

**Признаки наложенного  
метаморфизма руд в  
месторождениях  
Пеллапахк-Оленинского  
рудного узла**

*Калинин А.А., Савченко Е.Э.,  
Геологический институт КНЦ РАН*

Сульфидный анатексис, то есть частичное плавление сульфидной минерализации при метаморфизме рудоносных пород – это сравнительно редкое явление, которое ранее было описано в рудах некоторых полиметаллических и золоторудных месторождений, метаморфизованных в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций, в частности, в Брокен Хилл в Австралии (*Frost et al., 2002*), Блэйквассли в Норвегии (*Vokes, 1971*), Хемло в Канаде (*Tomkins et al., 2004; 2006*).

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															



lithophile element



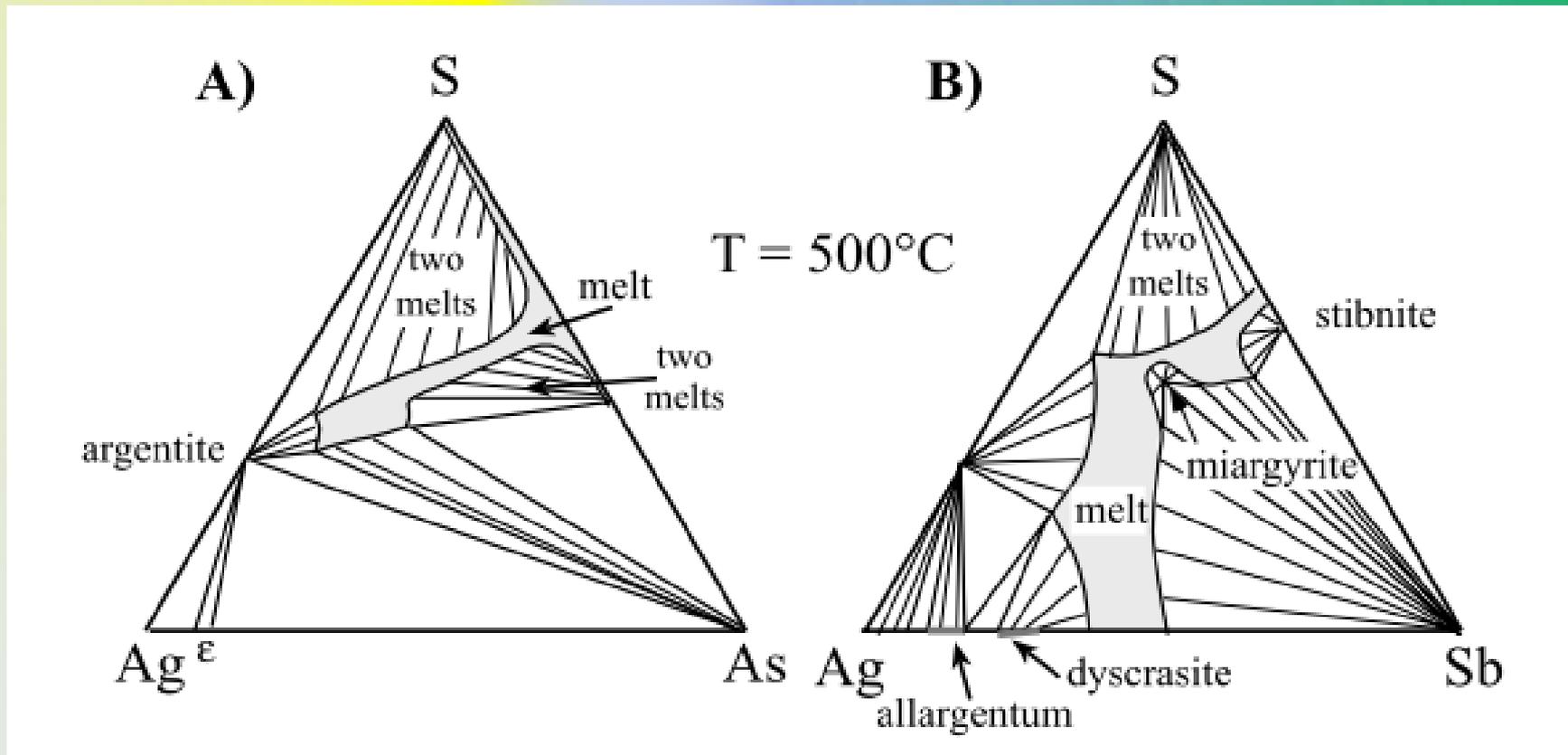
siderophile element



chalcophile element

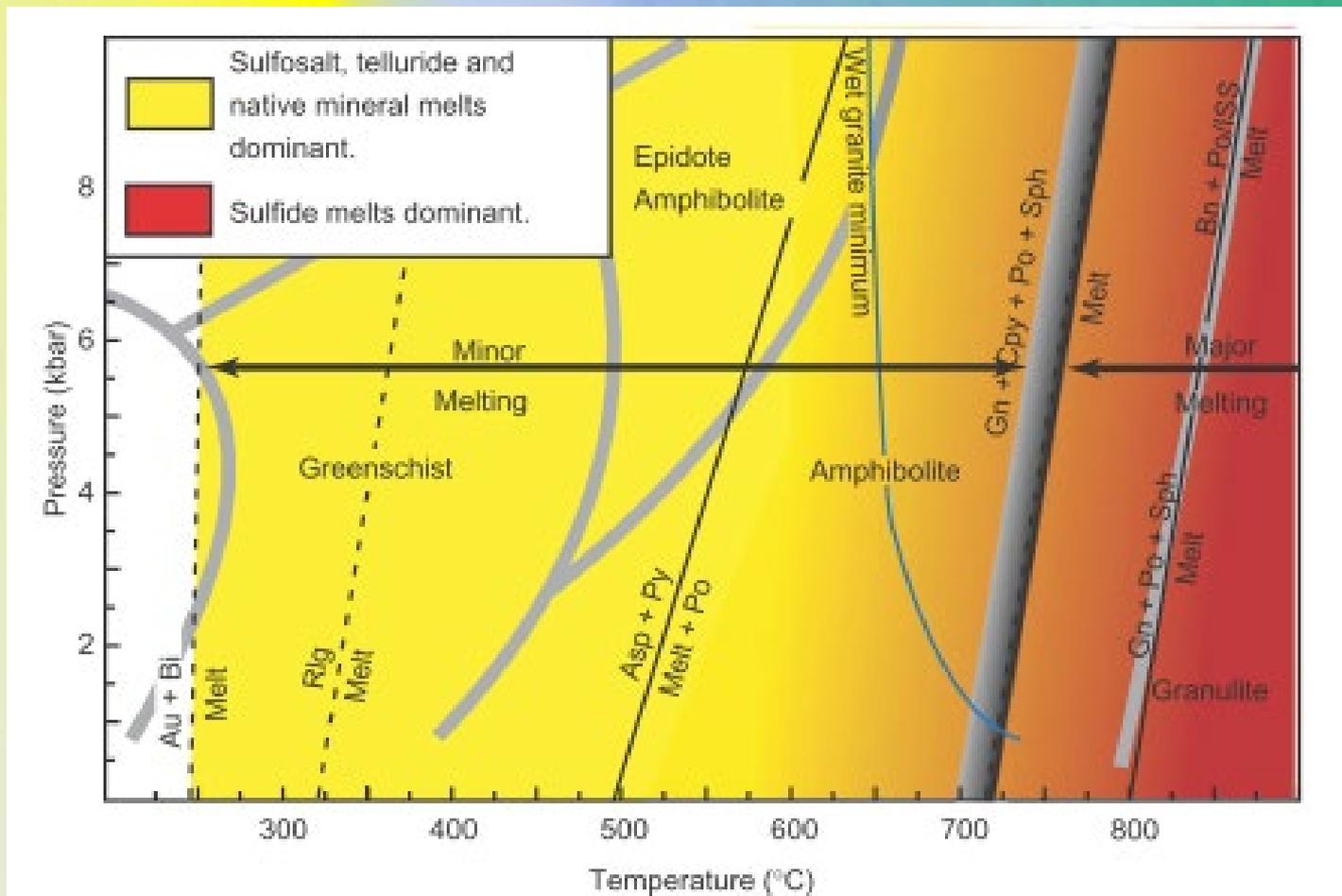
lanthanides	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
actinides	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Наиболее низкие значения температуры плавления характерны для сульфидов, в состав которых входят халькофильные металлы цинк, галлий, серебро, кадмий, индий, ртуть, таллий, свинец, мышьяк, сурьма, висмут, селен и теллур (выделены красным) (Tomkins et al., 2006).



