

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

ISSN 2224-5278

Volume 3, Number 429 (2018), 348 – 365

W. G. Stepanets<sup>1</sup>, V. L. Levin<sup>2</sup>, E. S. Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>RCMIR\_COM. Germany – Russian-community-mir. Company, Germany,

<sup>2</sup>K. I. Satpayev Institute of Geological Sciences, Almaty, Kazakhstan,

<sup>3</sup>Karaganda State Technical University, Kazakhstan.

E-mail: wladimir@stepanez.de, levin\_v@inbox.ru, Li\_elenastu@mail.ru

## THE STATE AND COMPOUND OF THE PLATINOIDS AND RARE EARTH METALS WITHIN THE PICRITES SULFIDES OF THE KARA-TURGAI ASSEMBLAGE OF THE NORTHERN ULYTAU

**Abstract.** Violarite, siegenite, platinum telluride (moncheite), silver telluride, lead telluride (altaite), lead selenide, solid solutions of iridium group metals (Ir, Os, Ru), rare earth metals (Dy, Er, Y, Ce) have been discovered for the first time in picrites of the Kara-Turgai assemblage alongside previously known sulfides of copper, nickel and cobalt (copper pyrite, pentlandite, cobaltite, nickeline, gersdorffite). The sulfides constitute three mineral formations. The first two mineral formations form segregation "droplets", having a round and elongate elliptical shape, while the third one is represented by exudations of irregular acute-angled shapes. The platinoids in sulfides are established to exist only in the segregation droplets of the first formation, which accumulated of pyrrhotite, copper pyrite, pentlandite, violarite, and sphalerite. The sulfides of the second formation do not contain platinoids and are represented by pyrrhotite, copper pyrite, and sphalerite. The sulfides of the third formation are represented by pyrrhotite, copper pyrite, sphalerite, and pyrite. The whole of three mineral formations contain magnetite and are commonly confined to the most graded picrites horizons and apopicritic olivinites. Single sulfides inclusions were detected within the picritic diabases, represented by pentlandite, siegenite, millerite, pyrite, and galenite. Cu-Ni – ore formation (platinum group minerals [PGM]) – (rare earth elements [REE]) of Kara-Turgai ores was presumed to occur in an open magmatic system, which was favorable for accumulation of commercial bulk of sulfide.

**Key words:** Ulytau, copper-nickel ores, platinoids, rare earth metals.

В. Г. Степанец<sup>1</sup>, В. Л. Левин<sup>2</sup>, Е. С. Ли<sup>3</sup>

<sup>1</sup>RCMIR\_COM. Germany – Russian-community-mir. Company, Germany,

<sup>2</sup>ТОО «Институт геологических наук им. К. И. Сатпаева», Казахстан,

<sup>3</sup>Карагандинский государственный технологический университет, Казахстан

## СОСТАВЫ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ПЛАТИНОИДОВ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СУЛЬФИДАХ ПИКРИТОВ КАРАТУРГАЙСКОГО КОМПЛЕКСА СЕВЕРНОГО УЛЫТАУ

**Аннотация.** В результате наших исследований, наряду с ранее известными сульфидами меди, никеля и кобальта (халькопиритом, пентландитом, кобальтином, никелином, герсдорфитом), в пикритах каратургайского комплекса были впервые обнаружены виоларит, зигенит, теллурид платины (мончеит), теллурид серебра, теллурид свинца (алтаит), селенид свинца, твердые растворы металлов иридиевой группы (Ir, Os, Ru), редкоземельные элементы (Dy, Er, Y, Ce). Сульфиды формируют три минеральных ассоциации. Первые две образуют ликвационные «капли», имеющие округлую и эллипсоидно-удлиненную форму, а третья минеральная ассоциация – выделения неправильных остроугольных форм. Установлено, что платиноиды в сульфидах присутствуют только в ликвационных каплях первой ассоциации, которые сложены пирротинном, халькопиритом, пентландитом, виоларитом и сфалеритом. Сульфиды второй ассоциации не содержат

платиноидов и представлены пирротином, халькопиритом, сфалеритом. Сульфиды третьей ассоциации представлены пирротином, халькопиритом, сфалеритом, пиритом. Все три минералогические ассоциации содержат магнетит и, как правило, приурочены к наиболее дифференцированным горизонтам пикритов и апопикритовых оливинитов. В составе пикритовых диабазов обнаружены единичные включения сульфидов: пентландит, зигенит, миллерит, пирит, галенит. Постулируется, что рудообразование Cu-Ni-(минералов платиновой группы [МПГ]) – (редкоземельных элементов [РЗЭ]) руд каратургайского типа происходило в пределах открытой магматической системы, благоприятной для накопления промышленных масс сульфидов.

**Ключевые слова:** Улытау, медно-никелевые руды, платиноиды, редкоземельные элементы.

**Введение.** На западе Центрального Казахстана в бассейне реки Каратургай (рисунок 1), что пересекает хребет Северного Улытау, давно известен диабаз-пикритовый каратургайский комплекс, с которым пространственно и генетически связаны сульфиды меди и никеля [1]. Присутствие в сульфидах металлов платиновой группы (МПГ) [2, 3] надолго предопределило интерес к их изучению [3-13].

Сростки сульфидов меди, никеля и железа присутствуют в пикритах и апопикритовых серпентинитах, которые образуют включения трех минеральных ассоциаций. Две первые ассоциации образуют ликвационные «капли», имеющие округлую и эллипсоидно-удлиненную форму, третья ассоциация – неправильные остроугольные формы.

О.Б. Бейсеев и его соавторы [6] детально изучили минеральный состав оруденения и выделили, в порядке убывания, пирротин, пентландит, халькопирит, магнетит, никелин, кобальтин, сперрилит, титаномагнетит, ильменит и хромит. К.Ш. Дюсембаева [8] дополнила эту рудную ассоциацию герсдорфитом, ковеллином, бравоитом, арсенопиритом.

На сегодня металлы платиновой группы известны в сульфидах проявлений Каратургай и Акжал, которые локализируются в составе пикритовых силлов, залегающих среди протерозойских образований (рисунок 1). По данным О.Б. Бейсеева [6] сульфидные медно-никель-кобальтовые руды Каратургайского проявления содержат Pt – 5 г/т, Pd – 16 г/т, тогда как по данным С.С. Чудина [7] в медно-никелевом концентрате этих руд суммарное содержание платиноидов достигает всего 10 г/т.

Крайне низкие концентрации Pt+Pd (до 0.2-0.4 г/т), по данным С.С. Чудина [7], отмечены в апопикритовых серпентинитах массива Акжал. Состав и форма нахождения платиноидов в сульфидах ранее установлены не были.

**Методы исследования.** Микровключения платиноидов в сульфидах меди и никеля из пикритов каратургайского комплекса были изучены в секторе минералогии ТОО ИГН им. К.И.Сатпаева (Алматы) с помощью энергодисперсионного спектрометра INCA ENERGY, фирмы OXFORD INSTRUMENTS, Англия, установленного на электронно-зондовый микроанализатор Superprobe 733, фирмы JEOL, Япония (ускоряющее напряжение 25 кВ, ток зонда 25 нА, диаметр зонда 1–2 мкм). В качестве образцов сравнения при анализе минералов использовали: для МПГ – чистые металлы, для РЗЭ (А) – искусственные соединения (А)  $PO_4$ , для Fe, Cu, S –  $CuFeS_2$ , для Pb –  $PbS$ , для Zn –  $ZnS$ , для остальных элементов – чистые металлы. Результаты анализов нормировали на 100%. Все фото были выполнены в режиме обратно-рассеянных электронов, в котором контраст на изображении зависит от среднего атомного номера фазы  $\bar{Z}$ . Чем больше  $\bar{Z}$ , т. е. чем больше тяжёлых элементов в изучаемой фазе, тем светлее она на изображении.

**Результаты исследования.** Нами в составе пикритов каратургайского комплекса детально были изучены сульфиды трех минеральных ассоциаций. Первая представлена ликвационными глобулами, содержащими: пирротин, пентландит, халькопирит, сфалерит, магнетит. Вторая также образует глобулы, содержащие: пирротин, халькопирит, сфалерит, магнетит. Третья ассоциация представлена включениями неправильной формы, содержащими: пирротин, халькопирит, сфалерит, пирит, магнетит.

В составе глобул первой ассоциации, наряду с ранее известными сульфидами меди и никеля (пентландитом и халькопиритом), были впервые обнаружены теллурид платины (мончеит), теллурид серебра, теллурид свинца, селенид свинца, полиметаллические твердые растворы металлов группы платиноидов (Ir, Os, Ru), редкоземельные элементы (Dy, Er, Y, Ce). В глобулах сульфидов второй ассоциации не были обнаружены микровключения теллурида серебра, платиноидов и редкоземельных элементов. Сульфиды третьей ассоциации, такие как пирротин,

