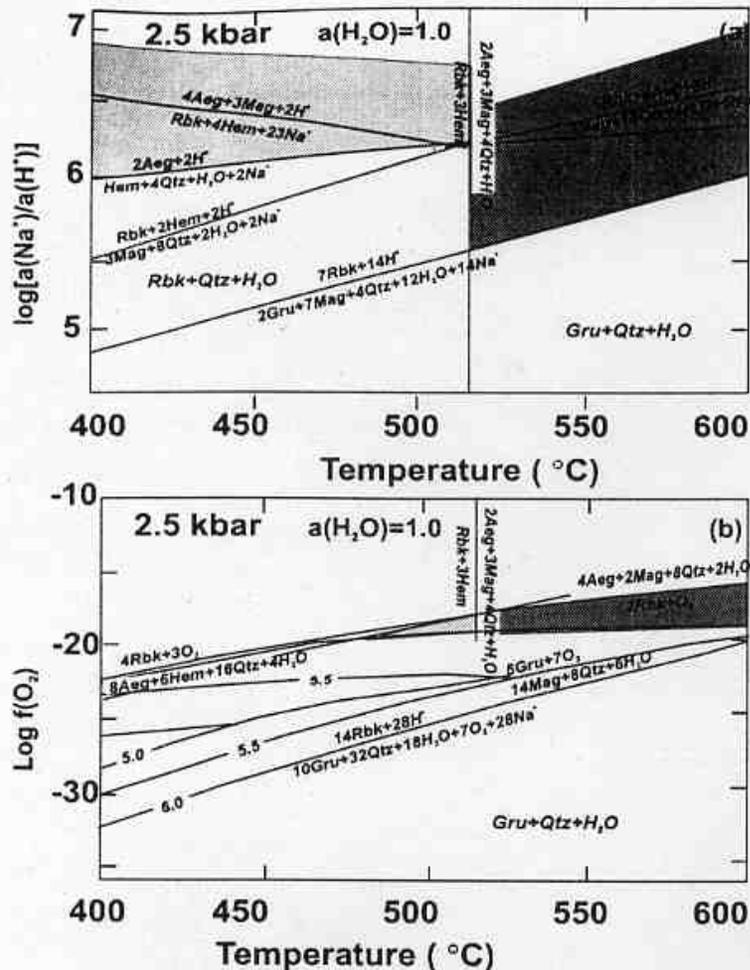
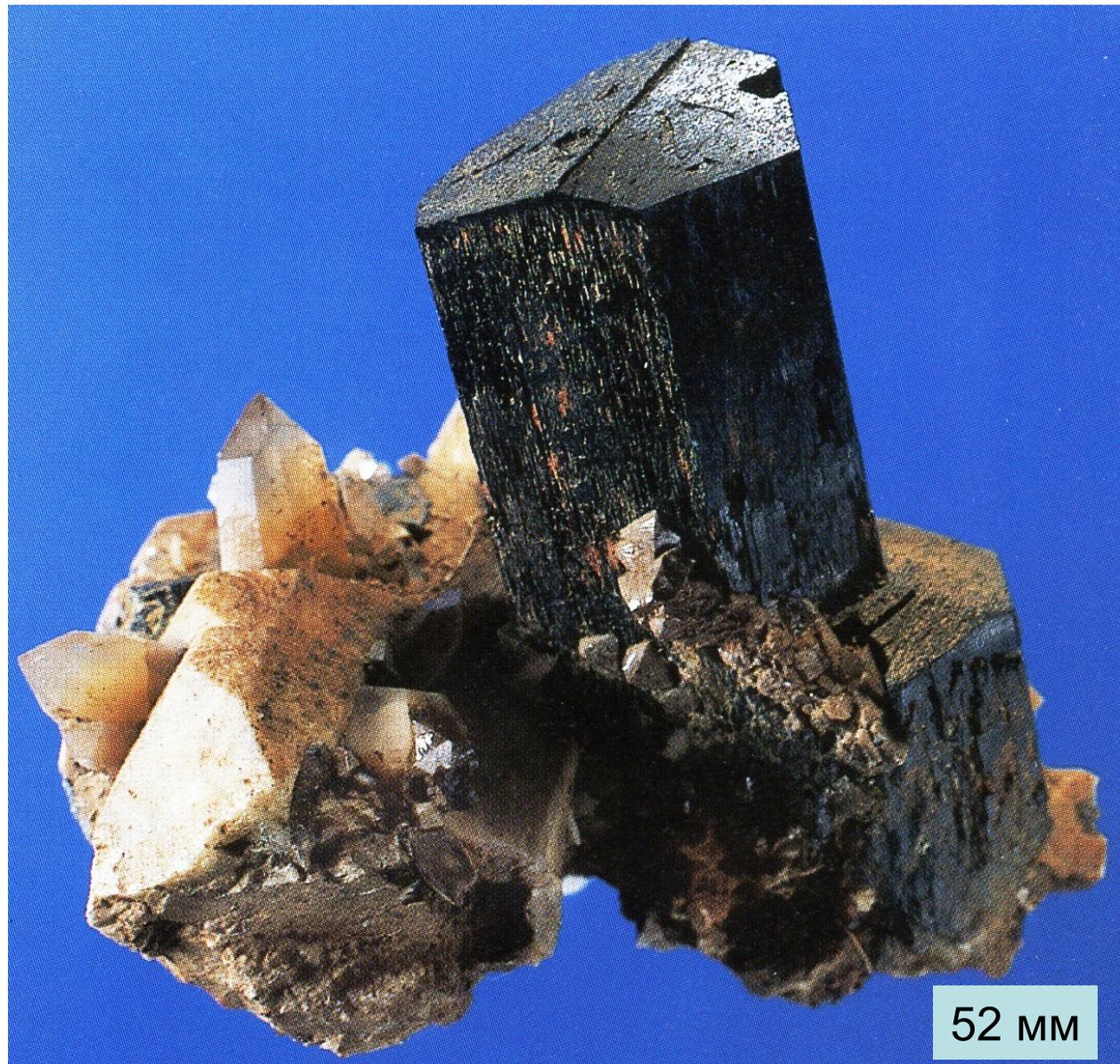