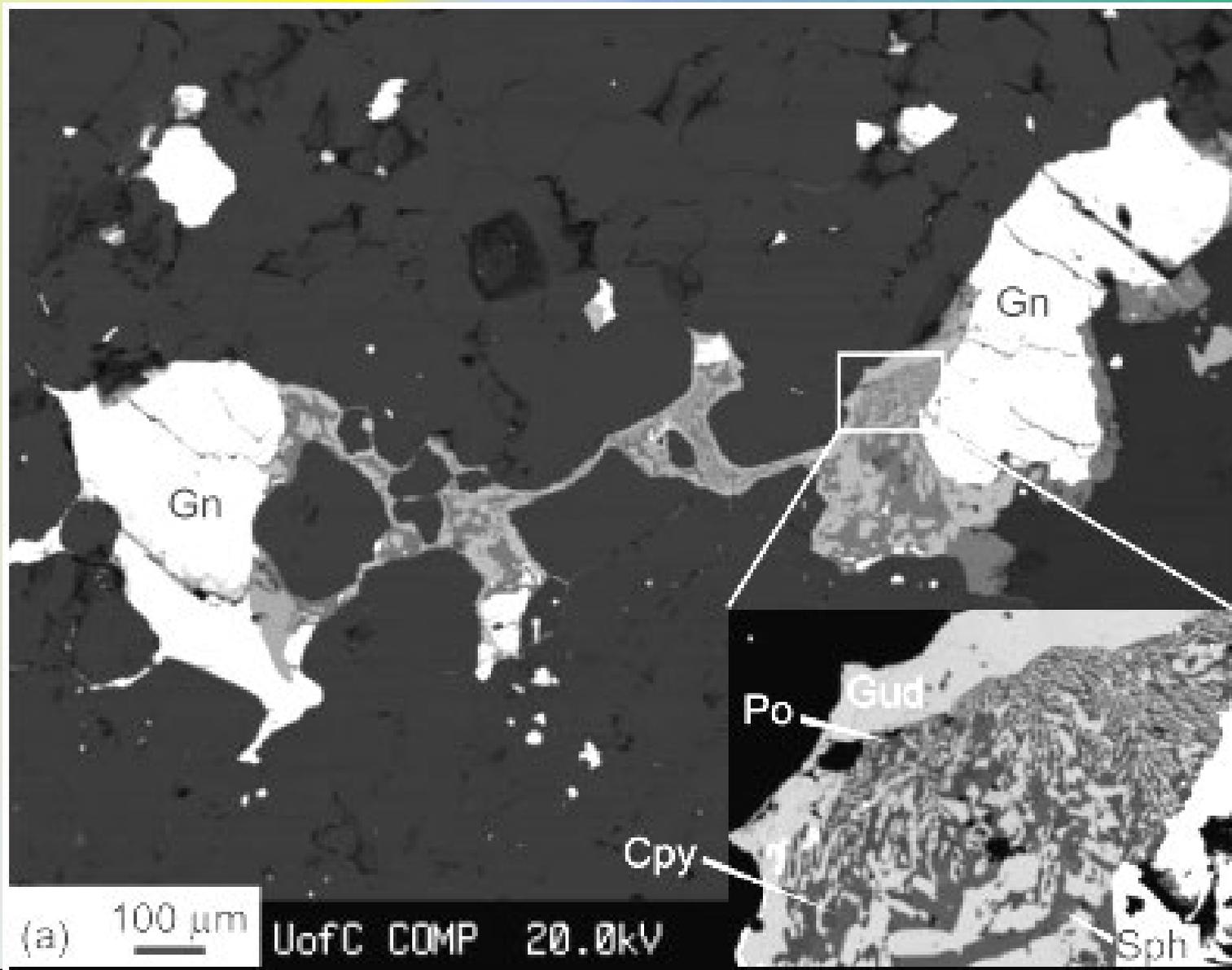
Для примера: фазовые взаимоотношения в системах Ag-As-S и Ag-Sb-S при 500°C (Frost et al., 2002)

Проявление сульфидного анатексиса связано с тем, что температура плавления в сульфидных системах ниже, чем в силикатных.

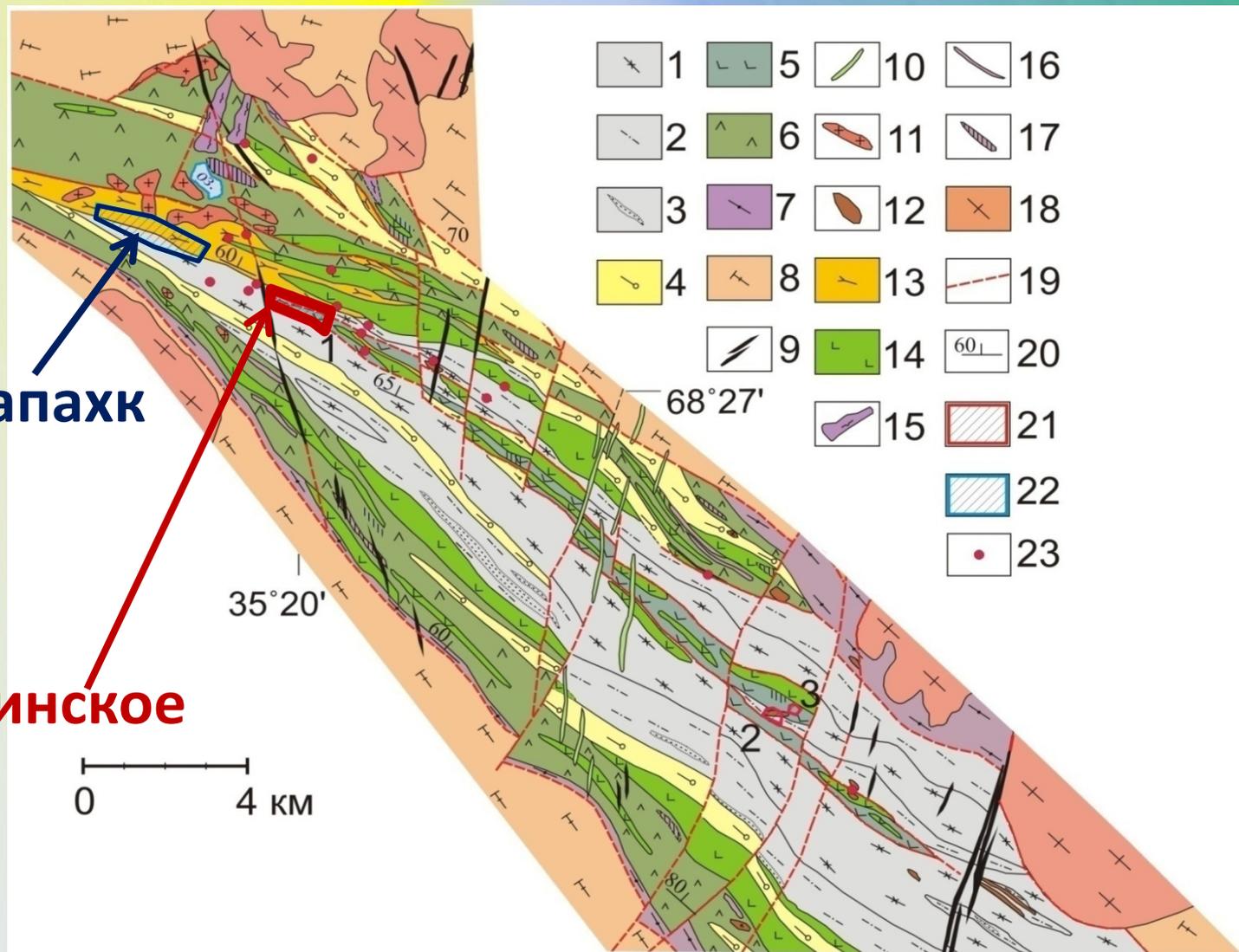


P-T диаграмма, показывающая условия начала плавления в системах с участием сульфосолей, теллуридов и самородных металлов (желтое) и сульфидов (красное) (по Tomkins et al., 2006)

Пример продукта кристаллизации сульфидного расплава в рудах месторождения Брокен Хилл, Австралия (Tomkins et al., 2006) (тонкое срастание пирротина, халькопирита, гудмундита, сфалерита)



Месторождение золота Оленинское расположено в северо-западной части пояса на участке северо-западного выклинивания амфиболитов оленинской толщи, а рудопроявление Пеллапахк (Cu, Mo) – к западу от него в 2 км



Пеллапахк

Оленинское



История регионального метаморфизма пояса Колмозеро-Воронья включает два этапа – неоархейский и палеопротерозойский (Прияткина, Дагелайский, 1965, Беляев и др., 1977, Беляев, Петров, 2002). Региональный метаморфизм раннего этапа (2.77–2.68 млрд. лет) проходил в условиях низкотемпературной субфации амфиболитовой фации пониженного давления при температуре около 600°С и давлении 3-4 кбар (Другова и др., 1982). На регрессивной стадии раннего этапа метаморфизма формировались метасоматиты фаций кислотного выщелачивания и сопряженного с ним железо-магнезиально-кальциевого метасоматоза (Другова и др., 1982, Глебовицкий, Бушмин, 1983). Минеральные ассоциации метасоматитов указывают на близкие к пику метаморфизма значения температуры и давления (в среднем  $T=550^{\circ}\text{C}$  и  $P=3.3$  кбар) (Другова и др., 1982). К метасоматически измененным породам приурочена золото-серебряная минерализация на Оленинском месторождении и медно-молибденовая минерализация на порфирировом рудопроявлении Пеллапахк.