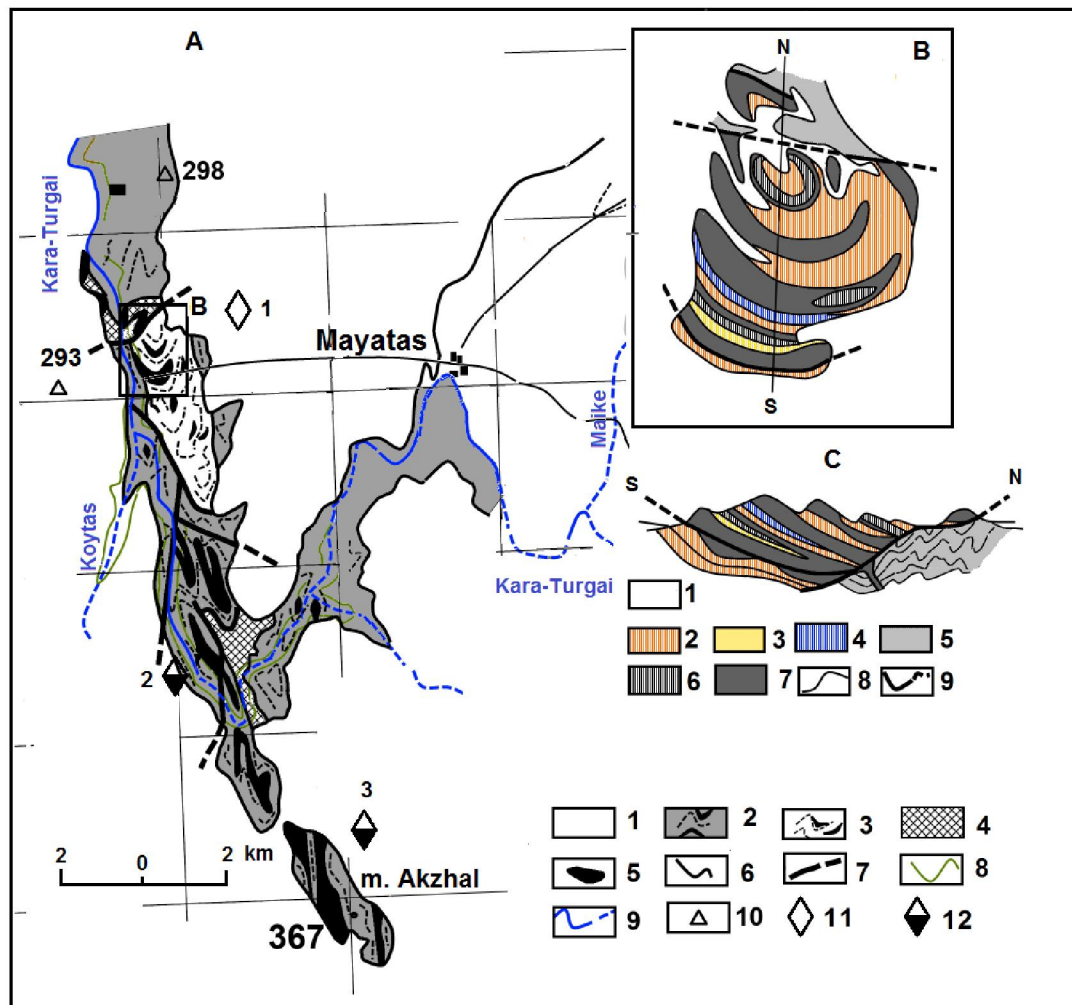


Рисунок 1 –

А. Схема геологического строения района среднего течения р. Кара-Тургай по И.И. Вишневецкой и И.Ф. Трусовой [4], С.С. Чудину [7] с изменениями и дополнениями авторов: 1 – кайнозойские отложения; 2–3 – карсакапайская серия (мезопротерозой): 2 – толща метабазальтов, реже андезитов с подчиненными горизонтами мусковито-кварцитовых и кварцитовых сланцев, 3 – толща пестроцветных туфов кварцевых альбитофиров и пепловых полосчатых туфов среднего состава; 4 – мусковито-альбитовые и графитовые сланцы, альбитовые гнейсы и микрогнейсы аралбайской серии (PR<sub>1ar</sub>); 5 – каратургайский диабаз-пикритовый комплекс (PR<sub>3k</sub>); 6 – геологические границы; 7 – тектонические нарушения; 8 – топографические изолинии; 9 – река Кара-Тургай и ее притоки Койтас и Майке; 10 – тригонометрические высоты. 11–12 – генетические типы полезных ископаемых; 11 – магматическая группа (ликвационный класс), сульфидные медно-никелевые руды с платиноидами и редкоземельными элементами (Du, Er, Y, Ce) в пикритах, 12 – карбонатитовая группа (флюидно-магматический класс), карбонатитоиды кварц-карбонат-альбитового состава с сульфидами меди и платиноидами. Рудопроявления: 1 – Каратургай, 2 – Северный Акжал, 3 – Восточный Акжал.

Схема геологического строения Каратургайского массива (В) и разрез SN (С) через центральную часть массива. Построены по материалам Н.П. Михайлова, Ю.Л. Семенова [1], И.И. Вишневецкой и И.Ф. Трусовой [4], О.Б. Бейсеева [6] с изменениями и дополнениями авторов: 1 – кайнозойские отложения; 2–4 – карсакапайская серия (PR<sub>2kr</sub>): 2 – туфы кварцевых альбитофиров, 3 – полосчатые туфы среднего состава; 4 – туфы основного состава; 5 – графито-альбитовые сланцы аралбайской серии (PR<sub>1ar</sub>); 6–7 – каратургайский диабаз-пикритовый комплекс: 6 – кварцевые диабазы, диабазы, 7 – пикритовые диабазы, пикриты, апопикритовые серпентиниты, преимущественно шаровые, порфиroidные; 8 – геологические границы; 9 – разрывные нарушения и надвиги.

халькопирит и сфалерит, не содержат обнаруживаемых в режиме обратно-рассеянных электронов (состав) включений минералов платиновой группы и редкоземельных элементов и только в составе фазы FeOS<sub>2</sub> были обнаружены очень мелкие включения, содержащие Ce и Os.

#### Минералы ликвационного класса.

**Первая минеральная ассоциация.** Рудообразующие сульфиды первой ассоциации пикритов представлены: пирротинитом, пентландитом, виоларитом, халькопиритом, сфалеритом.



**Пирротин ( $\text{FeS}$ )** имеет слабый избыток серы. По химическому составу он приближается к теоретической формуле троилита (см. таблицу 1). В пирротине отчетливо видны структуры распада твердых растворов (рисунок 2(B)). Он содержит микровключения теллурида платины ( $\text{PtTe}_2$ ), теллурида серебра ( $\text{Ag}_2\text{Te}$ ), алтаита ( $\text{PbTe}$ ). Когда при анализе мелких тяжёлых микровключений в пирротине появляется мышьяк (As до 3.44%), то непременно наблюдается присутствие Os (до 29.77 %), Ir (до 6.89 %), Ru (до 15.27 %), а также отмечается высокое содержание Y (11.41%). С повышением концентрации мышьяка (до 10.83 %) увеличивается содержание Ir (до 16.41%) и появляется Pt (>4.62%), а также примесь Te (>0.62 %). Это даёт основание считать, что мы имеем дело с полиметаллическими твердыми растворами платиноидов.

Кристаллы пирротина образуют двухфазную область (рисунок 2(C)), где более светлые участки представлены фазой, содержащей больше  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (61.85%, см. таблицу 1, 9–12), чем в темной фазе.

**Пентландит ( $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ )** содержит примесь кобальта (1.04-1.31 %) и характеризуется дефицитом серы, а отсутствие кобальта приводит к избытку серы. Недосыщенный серой пентландит, как правило, содержит микровключения теллурида платины ( $\text{PtTe}_2$ ) с примесями Pd, Bi и крайне редко он содержит Rh (1.99%), Ir (1.84 %). Также иногда встречаются примеси Dy (1.65%), Er (1.6 %), и Y (0.08%). В пентландите установлена пластинчатая структура распада твердых растворов (рисунок 2(D)), где темная фаза распада обеднена Fe (<26.11%). Эта фаза по химическому составу близка виолариту (таблица 1).

**Виоларит ( $(\text{Fe,Ni})_3\text{S}_4$ )**, являющийся псевдоморфозой по пентландиту, встречается реже. Он также как и пентландит имеет недостаток серы. Виоларит содержит редкие мелкие микровключения, дающие в анализе Er до 1.76% и Os до 15.43%, что указывает на наличие самостоятельной минеральной формы осмия.

**Халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ )** обнаруживает постоянный избыток серы (см. таблицу 1). Редко в нём присутствуют микровключения теллурида платины ( $\text{PtTe}_2$ ) с примесями Pd, Bi, теллурида серебра ( $\text{Ag}_2\text{Te}$ ), алтаита ( $\text{PbTe}$ ), но преобладает селенид свинца ( $\text{PbSe}$ ), а Os (11.31 %), Ir (1.60 %) и Rh (11.17%) образуют полиметаллические твердые растворы. Халькопирит крайне редко содержит включения Ce (11.27 %) и F которые, по-видимому, совместно образуют  $\text{CeF}_3$  фазу.

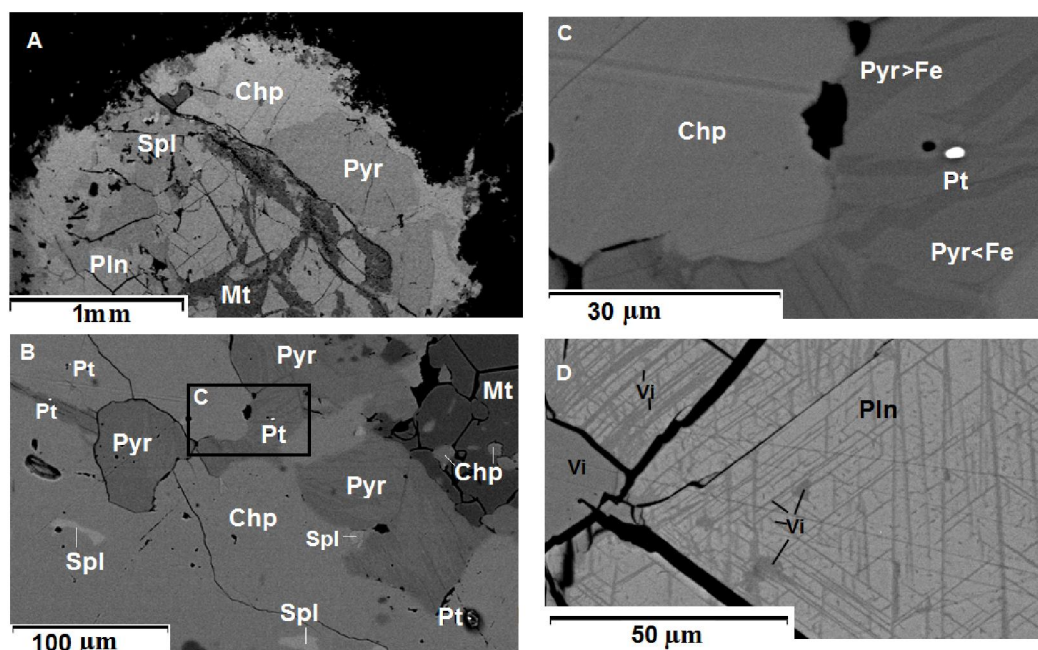


Рисунок 2 – Изображение в обратно-рассеянных электронах участков шлифа, изготовленного из рудного материала, содержащего пирротин (Pyr), халькопирит (Chp), пентландит (Pln) виоларит (Vi), сфалерит (Spl), магнетит (Mt) с микровключениями платины (Pt). На рисунках А, В показано строение сульфидной капли и взаимоотношения минералов. Рисунок С демонстрирует характер соотношения халькопирита и пирротина (с структурой распада твердого раствор), а на рисунке D показана пластинчатая структура распада пентландит-виоларита.



