

УДК 553.3+549.2+549.3+546.57(470.21)

**О МИНЕРАЛАХ ПЛАТИНЫ, ПАЛЛАДИЯ, СЕРЕБРА И ЗОЛОТА
В ПОРЬЕРЕЧЕНСКОМ ТИТАНОНОСНОМ КОМПЛЕКСЕ
(КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)***

**Ю. Н. Нерадовский, Н. Ю. Грошев, Ю. Л. Войтеховский,
С. В. Бороздина, Е. Э. Савченко**
ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Рассмотрены новые данные о минералах благородных металлов, обнаруженных в составе титаномagnetитовых руд Колвицкого месторождения Порьереченского интрузивного комплекса. Всего описано: 17 минеральных фаз ЭПГ — атоцит Pd_3Sn , звягинцевит Pd_3Pb , инсизваит $PtBi_2$, котульскит $Pd(Te, Bi)$, майченерит $PdBiTe$, меренскиит $(Pd, Pt)(Te, Bi)_2$, мончеит $(Pt, Pd)(Te, Bi)_2$, платина самородная Pt , плюмбопалладинит Pd_3Pb_2 , паоловит Pd_2Sn , полярит $Pd(Bi, Pb)$, соболевскит $PdBi$, станнопалладинит Pd_2Sn_2Cu , минеральные фазы $(Pd, Ag, Bi)_{3+x}Te$ и $(Pd, Ag, Pb)_{3+x}Te$, тетраферроплатина $PtFe$, фрудит $PdBi_2$; 5 минеральных фаз золота и серебра — акантит Ag_2S , купроаурид Cu_3Au , гессит Ag_2Te , серебро Ag , эмпрессит $AgTe$; 2 минеральные фазы с примесями Pt , Pd и Ag — алтаит $PbTe$, иодид свинца PbI_2 . Подобная широкая ассоциация минералов БМ с титаномagnetитовыми рудами подтверждает высокий потенциал (Fe-Ti-V) месторождений в отношении сопутствующих элементов (Cu-Ni-Co), а также (Pt, Pd, Ag, Au).

Ключевые слова:

минералы, платина, палладий, серебро, золото, титаномagnetитовая руда, Колвицкое месторождение.

**MINERALS OF PLATINUM, PALLADIUM, ARGENTUM AND GOLD
OF THE POR'YERENCHENSKY TITAN-BEARING COMPLEX (KOLA PENINSULA)**

**Yury N. Neradovsky, Nikolay Yu. Groshev, Yury L. Voytekhovsky,
Svetlana V. Borozdina, Evgeny E. Savchenko**
Geological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The article considers minerals of precious metals identified in the composition of titanium-magnetite ores of the Kolvitsa deposit within the Por'yerechensky igneous complex. In total, 17 mineral phases of PGE have been described, as follows: atokite Pd_3Sn , zvyagintsevite Pd_3Pb , insizwaite $PtBi_2$, kotulskite $Pd(Te, Bi)$, michenerite $PdBiTe$, merenskyite $(Pd, Pt)(Te, Bi)_2$, moncheite $(Pt, Pd)(Te, Bi)_2$, native platinum Pt , plumbopalladinite Pd_3Pb_2 , paolovite Pd_2Sn , polarite $Pd(Bi, Pb)$, sobolevskite $PdBi$, stannopalladinite Pd_2Sn_2Cu , mineral phases $(Pd, Ag, Bi)_{3+x}Te$ and $(Pd, Ag, Pb)_{3+x}Te$, tetraferroplatinum $PtFe$, froodite $PdBi_2$; and 5 mineral phases of Au and Ag to follow: acanthite Ag_2S , cuproaurite Cu_3Au , hessite Ag_2Te , silver Ag , empressite $AgTe$; and 2 mineral phases with admixtures of Pt , Pd , Ag — altaite $PbTe$ and lead iodide PbI_2 . This association of precious metals with titanium-magnetite ores has been observed for the first time. The authors believe, that it allows referring the Kolvitsa deposit to a new metallogenic object in the Kola Region. It occurred after the precious metal mineralization (Pt, Pd, Ag, Au) had superimposed on the titanium-bearing formation (Fe-Ti-V) with Cu-Ni-Co. In result, such a unique association of complex ores formed, still demanding further research.

Keywords:

minerals, platinum, palladium, silver, gold, titanium-magnetite ore, Kolvitsa deposit.