Поздний палеопротерозойский этап метаморфизма (1.9–1.8 млрд. лет) (Другова и др., 1982) также относится к амфиболитовой фации и характеризуется пониженной по сравнению с ранним этапом температурой, в среднем 530°C, и повышенным давлением 5.5 кбар. В породах, претерпевших метаморфизм кианит-силлиманитового типа, развиваются параморфозы кианита по андалузиту, частично перекристаллизовываются слюды, изменяется состав внешних кайм порфиробласт граната, а кордиерит замещается мелкозернистым агрегатом ставролита и хлорита (Другова и др., 1982, Петров и др., 1984).

Имеющиеся геологические, минералогические наблюдения и геохронологические данные не позволяют однозначно определить время формирования минерализации, поскольку указывают на связь оруденения как с ранним, так и с поздним этапом регионального метаморфизма.

О неоархейском возрасте региональных рудоносных метасоматитов говорят наблюдения (Глебовицкий, Бушмин, 1983), а также определение возраста по циркону из ставролит-кордиеритовых метасоматитов, вмещающих южную зону Оленинского рудопроявления  $2629 \pm 64$  млн. лет U-Pb (SHRIMP-II) (Астафьев, Воинова, 2011).

Как на Оленинском месторождении, так и на рудопроявлении Пеллапахк видно, что рудоносные метасоматиты секутся жилами гранитных редкометалльных пегматитов, которые имеют возраст 2.45 млрд лет (Кудряшов и др., 2015).

**Жила пегматитов сечет амфиболиты с золоторудной минерализацией, что однозначно свидетельствует о допегматитовом - древнее 2.45 млрд лет - возрасте минерализации**

**Контакт пегматитовой жилы**

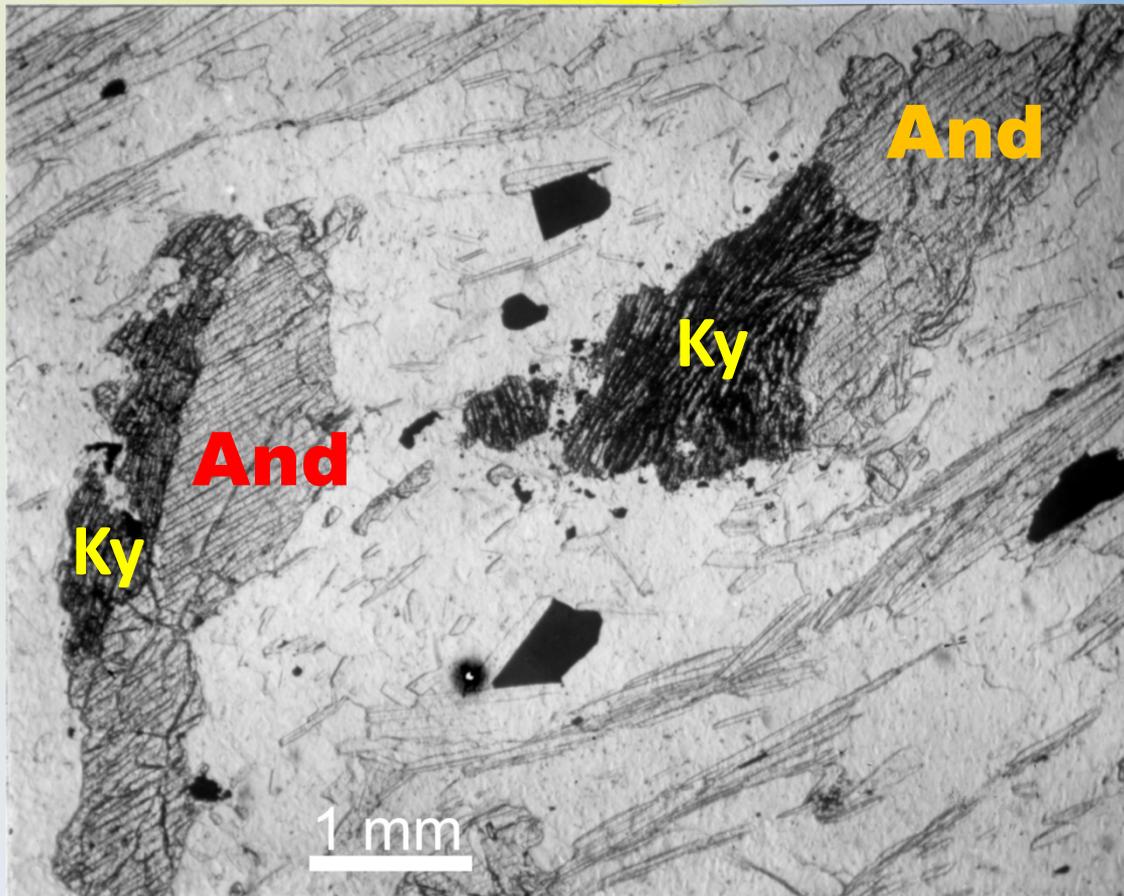
**150**

**Сланцеватость минерализованных амфиболитов**

**80**



В то же время, K-Ar методом по мусковиту из рудопроявлений Пеллапахк и Оленинское получены значения возраста  $1965 \pm 30$  и  $1930 \pm 30$  млн. лет соответственно (Волков, Новиков, 2002). Именно по краям чешуек и трещинам спайности в мусковите на рудопроявлении Пеллапахк наиболее часто развивается молибденит (Калинин, Галкин, 2012).

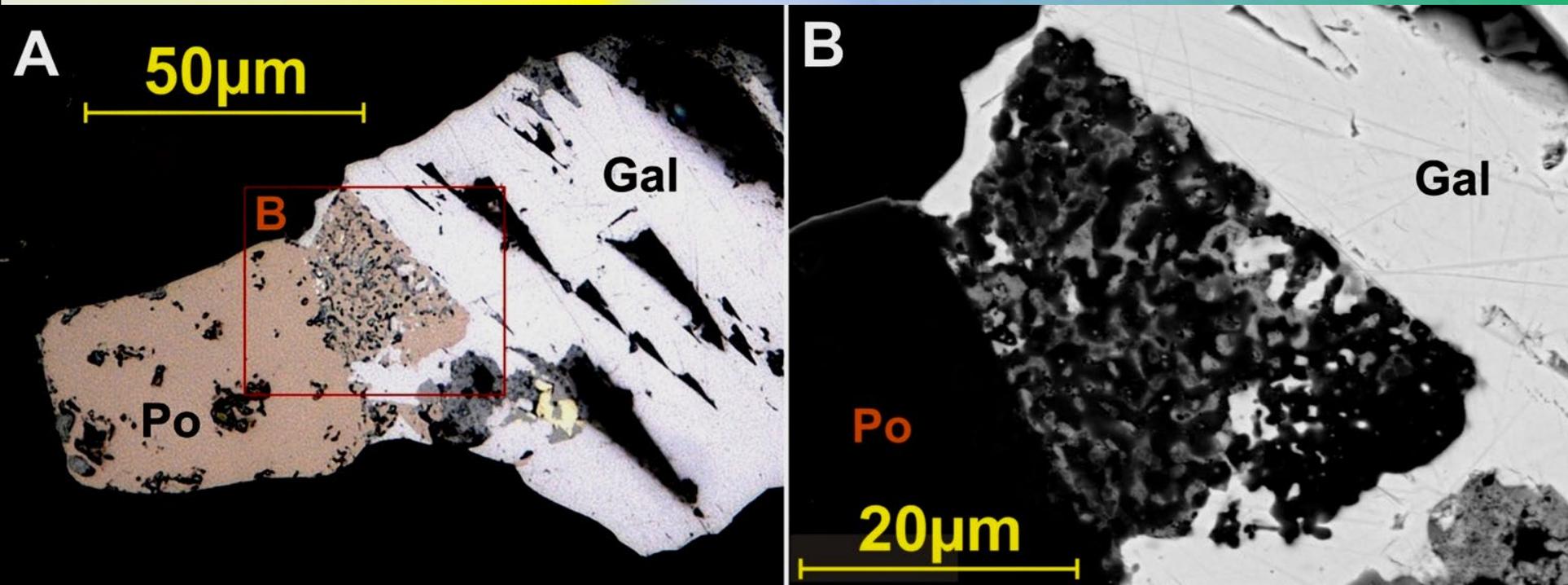


Параморфозы кианита (развивавшегося на позднем этапе метаморфизма) по андалузиту насыщены вкрапленностью халькопирита, при том, что в андалузите таковая отсутствует.