Рис. 6. Поля устойчивости рибекит и эгирин-содержащих парагенезисов на диаграммах в координатах: а) $\text{Log}[a(\text{Na}^+)/a(\text{H}^+)] - T$ $^{\circ}\text{C}$ - серой заливкой показана область стабильности парагенезиса $\text{Aeg} + \text{Mag} + \text{Hem} + \text{Rbk} + \text{H}_2\text{O}$, темно-серой заливкой показана область стабильности парагенезиса $\text{Qtz} + \text{Aeg} + \text{Rbk} + \text{Mag} + \text{H}_2\text{O}$; б) $\text{Log } f(\text{O}_2) - T$ $^{\circ}\text{C}$ - серой заливкой показана область стабильности парагенезиса $\text{Rbk} + \text{Aeg} + \text{Hem} + \text{Qtz}$, темно-серой заливкой показана область стабильности парагенезиса $\text{Rbk} + \text{Aeg} + \text{Mag} + \text{Qtz}$, рассчитанных при давлении 2.5 кбар и $a(\text{H}_2\text{O}) = 1.0$ по [18].

Магматич. щелочные амфиболы.

Арфведсонит



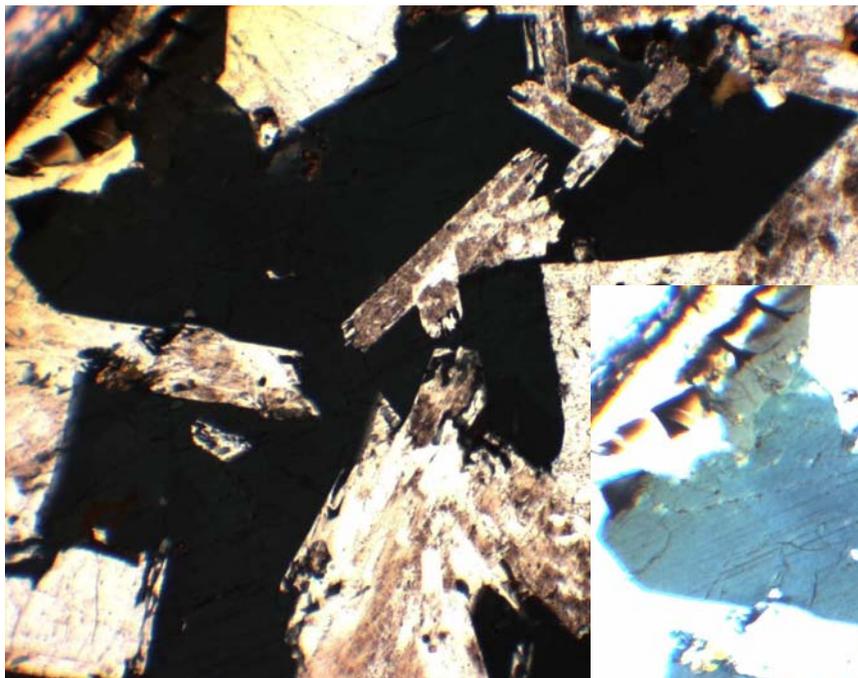
С кварцем,
микроклином,
цирконом.

Пегматиты
щелочных гранитов.