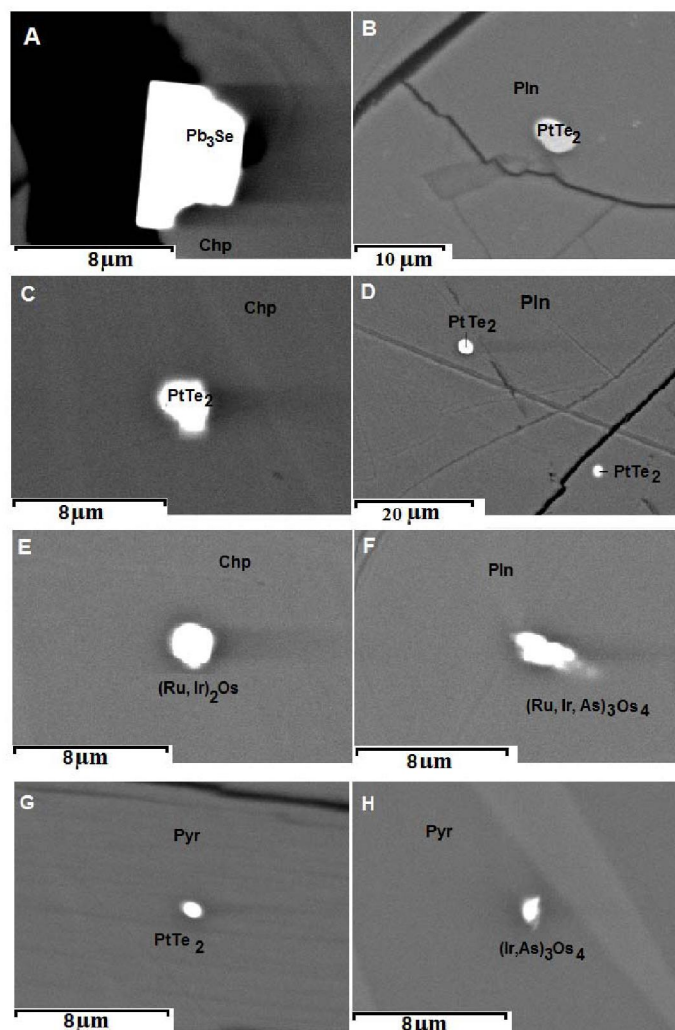


Рисунок 3 – Изображение в обратно-рассеянных электронах участков аншлифа, изготовленного из рудного материала, содержащего пентландит, халькопирит с микровключениями платиноидов и теллурида платины II ( $\text{PtTe}_2$ )

**Сфалерит ( $\text{ZnS}$ )** является относительно редким минералом, который пересыщен серой и содержит до 10.31 % Fe и до 1.02 % Cu (см. таблицу 1). По химическому составу он соответствует марматиту ( $(\text{Zn}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_{\Sigma 1.00} \text{S}_{1.08}$ ). Высокий уровень содержания Fe и избыток S, по-видимому, обусловлен присутствием в ассоциации пирротина как продукта распада твердого раствора. Если учесть, что вхождение железа в структуру сфалерита сильно увеличивает общий объем системы, то при высоком давлении уменьшается количество железа в составе твердого раствора, а, следовательно, при понижении давления происходит увеличение количества железа в структуре сфалерита.

**Минерал класса оксидов. Магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )**, ассоциирующий с сульфидами первой ассоциации, содержит (мас. %): Fe (73.92 -74.66). В нём зафиксировано мелкое зерно, которое в общем анализе дало Os (6.44), Ru (2.01) и Rh (0.22). Также в этом зерне зафиксирована примесь Y (2.15). Эти данные свидетельствуют о том, что установлен твёрдый раствор платиноидов и иттрия.

**Микровключения благородных и редких минералов** в сульфидах первой ассоциации представлены как в виде интерметаллических соединений (интерметаллидов), которые образуют самостоятельные округлые, эллипсоидальные, реже неправильной формы выделения, диаметром не более 3 мкм (рисунок 3), так и в виде теллуридов, селенидов и арсенидов.

Наиболее распространенным является теллурид платины с примесями Pd, Bi, который по химическому составу приближается к стехиометрической формуле монченита  $\text{PtTe}_2$  (см. таблицу 2. №1-3). Теллурид серебра образует зерна идеально округлой формы (рисунок 3). Включения в

Таблица 1 – Состав сульфидов первой минеральной ассоциации с магнетитом, а также МПГ, РЗЭ пикритов каратургайского комплекса (мас.%, сумма 100%)

№ п/п	Минерал	S	Fe	Cu	Co	Ni	Zn	Pb	Er	Os	Te
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Первая минеральная рудная ассоциация с магнетитом, а также МПГ, РЗЭ.											
1	Халькопирит	36.61	30.00	33.39							
2	Халькопирит	36.44	30.19	33.37							
3	Халькопирит	36.46	29.97	33.57							
4	Халькопирит	33.50	30.05	33.45							
5	Халькопирит	37.28	29.43	33.19	0.10						
6	Халькопирит	34.99	30.52	34.50							
7	Халькопирит	35.53	30.04	34.43							
8	Халькопирит	35.39	30.44	34.17							
9*	Халькопирит	35.23	28.89	32.43							3.44
10	Сфалерит	35.09	9.05	1.02			54.83				
11	Сфалерит	34.98	8.88	0.32			55.82				
12	Сфалерит	35.29	10.31	0.80			53.60				
13	Сфалерит	35.12	9.41	0.71			54.75				
14	Сфалерит	33.65	10.19	0.54		1.17	54.45				
15	Сфалерит	33.83	9.44	1.19		0.16	55.38				
16*	Пирротин	41.20	49.35	0.59		0.50				8.36	
17	Пирротин	38.15	61.85								
18	Пирротин	38.16	61.84								
19	Пирротин	38.15	61.85								
20	Пирротин	38.15	61.85								
21	Пирротин	40.37	59.63								
22	Пирротин	40.29	59.71								
23	Пирротин	40.52	59.48								
24	Пирротин	40.39	59.61								
25	Пирротин	38.93	61.07								
26	Пирротин	38.82	61.18								
27*	Пирротин	39.73	59.03							1.24	
28*	Пирротин	33.50	52.60								4.74
29*	Пирротин	31.54	61.98								6.47
30	Пентландит	35.04	33.24		1.18	30.54					
31	Пентландит	35.28	33.56		1.04	30.13					
32	Пентландит	35.75	32.78		1.31	30.16					
33	Пентландит	35.28	33.56		1.04	30.13					
34	Пентландит	35.75	31.78		1.31	30.16					
35	Пентландит	34.01	32.82			31.60			1.57		
36	Пентландит	34.00	33.60			31.55			0.85		
37	Пентландит	34.13	33.54			31.46			0.88		
38	Пентландит	34.37	33.55			30.55			1.24		
39	Пентландит	33.91	33.59			30.90			1.60		
40	Виоларит	40.66	24.81			32.86			1.68		
41	Виоларит	40.27	26.11			31.86			1.76		
42	Виоларит	40.70	22.95			35.19			1.16		
43*	Виоларит	39.84	25.49			31.36			1.42	15.43	
44	Виоларит	41.58	24.20			34.22					

\*Точка анализа содержит мелкое включение.

## Кристаллохимические формулы.

1. $\text{Cu}_{0.999}\text{Fe}_{1.011}\text{S}_{2.149}$ ;	16. $\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{1.075}$ ;	31. $(\text{Fe}_{4.78}\text{Ni}_{4.08}\text{Co}_{0.14})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{8.75}$ ;
2. $\text{Cu}_{0.996}\text{Fe}_{1.014}\text{S}_{2.133}$ ;	17. $\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{1.075}$ ;	32. $(\text{Fe}_{4.70}\text{Ni}_{4.12}\text{Co}_{0.18})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{8.94}$ ;
3. $\text{Cu}_{0.992}\text{Fe}_{1.008}\text{S}_{2.136}$ ;	18. $\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{1.075}$ ;	33. $(\text{Fe}_{4.78}\text{Ni}_{4.08}\text{Co}_{0.14})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{8.75}$ ;
4. $\text{Cu}_{0.989}\text{Fe}_{1.011}\text{S}_{2.08}$ ;	19. $\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{1.179}$ ;	34. $(\text{Fe}_{4.63}\text{Ni}_{4.19}\text{Co}_{0.18})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{9.08}$ ;
5. $\text{Cu}_{0.99}\text{Fe}_{1.0}\text{S}_{2.21}$ ;	20. $\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{1.175}$ ;	35. $(\text{Fe}_{4.66}\text{Ni}_{4.27}\text{Er}_{0.07})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{8.04}$ ;
6. $\text{Cu}_{1.0}\text{Fe}_{1.01}\text{S}_{2.0}$ ;	21. $\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{1.187}$ ;	36. $(\text{Fe}_{4.73}\text{Ni}_{4.23}\text{Er}_{0.04})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{8.34}$ ;
7. $\text{Cu}_{1.0}\text{Fe}_{1.01}\text{S}_{2.04}$ ;	22. $\text{Fe}_{1.0}\text{S}_{1.18}$ ;	37. $(\text{Fe}_{4.73}\text{Ni}_{4.23}\text{Er}_{0.04})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{8.39}$ ;
8. $\text{Cu}_{1.0}\text{Fe}_{1.01}\text{S}_{2.04}$ ;	23. $\text{Fe}_{0.91}\text{S}_{1.09}$ ;	38. $(\text{Fe}_{4.79}\text{Ni}_{4.15}\text{Er}_{0.06})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{8.55}$ ;
9. $\text{Cu}_{0.97}\text{Fe}_{0.98}\text{Te}_{0.05}\text{S}_{1.99}$ ;	24. $\text{Fe}_{0.92}\text{S}_{1.08}$ ;	39. $(\text{Fe}_{4.76}\text{Ni}_{4.17}\text{Er}_{0.07})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{8.37}$ ;
10. $\text{Zn}_{0.838}\text{Fe}_{0.161}\text{S}_{1.030}$ ;	25. $\text{Fe}_{0.95}\text{S}_{1.05}$ ;	40. $(\text{Fe}_{1.33}\text{Ni}_{1.37}\text{Er}_{0.03})_{\Sigma 3.03}\text{S}_{3.79}$ ;
11. $\text{Zn}_{0.843}\text{Fe}_{0.157}\text{S}_{1.080}$ ;	26. $\text{Fe}_{0.95}\text{S}_{1.05}$ ;	41. $(\text{Fe}_{1.39}\text{Ni}_{1.61}\text{Er}_{0.03})_{\Sigma 3.03}\text{S}_{3.73}$ ;
12. $\text{Zn}_{0.816}\text{Fe}_{0.184}\text{S}_{1.096}$ ;	27. $\text{Fe}_{0.99}\text{S}_{1.16}$ ;	42. $(\text{Fe}_{1.39}\text{Ni}_{1.61}\text{Er}_{0.03})_{\Sigma 3.03}\text{S}_{3.73}$ ;
13. $\text{Zn}_{0.832}\text{Fe}_{0.167}\text{S}_{1.089}$ ;	28. $\text{Fe}_{0.96}\text{Te}_{0.04}\text{S}_{1.07}$ ;	43. $(\text{Fe}_{1.38}\text{Ni}_{1.62}\text{Er}_{0.03})_{\Sigma 3.03}\text{S}_{3.76}$ ;
15. $\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{1.075}$ ;	29. $\text{Fe}_{0.95}\text{Te}_{0.05}\text{S}_{0.85}$ ;	44. $(\text{Fe}_{1.28}\text{Ni}_{1.72})_{\Sigma 3.0}\text{S}_3$
	30. $(\text{Fe}_{4.72}\text{Ni}_{4.12}\text{Co}_{0.16})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{8.66}$ ;	

халькопирите по химическому составу отвечают  $\text{Ag}_2\text{Te}$  (см. таблицу 2. №4). Редко встречаются включения алтаита ( $\text{PbTe}$ ) в пирротине и халькопирите (см. таблицу 3)

В пентландите обнаружено соединение ( $\text{Ru, Ir}$ )Os (см. таблицу 3), его эмпирическую формулу можно представить как  $(\text{Ru}_{0.61}\text{Ir}_{0.17}\text{As}_{0.08})_{\Sigma 0.86}\text{Os}_{1.14}$  при химическом составе (мас. %) (без элементов матрицы): Os (29.77), Ru (8.60), Ir (4.39), As (0.87).