Фото шлифа,  
без анализатора

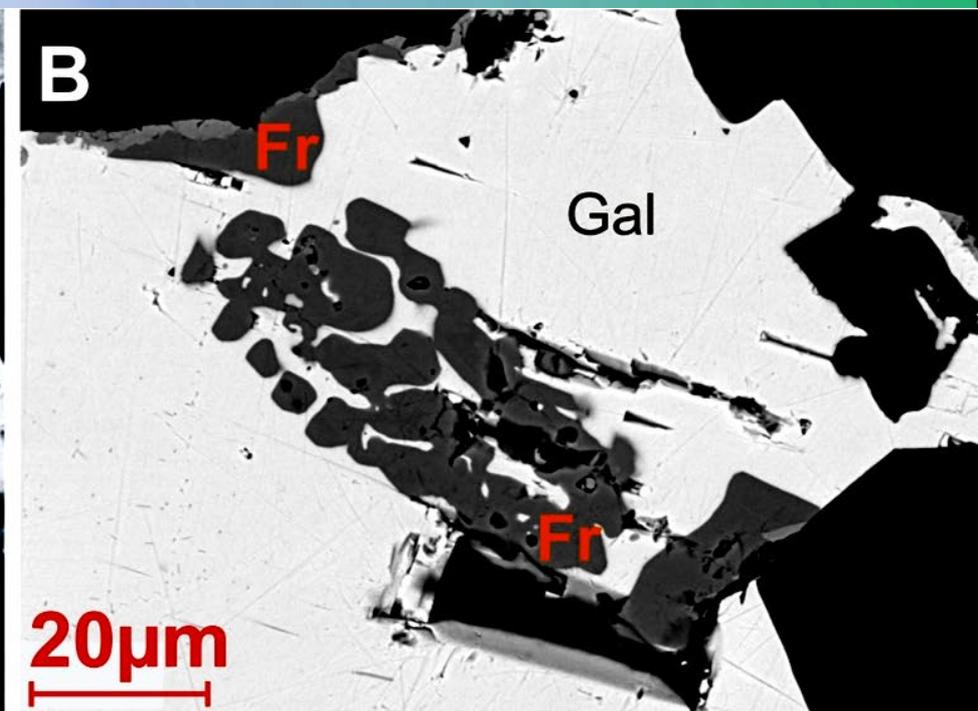
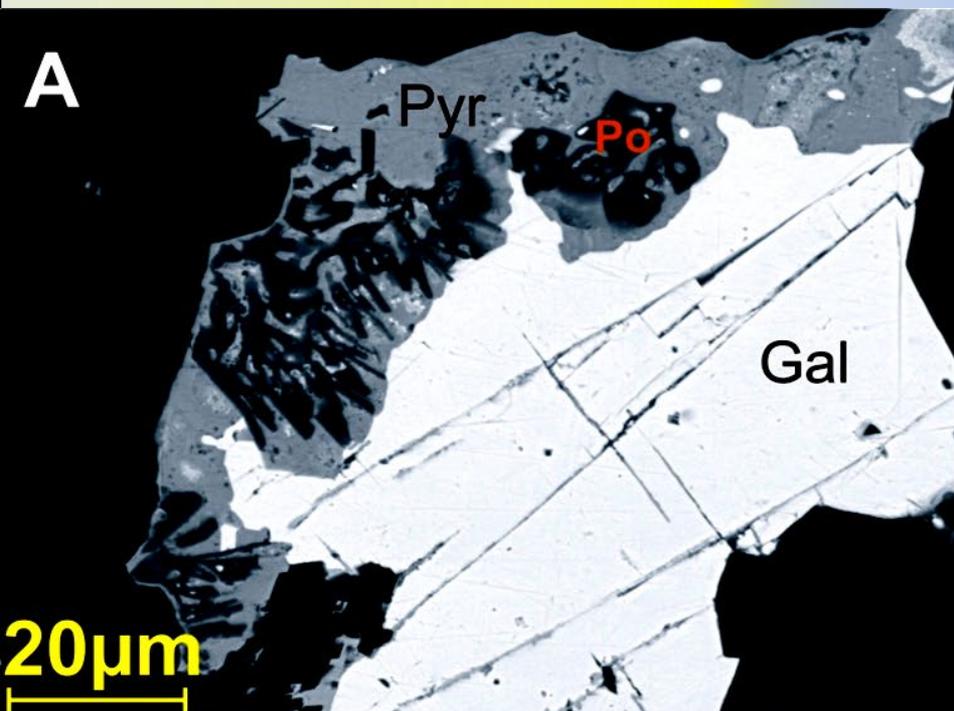
Минерализация Au, Ag и других металлов изучена в пробах из коллекции авторов, собранной в ходе полевых исследований в поясе Колмозеро-Воронья в 2017 и в 1981–1983 гг.

В рудах Оленинского месторождения установлены полиминеральные сростки, размер сростков обычно не превышает 0,2 мм, а размер выделений отдельных минералов в них меньше 5 мкм. Полиминеральные сростки, примыкают к относительно крупным зернам основных сульфидов, таких как галенит, пирротин, реже фрейбергит.



Срастание пирротина (кремовый, Po), галенита (белый, Gal), фрейбергита (серый) и халькопирита (светло-желтый): А – фото аншлифа, без анализатора, В – BSE-фото участка срастания