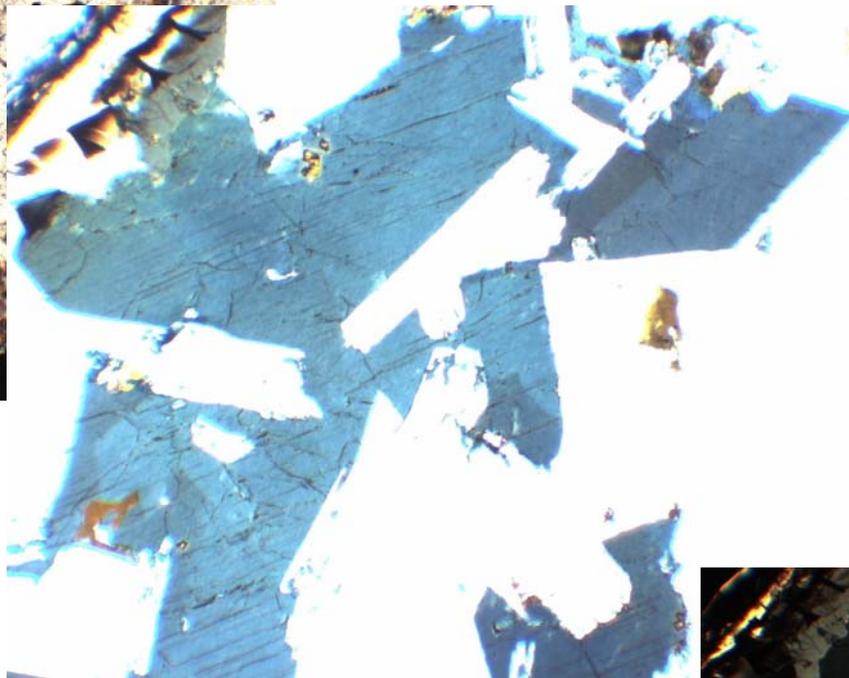
Malosa, Малави

Магматич. щелочные амфиболы. Арфведсонит

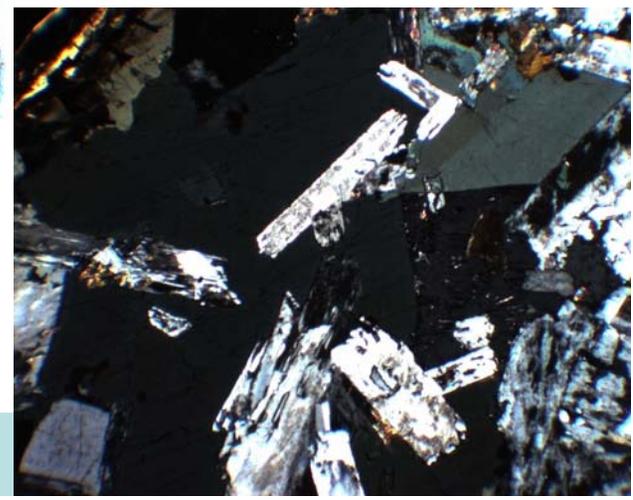
Щелочные сиениты
Ilude Los Huma



При 1 николе.
Освещение
нормальное



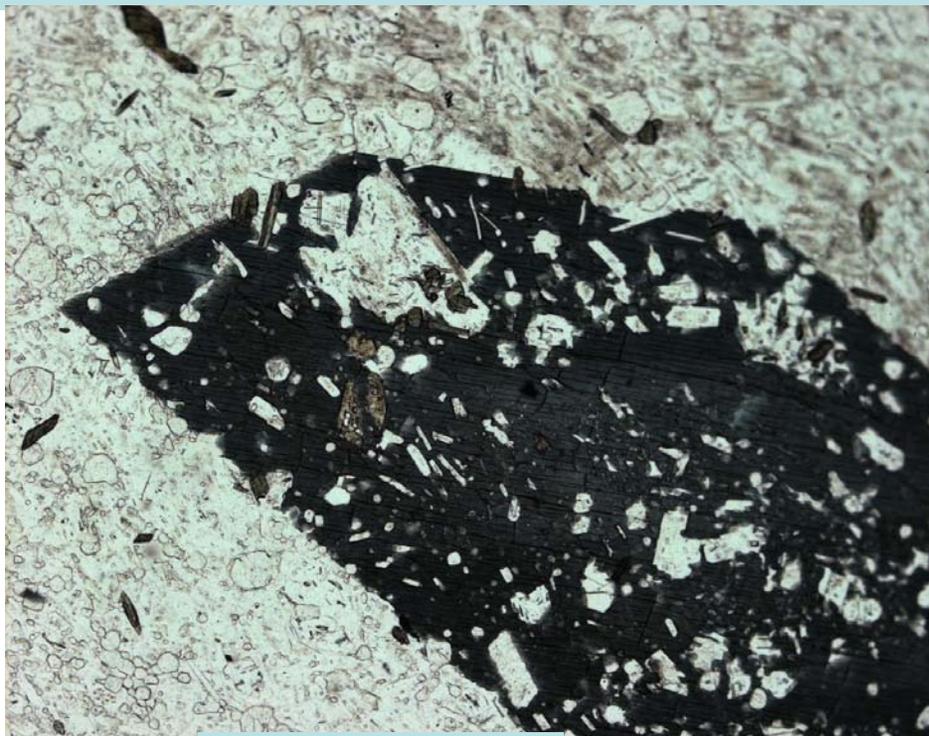