В халькопирите (см. таблицу 3) встречено зерно размером не более 1.0 мкм, которое в анализе наряду с железом, медью и серой содержит (мас.%): Ru (11.17), Os (11.31), Ir (1.60), Bi (0.11). Эмпирическую формулу такого высокотемпературного твердого раствора можно представить как  $(\text{Ir}_{0.153}\text{Ru}_{0.184})_{\Sigma 2.004}\text{Os}_{0.996}$ , что соответствует в идеале формуле осмистого иридия ( $\text{Ru, Ir}$ ) $_2\text{Os}$ . Также в халькопирите встречено эллипсоидной формы зерно размером до 3-х мкм, которое имеет сложный химический состав (мас. %): Pt (11.87), Pd (1.11), Te (13.69), Mo (10.42), Bi (3.42), Ag (0.71). Если предположить, что молибден не связан с халькопиритом, то при пересчете на 8 единиц получается кристаллохимическая формула  $(\text{Pt}_{1.624}\text{Bi}_{0.437})_{2.061}(\text{Te}_{2.864}\text{Ag}_{0.176})_{\Sigma 3.04}\text{Mo}_{2.9}$ , в идеале формулу этого твердого раствора можно представить как – ( $\text{Pt, Bi}$ ) $_2(\text{Te, Ag})_3\text{Mo}_3$

**Арсениды.** Высокотемпературные металлы платиновой группы IPGM (Ir, Os, Ru) и As образуют арсениды платиноидов, которые встречаются в составе пирротина и реже в сульфиде железа (см. таблицу 3). Все они представлены крайне мелкими зёрнами неправильной формы (рисунок 3), что осложняет получение достоверного состава этих зёрен, поскольку при анализе регистрируется характеристическое рентгеновское излучение не только от элементов, входящих в состав включения, но и от элементов матрицы.

Если из этих анализов вычесть сумму железа и серы, то можно условно выделить два типа соединений. Первое соединение с химическим составом (мас.%): As (3.44), Ir (6.89), Os (1.09) при пересчете их суммы на 100%, имеет следующую эмпирическую формулу:  $(\text{Ir}_{0.85}\text{Os}_{0.13})_{\Sigma 0.98}\text{As}_{1.02}$ , то в идеале его формула соответствует арсениду иридия ( $\text{Os, Ir}$ )As. Второе соединение (мас.%): As (10.83), Ir (16.41), Pt (4.62), Te (0.62) при пересчете их суммы на 100%, имеет эмпирическую формулу  $(\text{Ir}_{0.68}\text{Pt}_{0.18})_{\Sigma 0.86}(\text{Te}_{0.04}\text{As}_{1.1})_{\Sigma 1.14}$ , что соответствует идеальной формуле ( $\text{Ir, Pt}$ )As.

**Селенид свинца (II) (PbSe)** заключен в халькопирит (см. таблицу 2. №5). Также выявлена фаза  $\text{Pb}_3\text{Se}$  (см. таблицу 2. № 6), которая образует кристалл правильной прямоугольной формы, размером 8x4 мкм (рисунок 3). С сульфидом железа он имеет прямолинейные границы, в то время как халькопирит поглощает его, это свидетельствует, что фаза селенида свинца образовалась раньше, чем халькопирит.

**Алтаит ( $\text{PbTe}$ )** встречается крайне редко. Он образует изометричные микровключения в зёрнах пирротина и халькопирита (см. таблицу 3).

**Вторая минеральная ассоциация.** Сульфиды второй ассоциации (пирротин, халькопирит, сфалерит), по химическому составу ничем не отличаются от таковых первой ассоциации (см. таблицу 4), но при этом пентландит в ней отсутствует. Ни в одном из сульфидов (пирротине, халькопирите и сфалерите) этой ассоциации нам не удалось обнаружить монченита, который широко представлен в сульфидах первой ассоциации.



Таблица 2 – Анализы микровключений в сульфидах первой ассоциации пикритов каратургайского комплекса (мас.%) без элементов матрицы

№ п/п	Минерал	Pt	Pd	Rh	Ru	Te	Bi	Ag	Pb	Se	Σ
1	PtTe <sub>2</sub> (pln)	35.66	2.37	1.27		47.94	7.99				95.23
2	PtTe <sub>2</sub> (pln)	32.03	1.65	1.99		42.66	8.83				87.16
3	PtTe <sub>2</sub> (chp)	32.73	2.10		0.02	42.48	8.58				85.91
4	Ag <sub>2</sub> Te (chp)					30.89		51.46			82.35
5	PbSe(chp)								62.38	20.41	82.79
6	Pb <sub>3</sub> Se (chp)								83.51	11.01	94.52

Кристаллохимические формулы.

1. (Pt<sub>0.89</sub>Pd<sub>0.11</sub>Rh<sub>0.06</sub>)<sub>Σ1.06</sub>(Te<sub>1.77</sub>Bi<sub>0.18</sub>)<sub>Σ1.95</sub>;2. (Pt<sub>0.86</sub>Pd<sub>0.08</sub>Rh<sub>0.10</sub>)<sub>Σ1.04</sub>(Te<sub>1.74</sub>Bi<sub>0.22</sub>)<sub>Σ1.96</sub>;3. (Pt<sub>0.84</sub>Pd<sub>0.10</sub>)<sub>Σ0.94</sub>(Te<sub>1.873</sub>Bi<sub>0.191</sub>)<sub>Σ2.06</sub>;4. Ag<sub>2.02</sub>Te<sub>0.98</sub>;5. Pb<sub>0.54</sub>Se<sub>0.46</sub>;6. Pb<sub>2.97</sub>Se<sub>1.03</sub>.

Таблица 3 – Химический состав минеральных фаз в сульфидах первой ассоциации пикритов каратургайского комплекса (мас.%, сумма 100%)

Мин.	руг	руг	руг	руг	руг	руг	руг	руг	руг	руг
Эл/№п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S	34.32	39.35	33.66	32.12	36.62	37.89	36.54	33.50	31.54	39.10
Fe	19.70	49.34	39.95	35.39	37.71	43.59	51.55	52.60	61.98	50.20
Cu						0.54				
Ni	1.71									
Co										
As	2.15	3.44	7.49	10.83	1.29	0.99				3.06
Os	15.43	0.99			14.03	12.20				1.09
Ir		6.89	14.21	16.41	2.15					6.55
Ru	15.27		0.21		6.25	4.51				
Pt			4.24	4.62	1.94					
Ag							7.89	9.16		
Te			0.24	0.62			4.01	4.74	6.47	
Bi										
У	11.41									
Pb						0.28				

Таблица 3. Продолжение 1

Мин	руг	руг	chp	chp	chp	chp	chp	chp	chp	chp
Эл/№п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
S	27.79	23.42	26.24	22.55	19.63	14.38	15.55	31.22	30.00	31.22
Fe	40.97	31.06	27.85	18.59	15.24	12.10	8.87	25.89	24.65	25.89
Cu			14.91	12.90	13.96	11.39	2.78	28.16	25.99	28.16
Pt		18.05							9.08	
Pd		0.95							1.05	
Ag			1.43			39.32		9.73		9.73
Te	10.14	21.12	11.30			22.81		5.01	9.23	5.01
Bi		5.41								
Pb	21.09		18.27	45.96	44.96		72.16			6.08
Se					2.03		0.64			
O					4.17					

Таблица 3. Продолжение 2.

Мин.	chp	chp	chp	pln	pln	pln	gm
Эл/№п	22	23	24	25	26	27	28
S	37.16	22.62	17.66	31.65	33.33	30.18	
Fe	19.59	19.41	13.13	13.78	30.31	27.14	19.45
Cu	18.83	7.01	7.03				
Ni			4.15	10.93	28.53	24.01	
Co					0.61	0.72	
As				0.87			
Os	11.31			29.77			
Ir	1.60			4.39	1.84		
Ru	11.17			8.60			
Pt					2.23	7.17	25.50
Te						7.48	25.71
Bi	0.11					3.30	10.93
Dy					1.62		
Pb		47.84	45.30		1.52		
Ce							
Se		1.87	3.44				
Zn		1.25					
Si			0.95				
Mg			0.57				1.21

Таблица 3. Продолжение 3.

Мин.	chp	chp	mg	chp	mg	mg	
Эл/№п	29	30	31	32	33	34	35
S	22.55	19,63	4,38	23.52	9,62	3,27	13,71
Fe	18.59	15,24	53,35	18.99	33,72	53.74	16,18
Cu	12.90	13.96		20.26			
As			1,59				
Os			6,44				
Ir			1,74				
Ru			2,01				
Rh			0,22				
Y			2,15				
Pb	45.96	44.96			22.43	11.53	53.61
Ce				11.27			
Se		2.03			3.14	1.25	6.82
Si				2.05	4.13	2.81	
Mg				3,72	2.33	2.27	
Al				0,68			
F				0.55			
O			28,11	18,96	24.64	25.13	9,68

Халькопирит по составу приближается к стехиометрической формуле ( $\text{CuFeS}_2$ ). В пирротине (рисунок 4(В)) явно прослеживаются структура распада твердых растворов, где светлая часть пирротина по составу отвечает теоретической формуле троилита ( $\text{FeS}$ ), а темная часть пирротина пересыщена серой ( $\text{FeS}_{1.13}$ ). Сфалерит по химическому составу приближается к теоретической формуле марматита ( $(\text{Zn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})_{\Sigma 1.0}\text{S}_{1.0}$ ). С увеличением роли Fe (17.97%) увеличивается уровень концентрации Cu (9.03%) и его кристаллохимическая формула изменяется ( $(\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_{0.3}\text{Cu}_{0.1})_{\Sigma 1.00}\text{S}_{1.00}$ ).