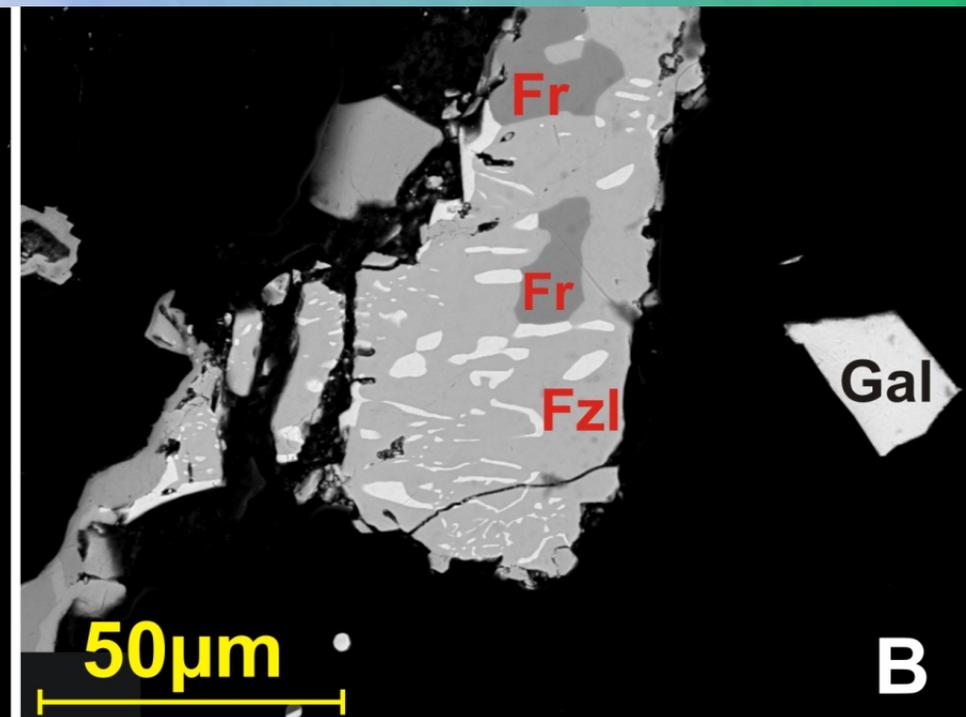
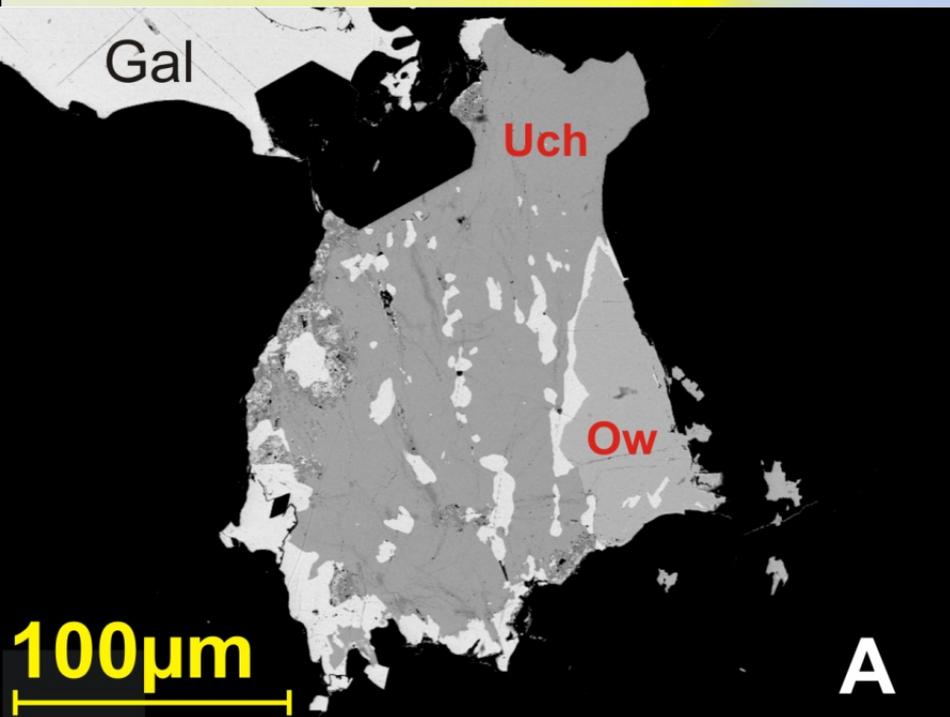
Слева – срастание пираргирита (Pyr) с пирротином (Po) и галенитом (Gal);  
справа – срастание фрейбергита (Fr) с галенитом (Gal).



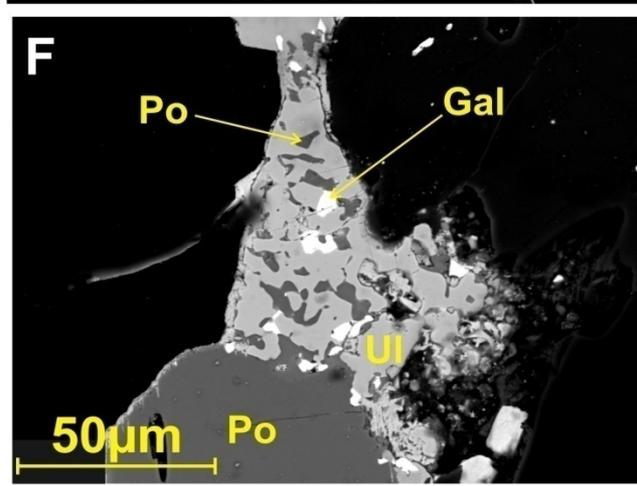
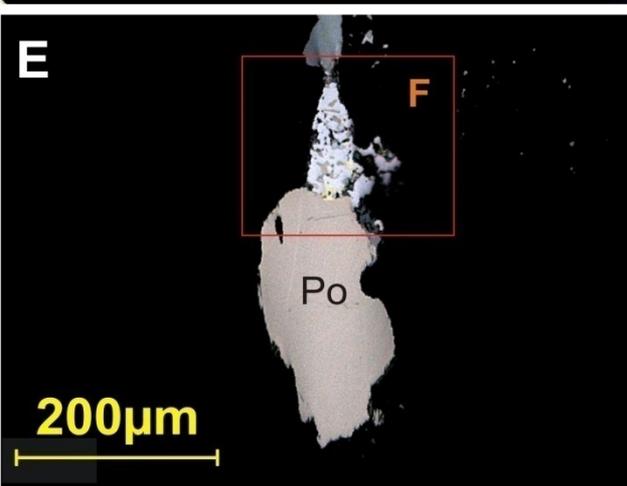
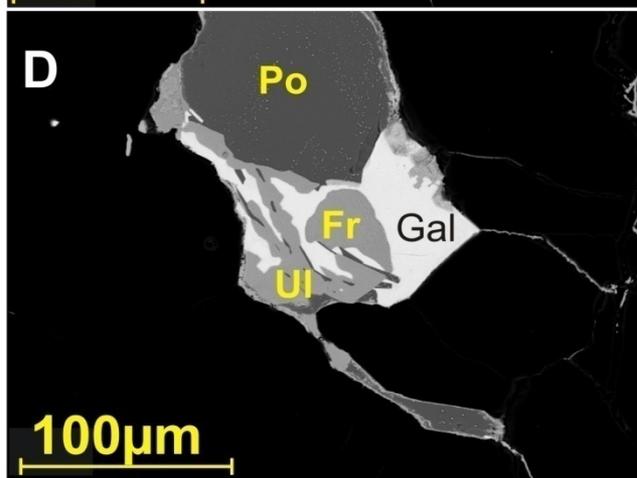
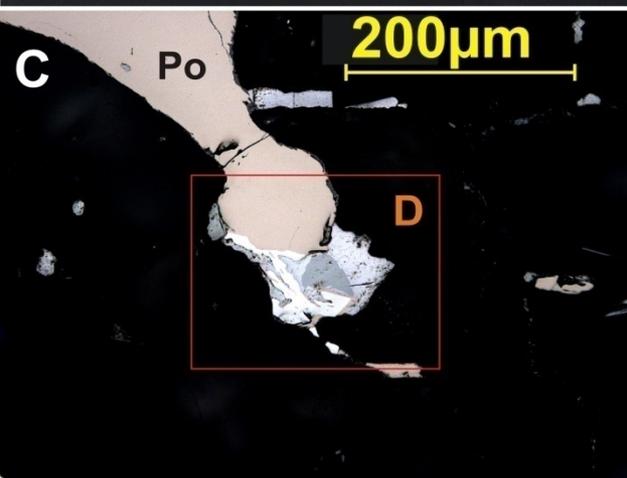
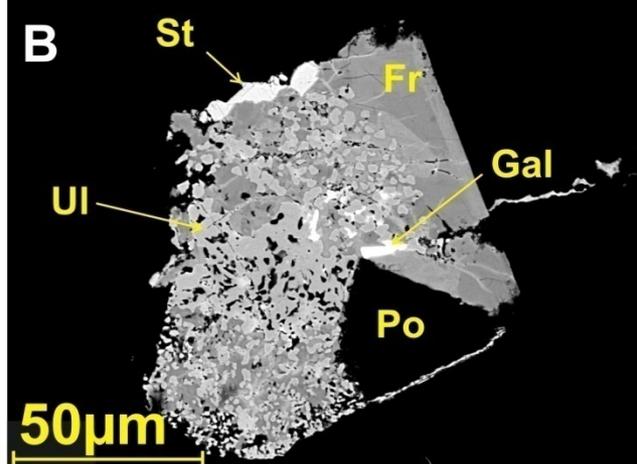
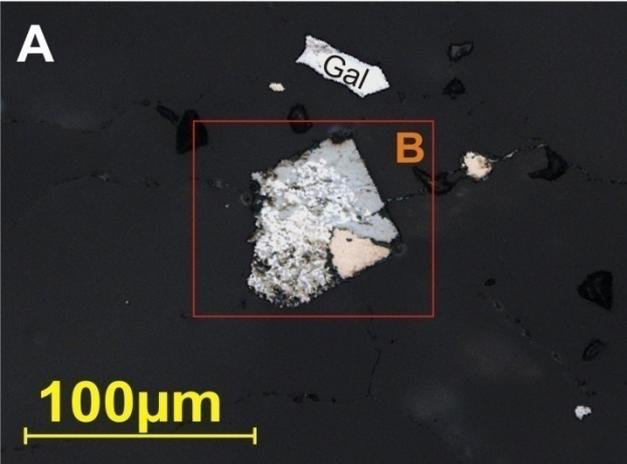
Фотографии участков срастания в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Слева – срастание учукчакуайта (Uch), овихиита (Ow) и галенита (вкрапленники);