При 1 николе.
Освещение резко
усилено



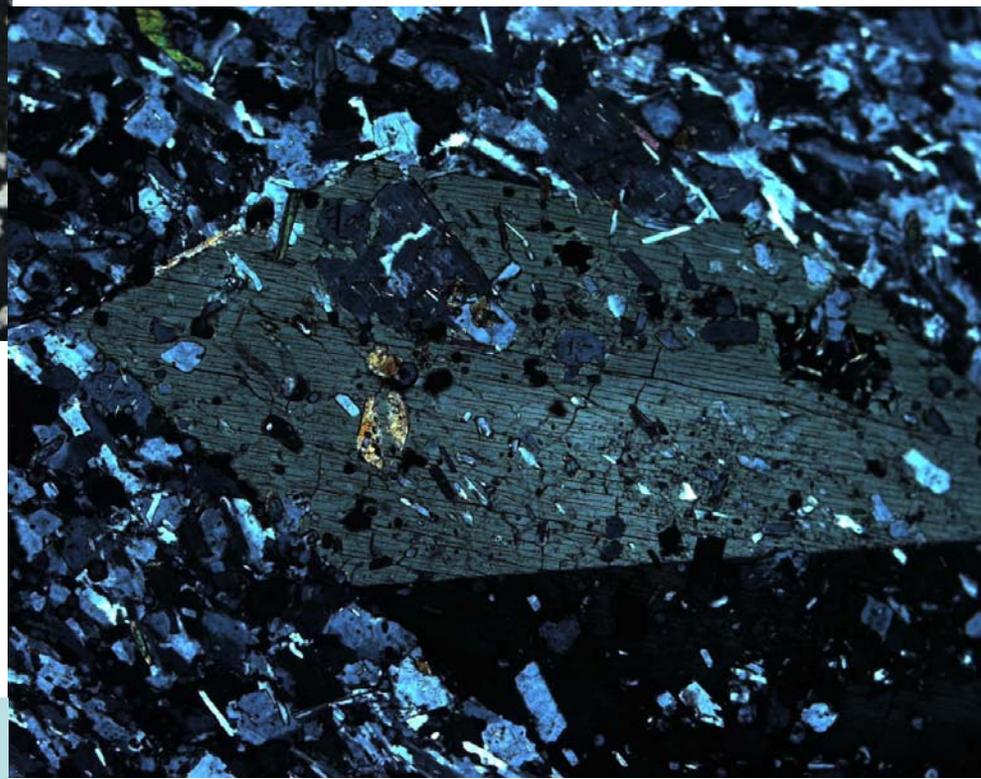
Николи x

Магматич. щелочные амфиболы. Арфведсонит

Пойкилокристалл позднемагматического зонального арфведсонита.
Какортokitы – богатые эвдиалитом щелочные сиениты. Ловозеро