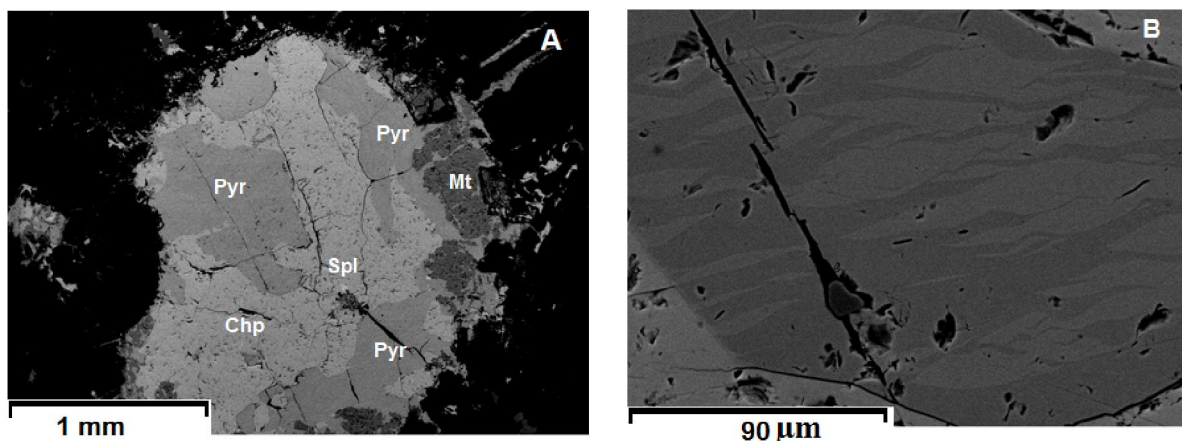


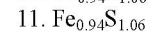
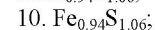
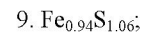
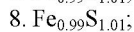
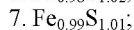
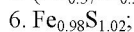
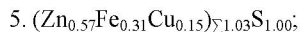
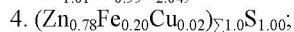
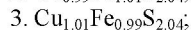
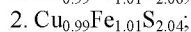
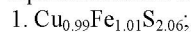
Рисунок 4 – Изображение в обратно-рассеянных электронах участков шлифа, изготовленного из сульфидов второй ассоциации пикритов каратургайского комплекса. А. Рисунок демонстрирует характер взаимоотношений сульфидов с силикатными минералами. На рисунке В показана структура распада твердых растворов пирротина.

**Минерал класса оксидов. Магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ассоциирующий с сульфидами второй ассоциации, содержит Fe (72.06 -72.36 %), что ниже, чем в таковых первой ассоциации.**

Таблица 4 – Состав минералов второй ассоциации пикритов каратургайского комплекса (мас.%)

№ п/п	Минерал	S	Fe	Cu	Zn	O
1	Халькопирит	35.64	30.47	33.88		
2	Халькопирит	35.35	30.45	34.21		
3	Халькопирит	35.33	29.98	34.69		
4	Сфалерит	33.59	11.69	1.55	53.17	
5	Сфалерит	33.64	17.94	9.03	39.40	
6	Пирротин	37.62	62.38			
7	Пирротин	37.02	62.98			
8	Пирротин	36.87	63.13			
9	Пирротин	39.42	60.58			
10	Пирротин	39.34	60.66			
11	Пирротин	39.24	60.76			
12	Магнетит		72.06			27.94
13	Магнетит		72.36			27.64
14	Магнетит		72.18			27.82

Кристаллохимические формулы.



**Третья минеральная ассоциация.** Сульфиды третьей ассоциации представлены пирротинном, халькопиритом, пиритом, сфалеритом, которые по химическому составу несколько отличаются от таковых первой и второй ассоциации (см. таблицу 5) и имеют ряд структурных и текстурных особенностей. Для этой ассоциации не характерно присутствие пентландита, однако, появляется пирит и фаза  $\text{FeOS}_2$ . Объединяющим их с минералами ликвационного класса фактором является присутствие селенида свинца и магнетита, а также наличие твердого раствора Os и присутствие примеси Се.



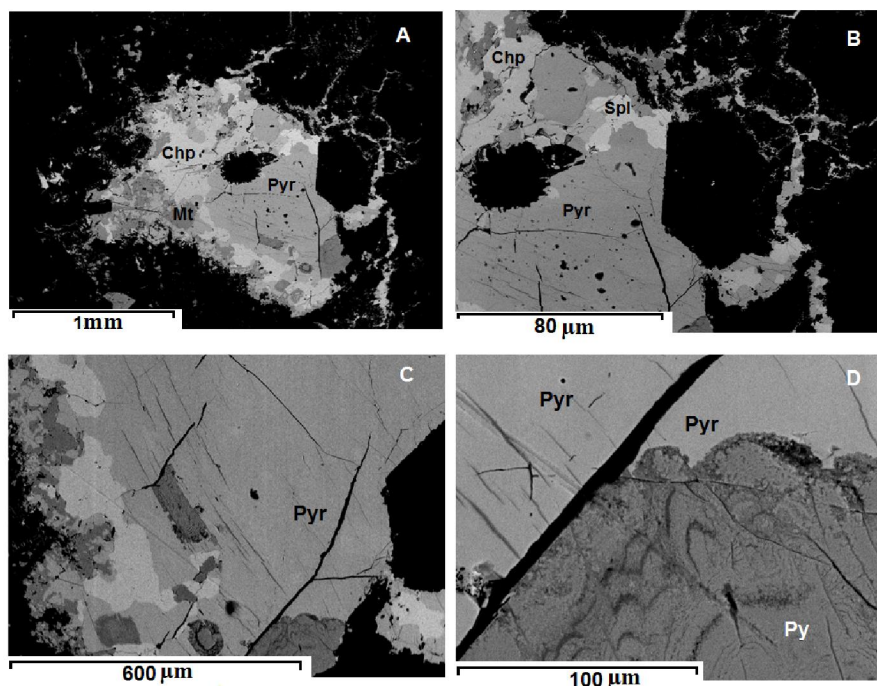


Рисунок 5 – Изображение в обратнорассеянных электронах участков аншлифа, изготовленного из сульфидов третьей ассоциации пикритов каратургайского комплекса. Рисунок демонстрирует характер взаимоотношений сульфидов с силикатными минералами. На рисунках С, D показан характер замещения пирротина минералом с характерной волнистой коллоидно-гелевой структурой.

Таблица 5 – Состав минералов третьей ассоциации пикритов каратургайского комплекса (мас.%)

№ п/п	Минерал	S	Fe	Cu	Zn	Ni	Ce	Os	Si	O
1	Пирротин	39.59	60.41							
2	Пирротин	39.49	60.51							
3	Пирротин	39.56	60.44							
4	Пирротин	39.19	60.81							
5	FeOS <sub>2</sub>	41.79	47.08						0.69	10.44
6	FeOS <sub>2</sub>	41.87	47.64						0.76	9.73
7	FeOS <sub>2</sub>	42.36	47.96						0.67	9.01
8	СпектрFeOS <sub>2</sub>	42.73	47.36			0.12			0.11	9.68
9	FeOS <sub>2</sub>	37.96	46.67				1.08		0.43	13.86
10*	FeOS <sub>2</sub>	36.99	46.44					0.92	0.40	15.25
11	FeOS <sub>2</sub>	40.18	48.26						0.72	10.85
12	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	17.38	54.97						0.48	27.17
13	Пирит	51.95	48.05							
14	Халькопирит	35.25	30.18	34.57						
15	Халькопирит	35.48	30.50	34.02						
16	Халькопирит	35.38	30.55	34.06						
17	Халькопирит	35.33	30.68	33.99						
18	Сфалерит	34.16	9.61		56.23					
19	Сфалерит	34.10	9.72		56.19					
20	Сфалерит	34.42	9.47		56.11					
21	Сфалерит	34.36	9.53		56.11					
22	Магнетит		72.62							27.38
23	Магнетит		71.47							28.11
24	Магнетит		72.56							27.44
25	Магнетит		72.45							27.55
26	Магнетит		72.23							27.77
27	Магнетит		72.61							27.39

\*Точка анализа содержит мелкое включение.

Кристаллохимические формулы.

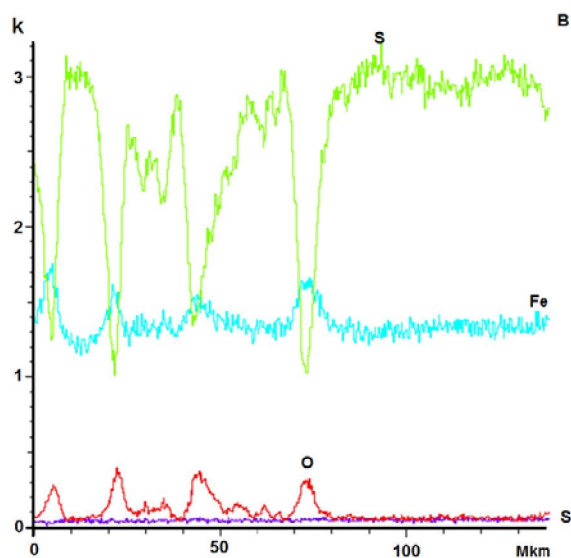
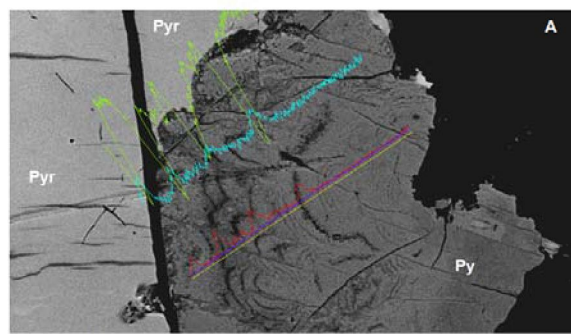
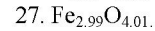
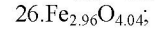
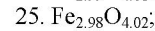
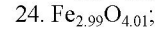
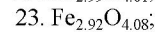
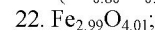
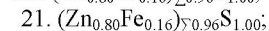
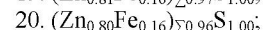
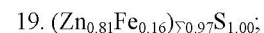
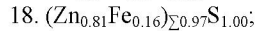
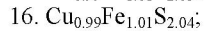
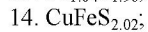
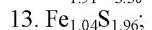
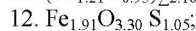
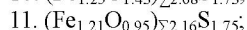
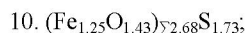
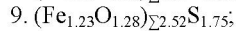
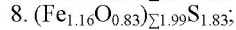
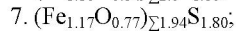
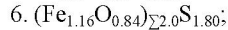
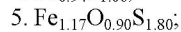
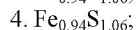
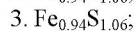
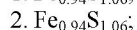
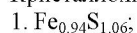


Рисунок 6 –

А – Изображение коллоидно-гелевой структуры пирита (марказита) с наложенной записью концентрационных кривых отдельных элементов по белой линии.

В – Отдельная запись концентрационных кривых.