Справа – срастание физелиита (Fzl) с галенитом (светло-серый, вкрапленники, Gal) и фрейбергитом (Fr)

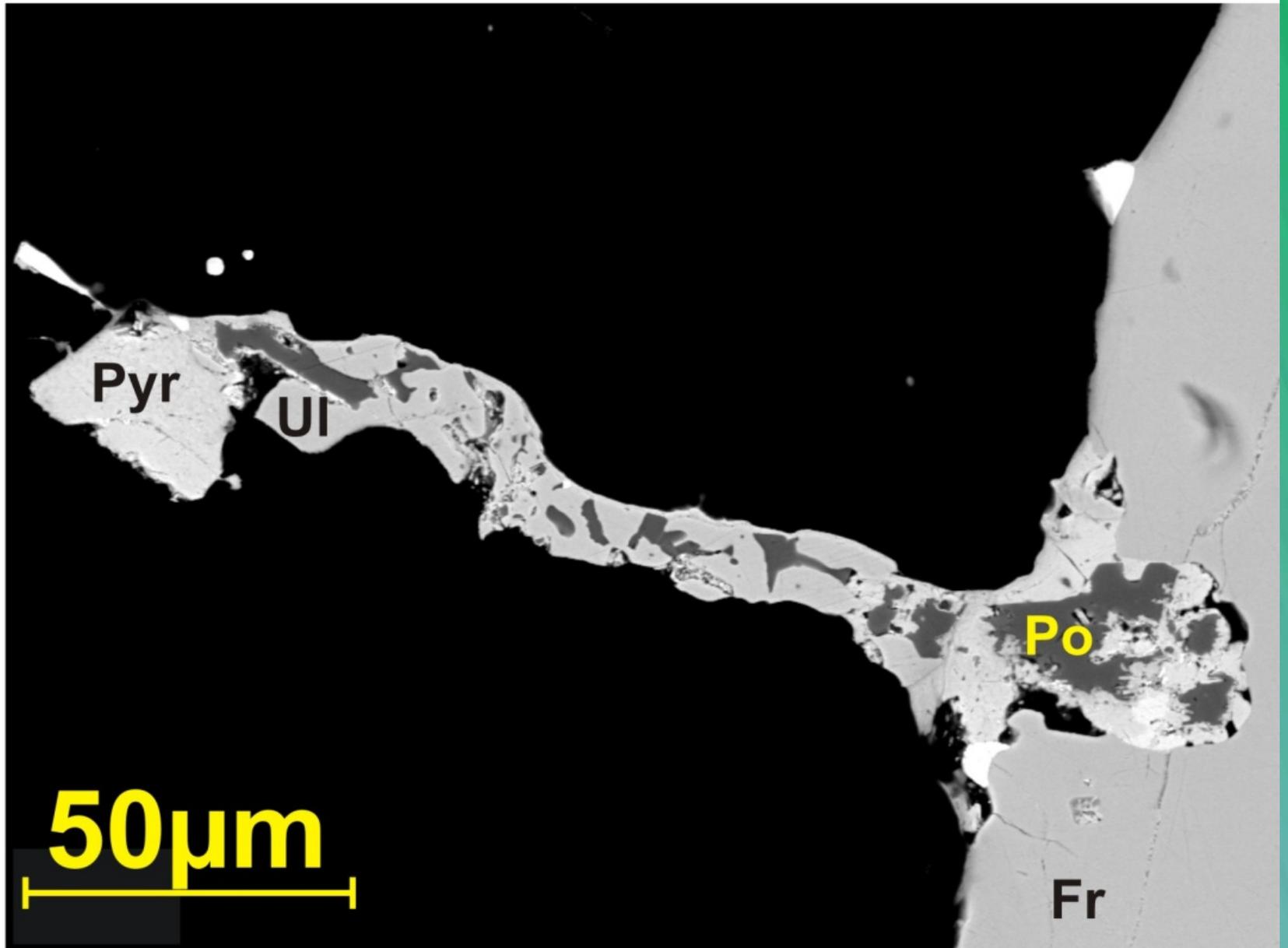


Фотографии участков срастания в обратно-рассеянных электронах (BSE)

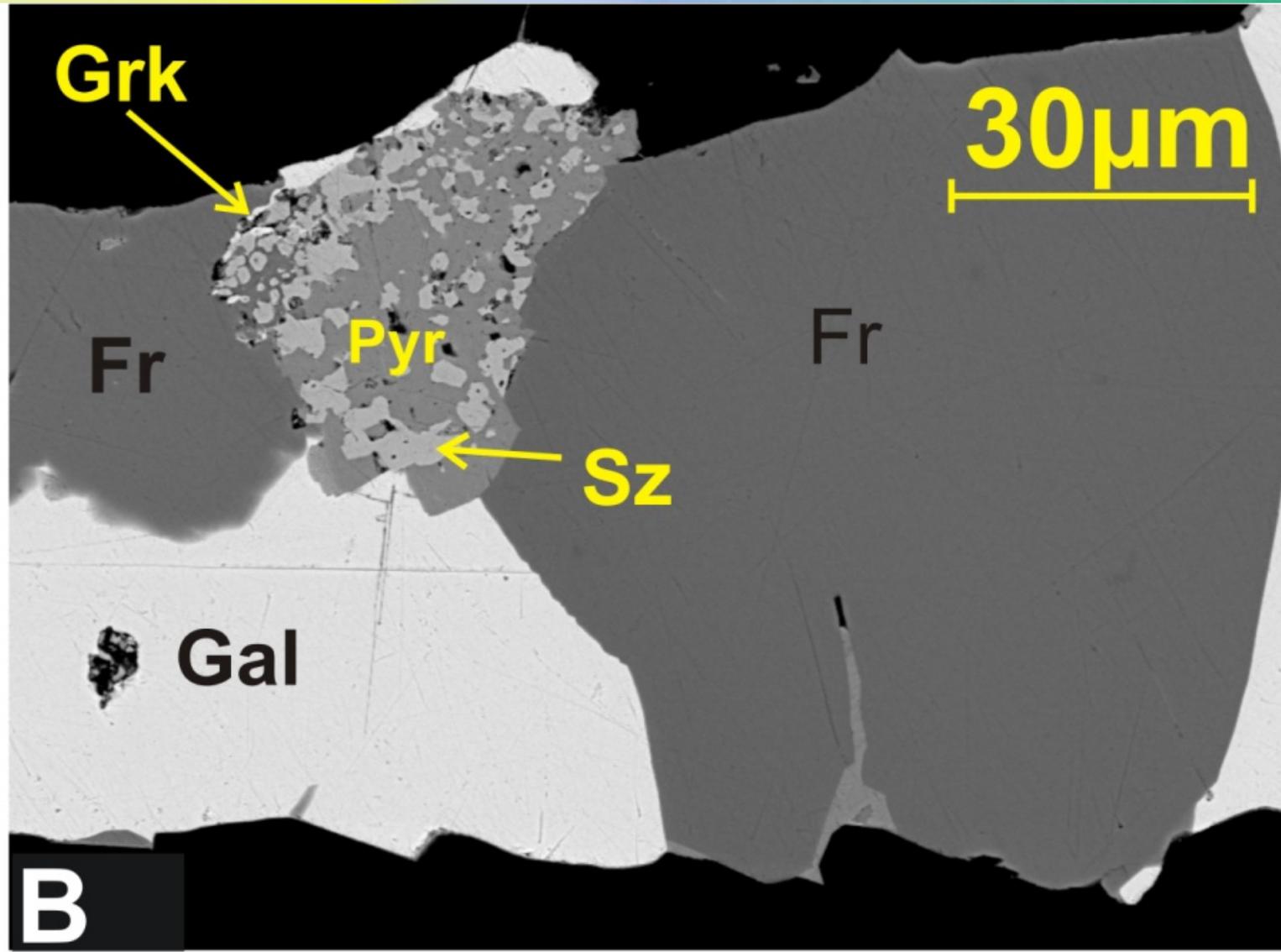


A–D – Срастания ульманита (UI), фрейбергита (Fr) и галенита (Gal) в краевой части зерен пирротина (кремовый, Po), St – стефанит; E–F – срастание ульманита с пирротинном и галенитом. Слева – фото аншлифов, без анализатора, справа – фото участков срастания в обратно-рассеянных электронах