При 1 николе



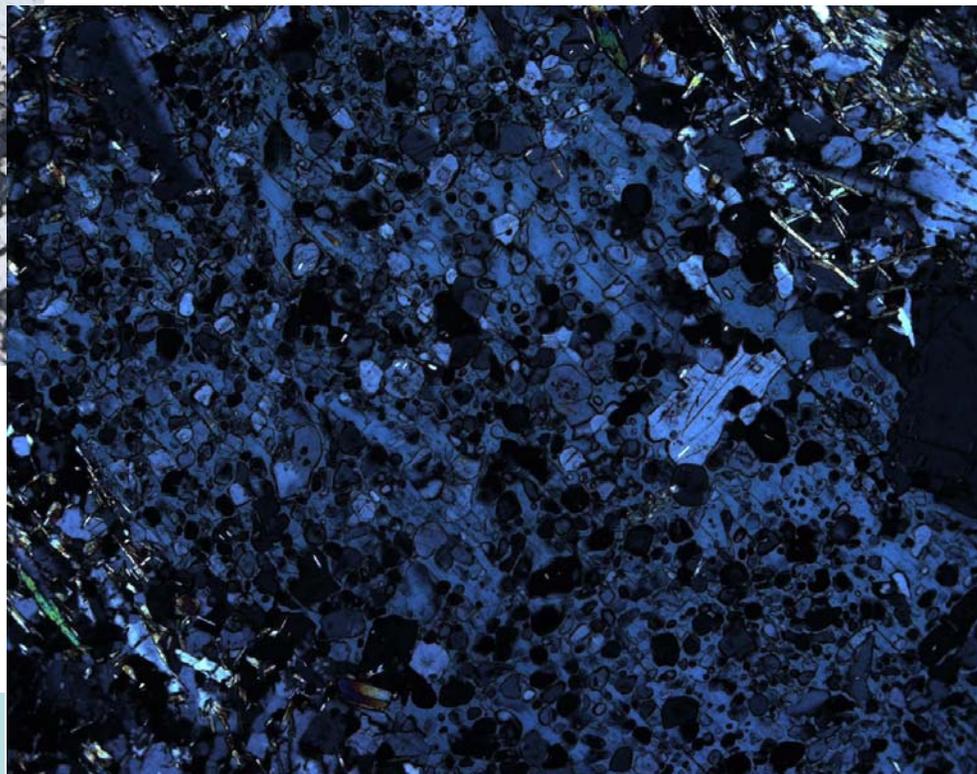
Николи х

Магматич. щелочные амфиболы. Арфведсонит

Пойкилокристалл позднемагматического арфведсонита.
Какортокиты – богатые эвдиалитом щелочные сиениты. Ловозеро