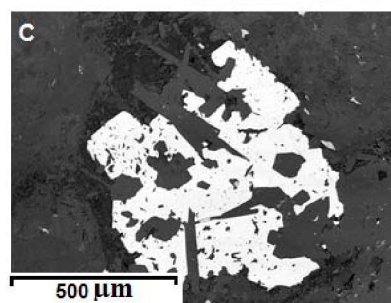
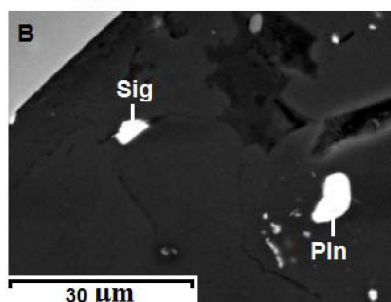
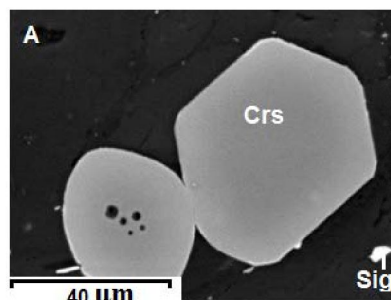


Рисунок 7 – Изображение в обратно-рассеянных электронах участков шлифа, изготовленного из пикритового диабаз, содержащего хромшпинель (Crs), зигенит (Sig), пентландит (Pln), пирит (Py)

Характерной особенностью, к примеру, **пирротина** ( $\text{FeS}_{1.1}$ ) (рисунок 5(C)) является отсутствие структур распада твердых растворов, что характерно для платиносодержащего пирротина первой ассоциации (рисунок 2 и 3). **Халькопирит** по составу приближается к стехиометрической формуле и по отношению к платиносодержащему халькопириту не имеют избытка серы ( $\text{CuFeS}_2$ ). **Сфалерит** ( $(\text{Zn}_{0.81}\text{Fe}_{0.16})_{\Sigma 0.97}\text{S}$ ) не содержит Cu, что характерно и для сфалеритов первой ассоциации (см. таблицу 5). Одной из особенностей этой ассоциации является присутствие **пирита** ( $\text{FeS}_2$ ) и образования с коллоидно-гелевой структурой. Присутствие в составе этого образования Se (1.08 %), не исключает его формирования за счёт пирротина, в процессе окисления последнего образуется фаза  $\text{FeOS}_2$ . Его идеальную формулу в системе Хилл, в расчете на общее количество атомов рав-

ное 4, можно представить как  $\text{FeOS}_2$ , содержащего 11.77% O, 41.07% Fe и 47.16% S. Магнетит и халькопирит содержат включения селенида свинца ( $\text{PbSe}$ ) (см. таблицу 2).

**Минерал класса оксидов. Магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )**, ассоциирующий с сульфидами третьей ассоциации, содержит Fe (<72.62%), что ниже, чем в магнетите первой ассоциации.

**Единичные включения сульфидов** в пикритовых диабазах представлены минералами класса сульфидов: пентландитом, пиритом, зигенитом (этот минерал обнаружен впервые), миллеритом, галенитом.

**Пентландит ( $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ )** образует мелкие редкие зернышки в основной массе (рисунок 7(B)). По химическому составу приближается к стехиометрической формуле пентландита (см. таблицу 6). Он пересыщен S (38.23 %), не содержит Co и слабо обогащен Cr (0.16 %) по отношению к пентландиту пикритов.

**Зигенит ( $(\text{Co}, \text{Ni})_3\text{S}_4$ )** образует мелкие зёрнышки в основной массе породы (рис. 6(A)). В его составе присутствует примесь железа (5.01–7.91 %, см. таблицу 6), а в формуле зигенита отмечается постоянный избыток серы и преобладание никеля над кобальтом.

**Миллерит ( $\text{NiS}$ )** встречается в интерстициях клинопироксена, где образует мелкие кристаллы. В качестве примеси в его составе обнаружено железо (см. таблицу 6).

**Галенит ( $\text{PbS}$ )** присутствует в виде мелких зерен в ассоциации с миллеритом. В его составе отмечаются примеси Fe и Ni, содержание Pb достигает 83.18 %, а S – до 12.37%.

**Пирит ( $\text{FeS}_2$ )** содержит S=56.31 % и Fe=43.69 %.

**Минералы класса оксидов. Титаногематит и манганоильменит** образуют структуры распада твердых растворов, а **хромшпинель** – зерна изометричной формы.

Таблица 6 – Состав сульфидов пикритовых диабазов каратургайского комплекса (мас.%)

№ п/п	Минерал	S	Fe	Co	Ni	Cr	Pb	Сумма
1	Пентландит	36.36	33.05		30.59			100.0
2	Пентландит	38.23	33.87		27.75	0.15		100.0
3	Зигенит	44.29	5.01	9.72	40.47	0.51		100.0
4	Пирит	56.31	43.69					100.0
5	Зигенит	44.51	7.91	15.25	32.33			100.0
6	Зигенит	44.32	7.97	15.60	32.11			100.0
7	Зигенит	45.30	10.79	12.53	31.38			100.0
8	Миллерит	37.58	1.83		60.58			100.0
9	Миллерит	37.89	1.70		60.41			100.0
10	Миллерит	37.89	1.70		60.41			100.0
11	Галенит	12.37	1.68		2.77		83.18	100.0

Кристаллохимические формулы.

1.  $(\text{Fe}_{4.786}\text{Ni}_{4.214})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{9.171}$ ;

2.  $(\text{Fe}_{5.045}\text{Ni}_{3.933}\text{Cr}_{0.022})_{\Sigma 9.0}\text{S}_{9.920}$ ;

3.  $(\text{Ni}_{2.168}\text{Co}_{0.519}\text{Fe}_{0.281}\text{Cr}_{0.093})_{\Sigma 3.062}\text{S}_{4.345}$ ;

4.  $\text{Fe}_{0.924}\text{S}_{2.076}$ ;

5.  $(\text{Ni}_{1.737}\text{Co}_{0.816}\text{Fe}_{0.447})_{\Sigma 3.0}\text{S}_{4.378}$ ;

6.  $(\text{Ni}_{1.719}\text{Co}_{0.832}\text{Fe}_{0.449})_{\Sigma 3.0}\text{S}_{4.345}$ ;

7.  $(\text{Ni}_{1.705}\text{Co}_{0.679}\text{Fe}_{0.616})_{\Sigma 3.0}\text{S}_{4.507}$ ;

8.  $(\text{Ni}_{0.97}\text{Fe}_{0.03})_{\Sigma 1.0}\text{S}_{1.1}$ ;

9.  $(\text{Ni}_{0.97}\text{Fe}_{0.03})_{\Sigma 1.0}\text{S}_{1.11}$ ;

10.  $(\text{Ni}_{0.97}\text{Fe}_{0.03})_{\Sigma 1.0}\text{S}_{1.11}$ .

**Обсуждение результатов.** В результате наших исследований установлено, что наряду с ранее известными сульфидами (пирротитом, пентландитом и халькопиритом) в пикритах каратургайского комплекса впервые обнаружены зигенит, теллурид платины (мончеит), теллурид серебра, теллурид свинца (алтаит), селенид свинца, твердые растворы металлов иридиевой группы (Ir, Os, Ru), редкоземельные элементы (Dy, Er, Y, Ce). Сульфиды формируют три минеральных ассоциации. Первые две образуют ликвационные «капли», имеющие округлую и эллипсоидно-удлиненную форму, а третья минеральная ассоциация – неправильно остроугольные формы (рисунок 8). Установлено, что платиноиды в сульфидах меди и никеля присутствуют только в ликвационных каплях первой ассоциации, которые сложены пирротитом, халькопиритом, пентландитом, сфалеритом. Сульфиды второй ассоциации не содержат платиноидов и представлены пирротитом, халькопиритом, сфале-



ритом. Сульфиды третьей ассоциации представлены пирротином, халькопиритом, сфалеритом, пиритом. Все три минералогические ассоциации содержат магнетит и, как правило, приурочены к наиболее дифференцированным горизонтам пикритов и апопикритовых оливинитов. Выявленная нами закономерность в распределении платиноидов в составе ликвационных сульфидов дает ответ, почему происходило разубоживание рудного концентрата [7].

Глобулы сульфидов пикритов каратургайского комплекса не имеют идеально ровных границ, как и метасоматического ореола (рисунок 8), что характерно для большинства сульфидных глобул медно-никелевых руд ультрабазит-базитовых плутонических комплексов [14]. Извилистая граница, как и нередкое проникновение сульфидов в силикатный матрикс, свидетельствует, что процесс формирования глобул сопровождался одновременным сжатием. Также не установлена и классическая архитектура глобул, характерная для плутонических комплексов, где нижняя часть сложена пирротином, верхняя – халькопиритом, а в центральной части находится пентландит.

Наибольшее сходство сульфидные глобулы каратургайского типа находят с глобулами сульфидов в пикритах норильско-талнахского типа, где халькопирит располагается сверху, пирротин и пентландит – в нижней части, а магнетит располагается по краю сульфидных капель в рудах пикритового горизонта. [15]. Однако глобулы первой ассоциации имеют существенное отличие в распределении магнетита, как правило, он локализуется в центральных частях рудных платиносо-держающих глобул (рисунок 8.1A), тогда как магнетит второй ассоциации каратургайского типа располагается по краям сульфидных капель (рисунок 8.2A).