* Исследования проводились по НИР № 0231-2015-0001, при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-35-20501.

Введение

Порьереченский интрузивный комплекс пород развит в южной части Кольского п-ова. Интрузии прорывают гранулиты Лапландско-Колвицкого пояса, образуя цепь массивов северо-западного простирания протяженностью более 20 км, севернее крупного Колвицкого массива анортозитов. В состав комплекса входит более 15 массивов, сложенных среднезернистыми пироксенитами, перидотитами и оливинитами, относящимися к клинопироксенит-верлитовой формации [1]. В наиболее крупном интрузиве геолого-разведочными работами выявлено Колвицкое месторождение титаномагнетитовых руд [2]. Главные минералы руд изучены в процессе исследований последних лет [3–5 и др.]. Особый интерес вызывали данные о возможном присутствии в титаномагнетитовых рудах платинометалльной минерализации [6]. Они были подтверждены находками 10 минералов благородных металлов, в т. ч. 7 минералов платины и палладия и 3 минералов серебра и золота [7, 8]. Дальнейшие исследования привели к обнаружению еще 13 минеральных фаз благородных металлов (БМ). Общее количество минеральных фаз этой группы в титаномагнетитовых рудах достигло 24, что ставит месторождение в лидеры по разнообразию минералов БМ среди месторождений подобного типа в мире. В настоящей работе рассмотрены все минеральные фазы платины, палладия, серебра и золота, установленные в титаномагнетитовых рудах и вмещающих породах второй интрузивной фазы. Ввиду мелких размеров зерен все минералы благородных металлов выявлены исключительно с помощью сканирующего электронного микроскопа. Оценочный анализ фаз проведен с использованием рентгеновского энергодисперсионного спектрометра Bruker XFlash-5010, установленного на СЭМ LEO-1450, нестандартным методом при помощи программы QUANTAX-200. Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 500 pA. Аналитик Е. Э. Савченко.

Результаты исследований

Минералы Pt и Pd

Атокит Pd₃Sn — встречается в виде включений в ильмените, халькопирите и пироксене. Размеры зерен до 6 мкм. Формы выделений: неправильные и частично ограненные зерна и прожилки. Pt-содержащий атокит наблюдается в сростках с платиновыми фазами — инсизваитом и тетраферроплатиной (рис. 1, а) и в сростаниях с стехиометричным атокитом (рис. 1, б). Химический состав атокита непостоянен, наблюдаются примеси Pt, Au, Pb, Fe, Cu (табл. 1).

Звягинцевит Pd₃Pb — встречается в виде вкраплений в сульфидах меди — халькопирите и кубаните (рис. 2), реже — в жилках по пироксену (рис. 3). Размеры зерен до 15 мкм. Формы зерен неправильные, иногда с огранкой. В жилах звягинцевит ассоциирует с поляритом, а во вкрапленниках в сульфидах — с соболевскитом и тетраферроплатиной (рис. 4). Морфология жил соответствует метасоматическим образованиям. Сростки имеют весьма сложную структуру, которая характерна для последовательно кристаллизовавшихся фаз. Химический состав звягинцевита неустойчив, наблюдается примесь Au, Bi, Sn и Hg (табл. 1).