Срастание ульманита (Ul) с пирротинном (Po) и пираргиритом (Pyr) в краевой части зерна фрейбергита (Fr). BSE-фото



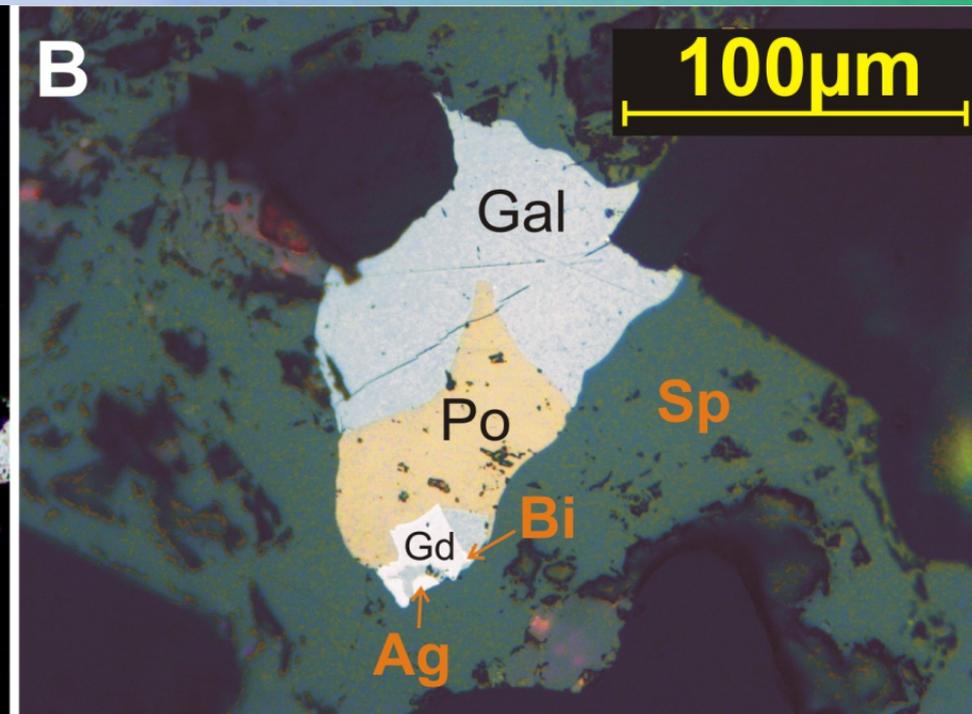
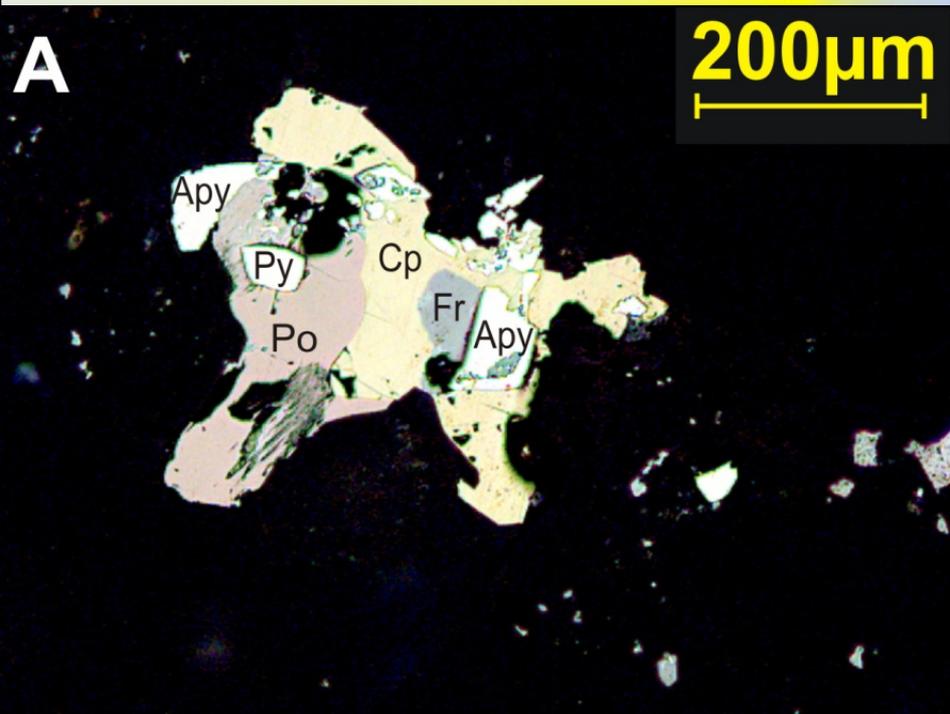
Участок срастания пираргирита (темно-серый, Pyr), штюцитита (серый, вкрапленники, Sz) и гринокита (светло-серый, мелкие червеобразные выделения на границе с фрейбергитом, Grk) в зерне фрейбергита (Fr) и галенита (Gal)



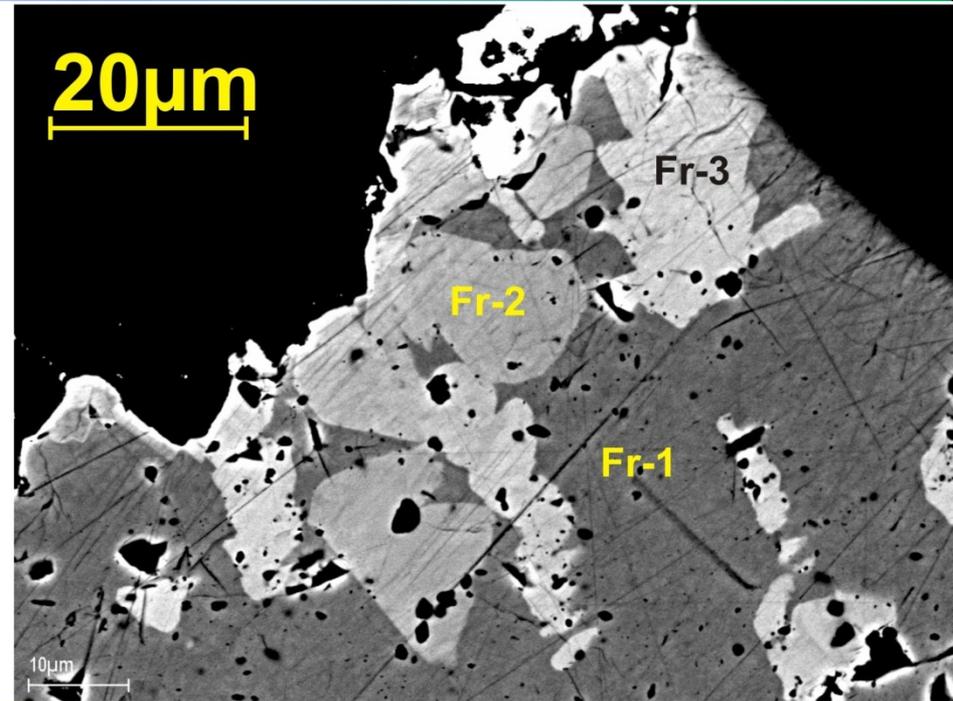
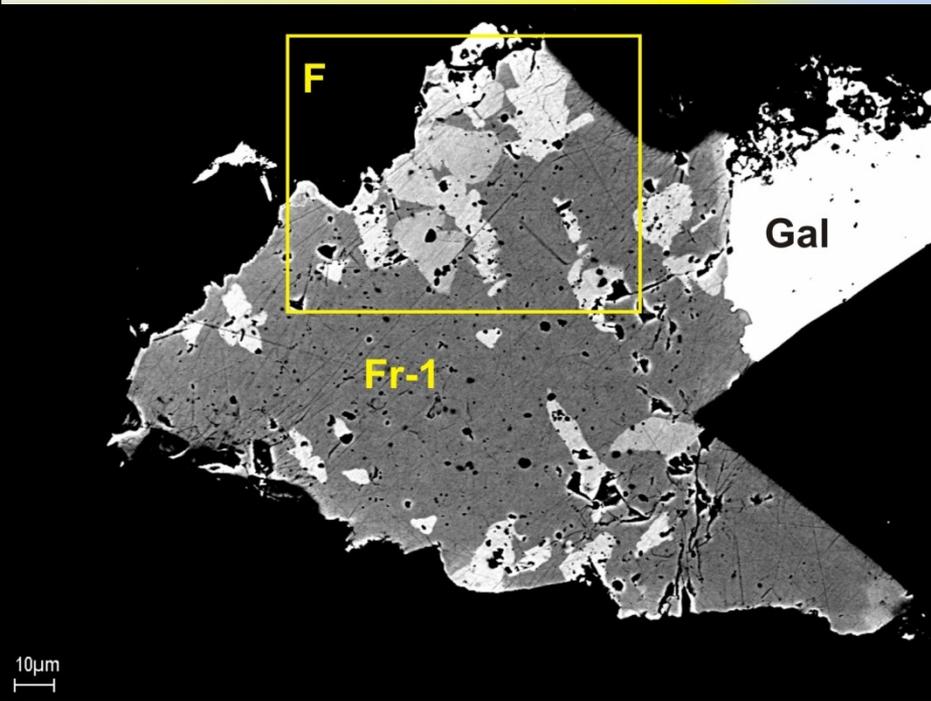
# Полиминеральные срастания сульфидов, фото аншлифов, без анализатора

Слева – полиминеральный сросток пирротина (Po), халькопирита (Cp), фрейбергита (Fr), арсенопирита (Apy) и галенита (очень мелкие выделения по границе фрейбергита с халькопиритом и арсенопиритом), пирит (Py) – поздний, наложенный.