Одной из особенностей третьей минеральной ассоциации является присутствие редких зерен фазы  $FeOS_2$  с коллоидно-гелевой структурой, образование которой было обусловлено взаимодействием пирротина с кислородом, что сопровождалось уменьшением уровня содержания серы, уве-

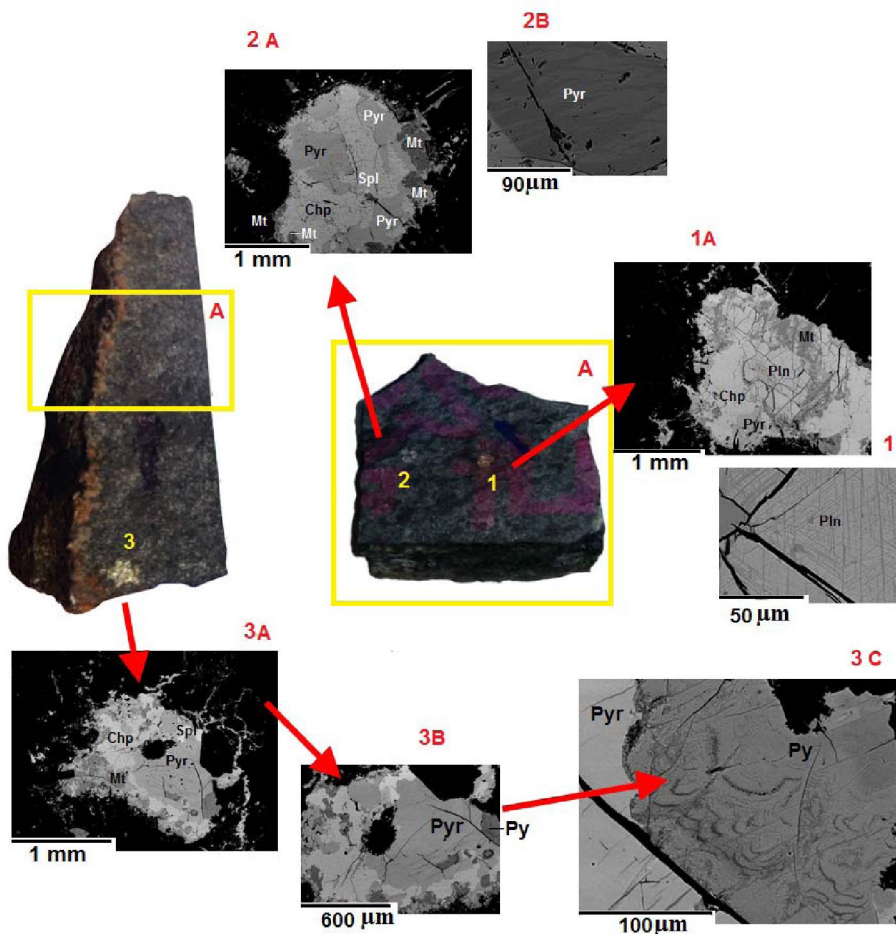


Рисунок 8 – Общие сведения о составе и старении сульфидов каратургайского комплекса. Пояснение смотри в тексте главы «Обсуждение результатов»

личением кислорода и образованием оксида железа, формирующего на изображении темную сыпь во фронте движущихся волн (рисунок 8.3С). Это может служить доказательством образования такой минералогической ассоциации в гипабиссальных условиях, где существенная роль отводится окислительным процессам.

В целом набор минералов сульфидных капель идентичен рудам ликвационного типа, однако отмечаются некоторые отличия их состава. Например, пирротин руд каратургайского типа не содержит никеля и кобальта, что характерно для пирротина руд норильско-талнахского типа. Если в рудах последних присутствует палладий, спериллит, золото, серебро и селен, то в рудах пикритов каратургайского типа нет спериллита, палладий и селен встречается крайне редко, но широко представлены редкоземельные элементы. Теллурид платины в рудах каратургайского типа встречается во всех главных рудных минералах (пентландите, халькопирите и пирротине) первой ассоциации, а вот золото не обнаружено, зато много теллурида серебра. Одной из характерных особенностей руд каратургайского типа является присутствие селенида свинца, арсенидов иридиевой группы и высокий уровень содержания редкоземельных элементов иттриевого (Y, Dy) подсемейства.

В составе пикритовых диабазов наряду с пентландитом, пиритом и галенитом впервые обнаружены зигенит и миллерит, которые не были описаны ранее в составе пород каратургайского комплекса. Характерно, что пентландит пересыщен S, не содержит Co и слабо обогащен Cr по отношению к пентландиту пикритов каратургайского типа.

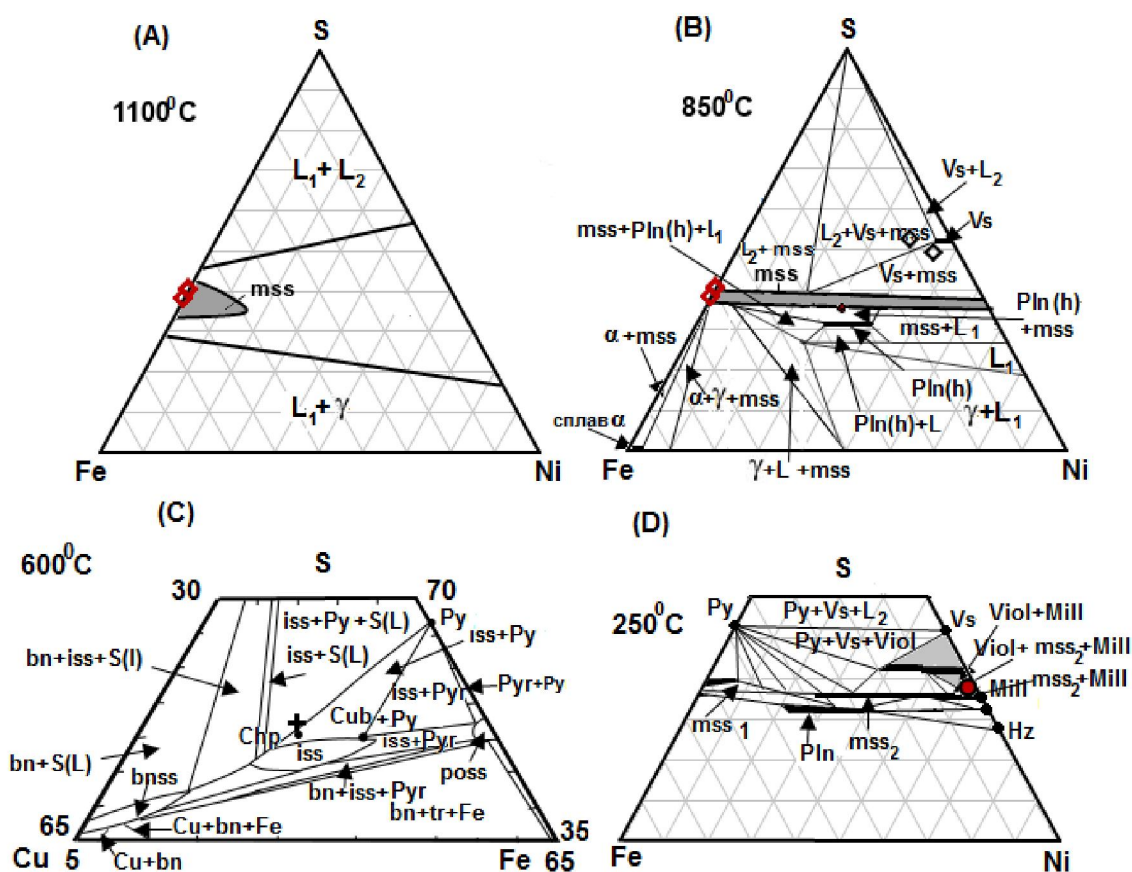


Рисунок 9 – Изотермические сечения конденсированных систем Fe-Ni-S [16] при температурах 1000<sup>0</sup>С (А), 850<sup>0</sup>С (В), 250<sup>0</sup>С (D) и Cu-Fe-S [17] при температуре 600<sup>0</sup>С (С) для пирротина (красный ромб), пентландита (черный кружок), халькопирита (черный крест), зигенита (черный ромб) и миллерита (красная точка) из пикритов и пикрито-диабазов каратургайского комплекса. mss – моносulfидный твердый раствор; iss – промежуточный твердый раствор; халькопирит (Chp); пентландит (Pln); ваэсит (Vs); пирротин (Pyr); пирит (Py); виоларит (Viol); миллерит (Mill); расплав (L).

В системе Fe-Ni-S (рисунок 9(A, B)) предложенной А. Налдреттом [16] фигуративные точки пентландита располагаются ниже барьера изолирующей фазу, обогащенную S, от фаз, богатых металлами, и тяготеют к полю моносльфидного твердого раствора (mss). Пирротин в этой системе располагается на стороне Fe-S, но при этом его фигуративные точки лежат в области барьера mss, чем, вероятно, можно объяснить присутствие минералов IPGE, PtTe<sub>2</sub> и Ag<sub>2</sub>Te в пирротине, так и в пентландите. В системе Cu-Fe-S (рисунок 9(C)) халькопирит, учитывая избыток в нём серы, располагается в поле iss+Py+S(L), что, по-видимому, согласуется с понижением температуры кристаллизации халькопирита.

Учитывая последовательность выделения минеральных фаз и анализ изотермических сечений конденсированной системы Fe-Ni-S [16], генезис сульфидной медно-никелевой минерализации каратургайского типа, по-видимому, подчиняется следующей схеме.

Если учесть современную трактовку температуры и формирование mss, то можно предположить, что при 1190<sup>0</sup>C на линии Fe-S появляется Fe<sub>(1-x)</sub>S (троилит), который при температуре 1100<sup>0</sup>C распространяется во внутреннюю часть системы, формируя поле mss (рисунок 9(A)). Как предполагает А. Налдретт [16], на этом этапе mss обогащен Fe и обеднен Ni относительно жидкости, с которой он находится в равновесии. Впоследствии mss, образующейся из фракционированной жидкости при продолжении фракционной кристаллизации, по Д. Ибел и А. Налдретту [18] становится более богатым Ni. При 865<sup>0</sup>C, как предполагают А. Сугаки и А. Китакаце [19], в результате реакции между mss и жидкостью образуется высокотемпературный полиморфный пентландит (рисунок 9(B)). Если учесть данные А.А. Федорова и А.В. Синякова [20.], что в нашей системе вместо вазита (Ni<sub>3-x</sub>S<sub>2</sub>) присутствовал зигенит, то можно предположить, что температура в магматической камере опускалась ниже 806<sup>0</sup>C. Если принять во внимание состав изученных сульфидов и согласиться с выводами Дж. Крэйга и Г. Куллера [21], то можно заключить, что жидкость, находящаяся в равновесии с mss при 850<sup>0</sup>C, была обогащена Cu, но обеднена Ni относительно mss. Если учесть изотермические сечения системы Cu-Fe-S (рисунок 9(C)), то можно утверждать, что промежуточный твердый раствор (iss) выделяется из Cu-содержащего mss. При снижении температуры (до 400<sup>0</sup>C и менее) iss, предположительно, разлагается на халькопирит-пирротиновые минеральные фазы. Присутствие в системе Fe-Ni-S (рисунок 9(D)) миллерита позволяет предположить, в соответствии с выводами Дж.Крэйга [22], что при 250<sup>0</sup>C mss разделится на фазы mss<sub>1</sub> и mss<sub>2</sub>+ миллерит. Это также согласуется с выводами К. Мисра и М. Флита [23], что при низкой температуре стабильно существует миллерит и, неустановленный нами минерал, хизлевудит.