Таблица 1

Результаты исследования химического состава минералов Pt и Pd

| Минерал | Pt | Pd | Rh | Ir | In | Ag | Au | Pb | Fe | Cu | Ni | As | Sb | Bi | Te | Sn | Hg | Σ |
|-------------|-------|-------|------|------|----|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|-----|
| Алоцит | - | 68,67 | - | - | - | - | 3,56 | 3,44 | - | - | - | - | - | - | - | 24,54 | - | 100 |
| | 36,06 | 41,51 | - | - | - | - | 7,17 | 2,05 | - | - | - | - | - | - | - | 13,21 | - | 100 |
| | 25,58 | 30,82 | - | - | - | - | - | - | 2,73 | 13,2 | 0,28 | - | - | - | - | 25,37 | - | 100 |
| | 14,00 | 50,09 | - | - | - | - | - | 1,87 | - | 7,93 | - | - | - | - | - | 26,12 | - | 100 |
| Звяглицевит | 4,84 | 60,46 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 34,70 | - | 100 |
| | - | 59,57 | - | - | - | - | - | 40,43 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| | - | 59,89 | - | - | - | - | - | 40,11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| | - | 59,29 | - | - | - | - | - | 40,71 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| | - | 59,44 | - | - | - | - | - | 40,56 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| | - | 60,14 | - | - | - | - | - | 36,78 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3,09 | 100 |
| | - | 59,82 | - | - | - | - | 0,84 | 34,42 | - | - | - | - | - | - | - | - | 4,92 | 100 |
| | - | 59,86 | - | - | - | - | 0,42 | 34,87 | - | - | - | - | - | - | 4,38 | - | 0,47 | 100 |
| | - | 58,58 | - | - | - | - | 1,44 | 35,49 | - | - | - | - | - | - | 2,66 | - | 1,83 | 100 |
| | - | 62,59 | - | - | - | - | 0,69 | 25,48 | - | - | - | - | - | - | 5,26 | - | 0,35 | 100 |
| Инсизваит | 29,91 | 2,16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 62,96 | 4,97 | - | - | 100 |
| | 28,00 | 4,80 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 65,10 | - | 2,10 | - | 100 |
| Копульскит | - | 38,12 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 37,11 | 24,77 | - | - | 100 |
| | 13,12 | 21,27 | - | - | - | 2,43 | - | - | - | - | 0,28 | - | - | 36,81 | 26,09 | - | - | 100 |
| | 4,56 | 20,15 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,86 | 41,83 | 32,51 | - | - | 100 |
| Майченерит | 2,15 | 21,47 | 0,72 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,11 | 1,29 | 48,83 | 29,43 | - | - | 100 |
| Меренскиит | 12,19 | 15,30 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,42 | - | - | 9,96 | 61,13 | - | - | 100 |
| | 12,21 | 17,07 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,33 | - | - | 9,86 | 60,53 | - | - | 100 |
| Мончегит | 35,93 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 17,80 | 46,27 | - | - | 100 |
| | 33,59 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 17,31 | 49,10 | - | - | 100 |
| | 30,89 | 2,82 | 0,91 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 11,72 | 53,65 | - | - | 100 |
| | 31,35 | 2,87 | 1,56 | - | - | 0,18 | - | 2,66 | - | - | - | - | - | 2,13 | 59,25 | - | - | 100 |
| | 35,50 | 1,10 | 0,94 | - | - | - | - | 1,18 | - | - | - | - | - | 1,42 | 59,87 | - | - | 100 |
| | 31,21 | 2,10 | 2,64 | 2,45 | - | 0,02 | - | 1,17 | - | - | - | - | - | 0,98 | 59,42 | - | - | 100 |