Справа – полиминеральный сросток галенита (Gal), пирротина (Po), гудмундита (Gd) с самородным висмутом (Bi) и золотистым серебром (Ag) в сфалерите (Sp)

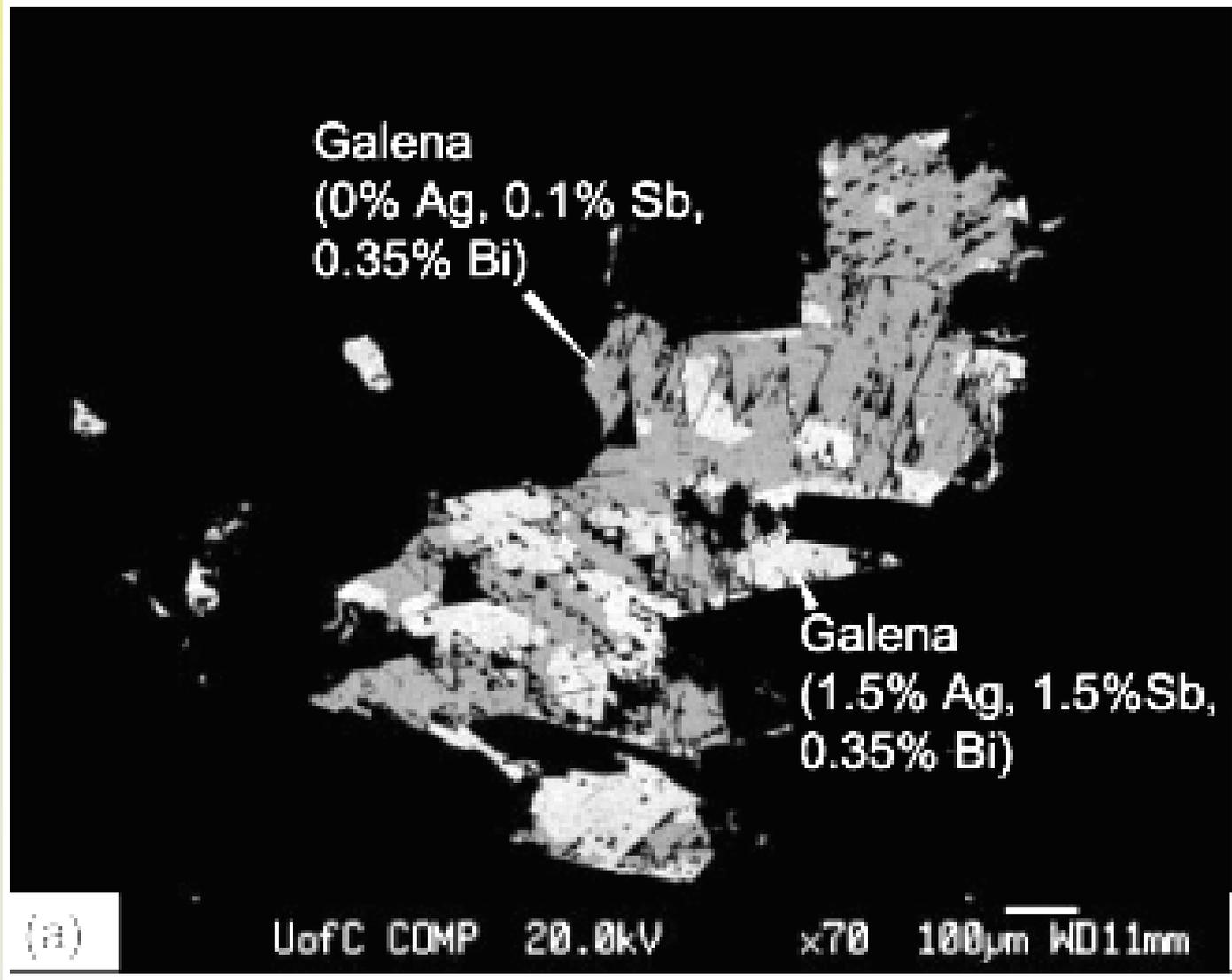


Отмечены также срастания минералов одного минерального вида, различающихся содержанием изоморфных примесей. Например: срастание трех фрейбергитов, различающихся по содержанию Ag и Cu (23, 30 и 33 мас.% Ag), в ассоциации с галенитом (Gal)



Фотографии участков срастания в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Для сравнения: срастание двух галенитов, различающихся по содержанию примесей Ag и Sb, из месторождения Брокен Хилл (Tomkins et al., 2006)



Признаки, указывающие, что рассматриваемые срастания на месторождении Оленинском сформировались в результате кристаллизации сульфидного расплава, следующие:

- полиминеральный сложный состав выделений сульфидов и сульфосолей без признаков замещения ранних минералов поздними;

- участие в составе срастаний минералов элементов с низкой температурой плавления соединений – свинца, серебра, сурьмы, теллура;

- округлые каплевидные либо неправильной формы выделения сульфидов и сульфосолей в матрице основного сульфида-хозяина;

- выделение таких срастаний в виде микропрожилков по границе зерен кварца, либо кварца и сульфидов.

Эти признаки полностью отвечают характеристикам, которые приведены в статье Б.Р. Фроста с соавторами (Frost et al., 2002) .

Как отмечено в начале доклада, палеопротерозойский этап метаморфизма проходил в условиях нижней части амфиболитовой фации при  $T \sim 530^\circ\text{C}$  и  $P \sim 5,5$  кбар. Такая температура выше температурных пределов устойчивости многих минералов, распространенных на Оленинском месторождении: диафорита ( $350^\circ\text{C}$ ), гудмундита ( $280^\circ\text{C}$ ), пираргирита ( $485^\circ\text{C}$ ), ауростибита ( $460^\circ\text{C}$ , а в присутствии золота –  $360^\circ\text{C}$ ) и некоторых других (Воган и др., 1981). Кроме того, температурные условия раннепротерозойского метаморфизма были выше температуры плавления в системах с участием Ag, Sb, Pb, S (Frost et al., 2002). Поэтому при метаморфизме сформировавшихся ранее руд должно было произойти частичное плавление сульфидных минералов, а именно тех, в состав которых входили элементы с низкой температурой плавления. Это привело к образованию малых порций сульфидного расплава, расплавные включения располагались преимущественно на границе сульфидных минералов и кварца, реже во включениях в сульфидах или по микропрожилкам между зернами кварца. В сформировавшийся расплав из основных сульфидов переходили путем диффузии элементы-примеси, что обусловило сложный многокомпонентный состав расплава. При кристаллизации расплавных капель формировались микросрастания минералов Ag, Sb, Pb, Ni, Cu, Fe, S и некоторых других элементов.

Таким образом, находка структур кристаллизации сульфидных расплавов показывает, что рудная минерализация на месторождениях Пеллапахк и Оленинское была метаморфизована.

Зная историю метаморфизма пород пояса Колмозеро-Воронья, можно предположить, что первичная рудная минерализация сформировалась на неоархейском этапе, а метаморфизована она была в раннем протерозое.

На время метаморфизма руд указывают значения возраста мусковита  $1965 \pm 30$  и  $1935 \pm 30$  Ма (Волков, Новиков, 2002) из месторождений Пеллапахк и Оленинское.

***Спасибо за  
внимание!***