**Выводы.** Вышеизложенное свидетельствует, что образование минеральных включений медно-никелевых руд, содержащих платинометалльную минерализацию, протекало при понижении температуры, которая изменялась от 1200<sup>0</sup>C до 100-135<sup>0</sup>C. По-видимому, такое стремительное понижение температуры магматического расплава способствовало удержанию минералов платиновой группы и редкоземельных элементов в процессе его фракционирования и могло протекать в гипабиссальных условиях. Это предположение хорошо согласуется с присутствием в пикритах титаногематита. Как известно, титаногематит образуется при высоком окислительном потенциале кислорода, что является прямым свидетельством образования содержащих его пород в гипабиссальных условиях. Не противоречит этому и присутствие железа в сфалерите, поскольку при понижении давления происходит увеличение количества железа в структуре сфалерита, а также присутствие алтаита, формирующегося в условиях гидротермального среднетемпературного процесса минералообразования в качестве позднего минерала. Присутствие селенида свинца и алтаита, как и высокое содержание свинца в других сульфидах указывает, что магматические, в том числе рудные, процессы протекали в составе континентальной коры. Обнаруженные нами редкоземельные элементы, в составе сульфидов, такие как Ce, Dy, Er, Y на фоне платиноидов существенно увеличивают промышленный интерес к потенциальным рудам пикрит-диабазового каратургайского комплекса. Присутствие платиноидов и РЗЭ только в составе ликвационных капель представленных пирротином, халькопиритом, пентландитом и сфалеритом позволяет более корректно провести технологическое опробование руд каратургайского типа.

Все приведенные факты свидетельствуют, что рудообразование Cu-Ni-(МПГ)-(РЗЭ) руд каратургайского типа происходило в пределах открытой магматической системы. Исследования



последних лет [24] показали, что открытые магматические системы являются благоприятными для концентрации большого количества сульфидов. Также ими [24] было отмечено, что для образования Cu-Ni-(МПП)-(РЗЭ) руд в открытых магматических системах не обязательно должен быть привнос серы из вмещающих пород. Это также вселяет надежду, что в придонных и корневых зонах пикрит-диабазового каратургайского комплекса могут локализоваться крупные массы Cu-Ni-(МПП) - (РЗЭ) руд.

Особо следует отметить, что образование пород каратургайского комплекса, по-видимому, связано с неоднократными импульсами магматического очага на фоне процессов сжатия в период формирования суперконтинента Родиния [25].

*Авторы благодарят И.В. Глухана (Россия) за возможность познакомиться с его неопубликованными материалами по пикритам Северного Улытау, мы также выражаем благодарность М. Хакимжанову (Казахстан) за подготовку образцов к лабораторным исследованиям. Мы искренне признательны Д. Муратбаеву (Казахстан) за отбор рудных образцов из силлов пикритов на правом берегу реки Кара-Тургай, что позволило провести минералогическое сопоставление с образцами, любезно предоставленными А.Б. Байбатшой (Казахстан). Особую благодарность приносим Л.Е. Попову (Англия) за критические замечания, полезные дискуссии в процессе написания статьи и за редакцию английского варианта статьи.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан № 0302 / ГФ 4 "Создание базы данных по уникальным, редким и недостаточно изученным минералам месторождений благородных и редких элементов Казахстана для комплексного освоения минерального сырья".*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Михайлов Н.П., Семенов Ю.Л. Каратургайский диабаз-пикритовый комплекс в Казахстане и некоторые вопросы петрологии пикритов // Советская геология. – 1965. – № 3. – С. 43-58.
- [2] Бейсеев О.Б. Сульфидное медно-никель-кобальтовое оруденение в массивах ультраосновных и основных пород бассейна реки Каратургай (Северный Улытау). – Алма-Ата: ОНТИ КазИМСа, 1968. – 55 с.
- [3] Бейсеев О.Б. О геологических основах поисков сульфидных медно-никелевых руд в Северном Улытау // Геология, разведка и методы изучения месторождений полезных ископаемых. – Алма-Ата: КазИМС, 1969. – С. 55-57.
- [4] Вишневецкая И.И., Трусова И.Ф. Западно-Улытауский пояс ультраосновных и основных пород // Геология и разведка. – 1967. – № 11. – С. 32-43.
- [5] Михайлов Н.П., Иняхин М.В., Ляпичев Г.Ф. Петрография Центрального Казахстана. Т. 2: Интрузивные формации основных и ультраосновных пород. – М.: Недра, 1971. – 360 с.
- [6] Бейсеев О.Б., Бейсеев А.О., Альпиев Е.А., Капкимбаев К.К. Геологические и геотехнологические критерии оценки промышленных перспектив новых рудопроявлений цветных, благородных металлов и нерудного сырья Жесказган-Улытауского района как материалов для высоких технологий. Алмазы, золото и благородные металлы. Геоматериалы. – 2010. – С. 137-141.
- [7] Чудин С.С. К проблеме платиноносности недр Казахстана // Горно-Геологический Журнал. – 2012. – № 3-4. – С. 31-32.
- [8] Байбатша А.Б., Досембаева К.Ш., Маманов Е.Ж. Минералогия руд медно-никелевого рудопроявления «Каратургай» // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. – 2015. – № 5. – С. 90-95.
- [9] Михайлов Н.П. Интрузивные офиолитовые комплексы Восточного Казахстана // В кн.: Основные и ультраосновные магматические формации и подвижных поясов. "Труды СЕТЕЙ", нов. сер. – Т. 80. – Л.: Недра, 1962. – С. 109-223.
- [10] Половинкина Ю.И. Основные и ультраосновные породы Карсакая в связи с проблемой генезиса железистых кварцитов. – Гостеолитиздат, 1952. – 87 с.
- [11] Антонок Р.М., Евсеенко Р.Д., Исмаилов Х.К., Маслова И.Г. Проблемы стратиграфии и метаморфизма докембрия и нижнего палеозоя Улытау. – Ч. I: Стратиграфия // Известия НАН РК. Серия геологическая. – 2009. – № 3. – С. 4-18.
- [12] Геологическая карты Казахской ССР, масштаба 1:500 000, серия Центрально-Казахстанская. Объяснительная записка. – Алма-Ата, 1981. – 322 с.
- [13] Степанец В.Г., Левин В.Л., Савельева Н.А., Хакимжанов М., Макат Д.К. Эволюция пикритового магматизма и рудообразование в Улытауском районе центрального Казахстана // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. – 2017. – № 1. – С. 19-36.
- [14] Вишневецкий А.В., Черданцева М.В. Раскристаллизованные капли сульфидного расплава из массива Рудный в С-3 Монголии: модельный объект для изучения распределения и форм нахождения элементов-примесей при кристаллизации природных сульфидных жидкостей // Материалы конференции. Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск РИЦ НГУ, 2014. – С. 10-11.
- [15] Маракушев А.А., Панях Н.А., Маракушев С.А. Сульфидное рудообразование и его углеводородная специализация. – М.: ГЕОС, 2014. – 184 с.

- [16] Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. – СПб.: СПбГУ, 2003. – 487с.
- [17] Cabri L.J., New Data on Phase relations in the Cu-Fe-S System // *Economic Geology*. – 1973. – Vol. 68. P. 443-454.
- [18] Ebel D., Naldrett A.J. Experimental fractional crystallization of Cu- and Ni-bearing Fe-sulfide liquids // *Economic Geology*. – 1996. – Vol. 91. P. 607-621.
- [19] Sugaki A., Kitakaze A. High form Pentlandite and its thermal stability // *American Mineralogist*. – 1998. – Vol. 83. – P. 133-140.
- [20] Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В. и др. Карбонатиты и кимберлиты. – М.: НИИ. – Природа, 2005. – 540 с.
- [21] Craig J.R., Kullerud G. The Cu-Zn-S system // *Carnegie Inst. Wash. Year Book* 67. –1969. P. 177-179.
- [22] Craig J.R. Pentlandite-pyrrhotite and other low-temperature relations in Fe-Ni-S systems // *American Journal of Science*. – 1973. – Vol. 273-A. – P. 496-510.
- [23] Misra K.C., Fleet M.E. The chemical compositions of synthetic and natural pentlandite assemblages // *Econ. Geol.* – 1973. Vol. 68. – P. 518-539.
- [24] Ripley E.M., Li C. Sulfide Saturation in Mafic Magmas: Is External Sulfur Required for Magmatic Ni-Cu-(PGE) Ore Genesis? *Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology*. – 2013. Vol. 108. – P. 45-58.
- [25] Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R., Evans D., Fitzsimons I., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovsky V. How not to build a supercontinent: A reply to J.D.A. Piper. *Precambrian Research*. 2009. 174 (1-2): – P. 208-214.

**В. Г. Степанец<sup>1</sup>, В. Л. Левин<sup>2</sup>, Е. С. Ли<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>RCMIR\_COM. Germany – Russian-community-mir. Company, Germany,

<sup>2</sup>Қ. И. Сатпаев атындағы Геологиялық ғылымдар институты, Алматы, Қазақстан,

<sup>3</sup>Қарағанды мемлекеттік техникалық университеті, Қазақстан

### **СОТУСТІК ҰЛЫТАУДЫҢ ҚАРАТОРҒАЙ КЕШЕНІНІҢ ПИКРИТ СУЛЬФИДЫНДАҒЫ СИРЕК КЕЗДЕСЕТІН ЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ ЖӘНЕ ПЛАТИНОИДТАРДЫҢ ҚҰРАМЫ ЖӘНЕ ФОРМАСЫ**

**Аннотация.** Біздің зерттеулер нәтижесінде қараторғай кешенінің пикритында ертеден белгілі мыс сульфиді, никель, кобальт ( халькопирит, пентландит, кобальтитникелин, герсдорфит) басқа алғаш рет виоларит, сфалерит, зигенит, платина теллуриді (мочейт), күміс теллуриді, қорғасын теллуриді (алтаит), қорғасын селениді, ирид тобының металдарының қатты ерітінділері (Ir, Os, Ru), сирек кездесетін элементтер (Dy, Er, Y, Ce). Сульфидтер үш минералды ассоциация құрайды. Бірінші екі ассоциация домалақ және эллипсті созылған формасы бар ликвациялық «тамшы» құрайды, үшіншісі минералды ассоциация – дұрыс емес өткір-бұрышты формалы шығыстар. Нақытланған, егер перротин, халькопирит, пентландит, виоларит және сфалиттер құралған бірінші ассоциацияның ликвациялық тамшыларында ғана сульфидтің құрамында платиноидтар болады. Екінші ассоциация сульфидтары құрамында платиноидтар жоқ, олар пирротин, халькопирит, сфалеритпен ұсынылған. Үшінші ассоциация сульфидтері пирротин, халькопирит, сфалерит және пиритпен ұсынылған. Барлық минералогиялық ассоциациялар құрамында магнетит бар, олар еределі түрде пикриттер және апопикритті оливиниттер горизонттарына түсталған. Пикритті диабаз құрамында сульфидтердің кірістері анықталған: пентладит, зигенит, миллерит, пирит, галенит. Cu- Ni- (платина топтарының минералдары (ПТМ)) – (сирек кездесетін элементтері СКЭ) қараторғай кен түрінің, сульфидтардың өндірістік массаларының шоғырлануына қолайлы, ашық магматикалық жүйе шегінде пайда болуы нақтыланған.

**Түйін сөздері:** Ұлытау, мыс-никельді кеніштер, платиноидтар, сирек кездесетін элементтер.