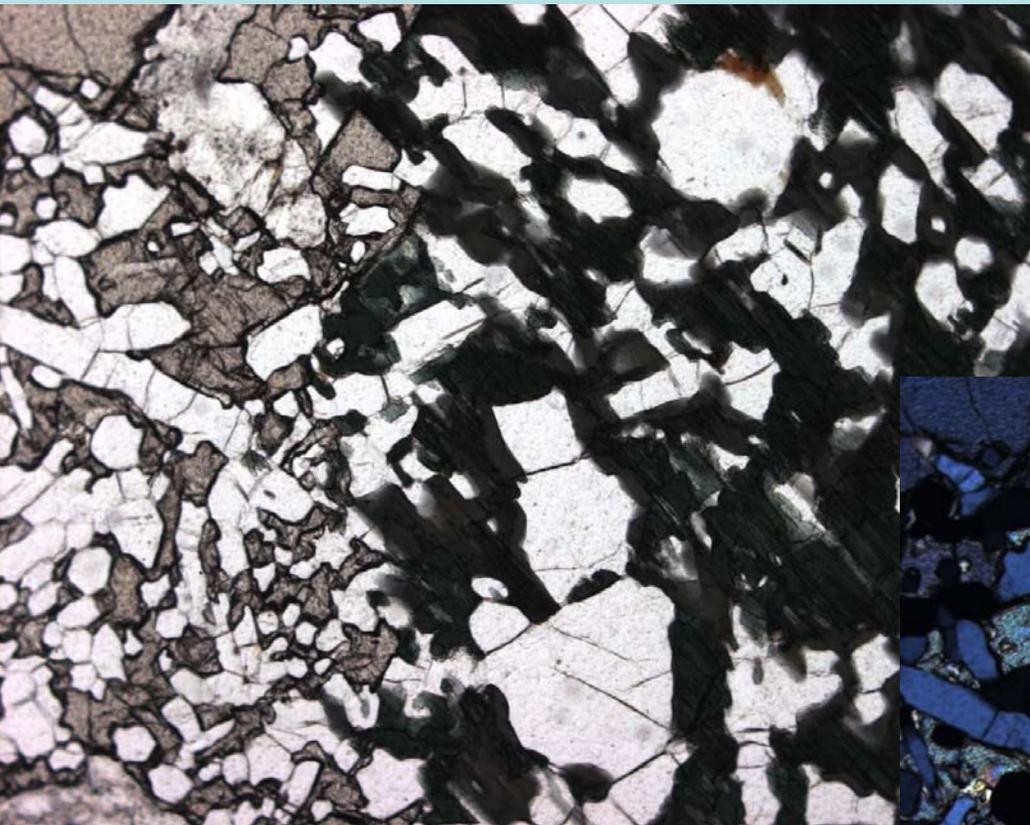
При 1 николе



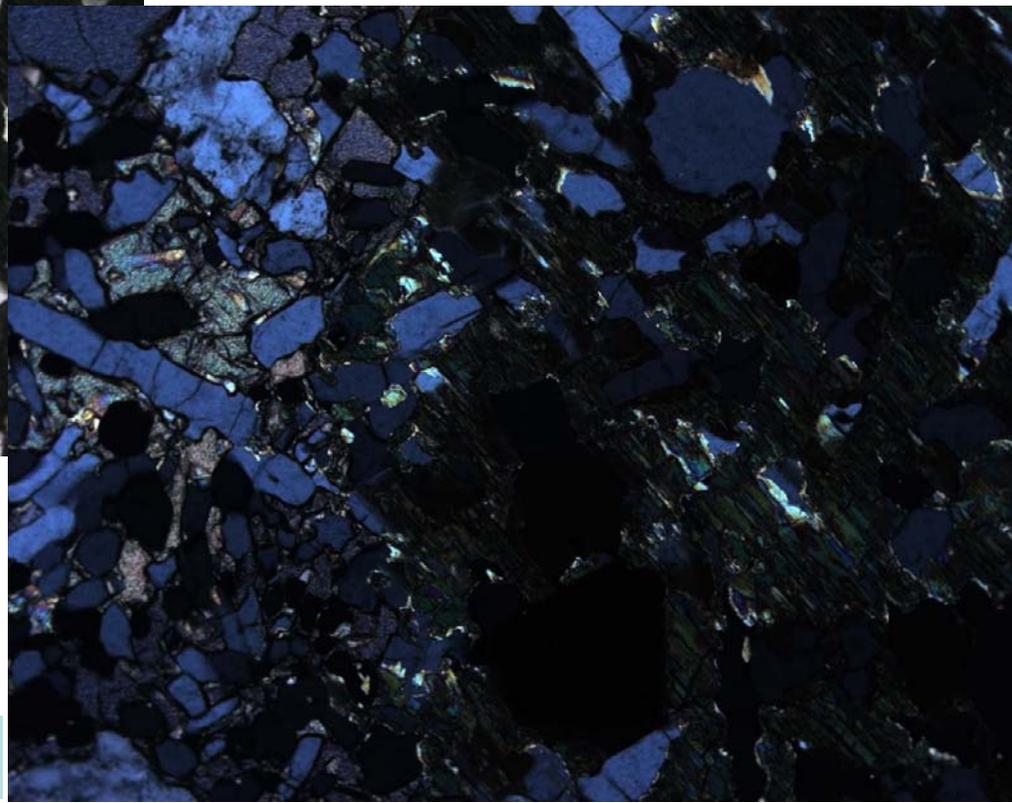
Николи х

Магматич. щелочные амфиболы. Арфведсонит

Пойкилокристалл позднемагматического арфведсонита
в титанит-апатитовых породах. Хибины



При 1 николе



Николи х

Магматические амфиболы

$Mg^{2+} \rightarrow Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} \rightarrow Zn^{2+}$

$Ca+Na \rightarrow Na+Ca \rightarrow Na \rightarrow Na+K (Li)$

Индикаторы степени дифференциации

(= щёлочности, степени алкаитности) :

железистость, $Na+K/Ca+Na+K$, Fe^{3+}/Al , Ti, Mn, Li, F, Zr, Zn

Индикаторы $f O_2$ – железистость, Fe^{3+}

Индикаторы T – магнезиальность, Ti, Al_{Σ} , Ca !!

Индикатор глубинности – Cr !!; содержание H_2O – магматические амфиболы, выросшие в пустотах вулканитов, - нередко безводные (обертиит...); в амфиболах при очень высоких давлениях Ti может замещать Si (таков мантийный фторкалиевый рихтерит)

Амфиболы высокоT метасоматитов (скарны...)

нередко обогащены хлором.

Камчатка. Беседуют красноногие говорушки