Продолжение таблицы 1

| Минерал | Pt | Pd | Rh | Ir | In | Ag | Au | Pb | Fe | Cu | Ni | As | Sb | Bi | Te | Sn | Hg | Σ |
|-----------------|-------|-------|------|----|------|-------|------|-------|-------|-------|------|----|------|-------|-------|-------|------|-----|
| Платина | 92,68 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,52 | - | - | - | - | 6,8 | - | 100 |
| Плюмбопалладинг | - | 44,69 | - | - | - | - | - | 51,31 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| Пасовит | - | 64,92 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 35,08 | - | 100 |
| Полярит | - | 42,23 | - | - | - | - | - | 11,02 | - | - | - | - | - | 46,76 | - | - | - | 100 |
| | - | 33,71 | - | - | - | - | 0,26 | 18,51 | - | - | - | - | - | 47,37 | - | - | 0,15 | 100 |
| | - | 59,10 | - | - | - | - | - | 13,03 | - | - | - | - | - | 18,68 | - | - | 9,20 | 100 |
| | - | 53,31 | - | - | - | - | 2,02 | 18,00 | - | - | - | - | - | 22,67 | - | - | 3,20 | 100 |
| Соболевскит | 2,18 | 34,30 | 1,22 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 60,14 | 0,46 | 1,71 | - | 100 |
| | - | 35,30 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 63,86 | 0,84 | - | - | 100 |
| | - | 32,87 | 1,26 | - | - | - | - | 5,48 | - | - | - | - | - | 69,93 | - | - | 0,46 | 100 |
| | - | 21,32 | 1,51 | - | - | - | - | 1,58 | - | - | - | - | 1,47 | 71,12 | - | - | - | 100 |
| | - | 44,72 | 1,27 | - | - | - | - | 1,92 | - | - | - | - | - | 52,09 | - | - | - | 100 |
| | - | 36,42 | 1,29 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 62,30 | - | - | - | 100 |
| Станнопалладинг | - | 56,86 | - | - | 3,31 | - | 0,93 | 11,40 | - | 9,49 | - | - | - | 2,83 | - | 12,66 | 2,50 | 100 |
| | - | 54,83 | - | - | 1,34 | - | 1,90 | 15,50 | - | 8,93 | - | - | - | 7,40 | - | 6,73 | 2,31 | 100 |
| | - | 57,24 | - | - | - | - | 4,99 | 14,07 | - | 8,04 | - | - | - | 6,96 | - | 7,35 | 1,35 | 100 |
| | - | 59,08 | - | - | 3,76 | - | - | - | - | 11,70 | - | - | - | - | - | 25,44 | - | 100 |
| | - | 39,29 | - | - | - | - | 1,13 | - | 12,32 | - | - | - | - | 18,75 | 28,51 | - | - | 100 |
| МФ-1 | - | 39,07 | - | - | - | 0,68 | - | 11,15 | - | - | - | - | - | 20,55 | 28,55 | - | - | 100 |
| | - | 39,39 | - | - | - | - | - | 10,85 | - | - | - | - | - | 23,44 | 26,33 | - | - | 100 |
| | - | 39,66 | - | - | - | - | - | 12,78 | - | - | - | - | - | 19,66 | 27,91 | - | - | 100 |
| | - | 38,13 | - | - | - | 2,70 | - | 11,51 | - | - | - | - | - | 21,73 | 25,93 | - | - | 100 |
| | - | 39,15 | - | - | - | - | - | 11,08 | - | - | - | - | - | 22,25 | 27,52 | - | - | 100 |
| МФ-2 | 8,73 | 36,96 | - | - | - | 11,90 | - | 14,66 | - | - | - | - | - | - | 27,75 | - | - | 100 |
| | - | 40,00 | - | - | - | 15,38 | - | 13,53 | - | - | - | - | - | - | 29,31 | 1,79 | - | 100 |
| | - | 35,36 | - | - | - | 23,69 | - | 14,18 | - | - | - | - | - | - | 26,77 | - | - | 100 |
| | - | 36,93 | - | - | - | 20,96 | - | 14,74 | - | - | - | - | - | - | 27,37 | - | - | 100 |
| | - | 38,44 | - | - | - | 15,34 | - | 15,44 | - | - | - | - | - | 30,78 | - | - | 100 | |

Окончание таблицы 1

| Минерал | Pt | Pd | Rh | Ir | In | Ag | Au | Pb | Fe | Cu | Ni | As | Sb | Bi | Te | Sn | Hg | Σ |
|--------------------|-------|-------|------|----|----|-------|------|-------|-------|------|------|----|-------|-------|-------|------|-----|-----|
| МФ-2 | - | 40,23 | - | - | - | 10,21 | - | 14,56 | - | - | - | - | - | - | 33,26 | 1,75 | - | 100 |
| | - | 35,57 | - | - | - | 22,05 | - | 13,93 | - | - | - | - | - | 2,06 | 26,40 | - | - | 100 |
| | - | 37,86 | - | - | - | 14,42 | - | 17,72 | - | - | - | - | - | - | 30,00 | - | - | 100 |
| | - | 35,84 | - | - | - | 9,25 | - | 19,38 | - | - | - | - | - | - | 35,52 | - | - | 100 |
| | - | 38,01 | - | - | - | 15,11 | - | 15,62 | - | - | - | - | - | 2,23 | 29,03 | - | - | 100 |
| Тетраферро-платина | - | 36,69 | - | - | - | 17,29 | 0,75 | 15,77 | - | - | - | - | - | 1,20 | 28,28 | - | - | 100 |
| | 78,34 | - | - | - | - | - | - | - | 17,82 | 1,69 | 2,15 | - | - | - | - | - | - | 100 |
| | 71,56 | 3,95 | - | - | - | - | - | - | 20,72 | 3,80 | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| Фрудит | 70,14 | - | - | - | - | - | - | - | 23,43 | 6,43 | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| | - | 23,65 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 75,01 | - | 1,34 | - | 100 |
| | - | 19,61 | 0,77 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 79,61 | - | - | - | 100 |
| | - | 20,60 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 79,40 | - | - | - | 100 |
| | - | 20,84 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 79,16 | - | - | - | 100 |
| - | 20,13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 79,87 | - | - | - | 100 | |

Примечание. Здесь и далее в таблицах: исследование проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO-1450 с энергодисперсионным спектрометром Bruker XFlash-5010.

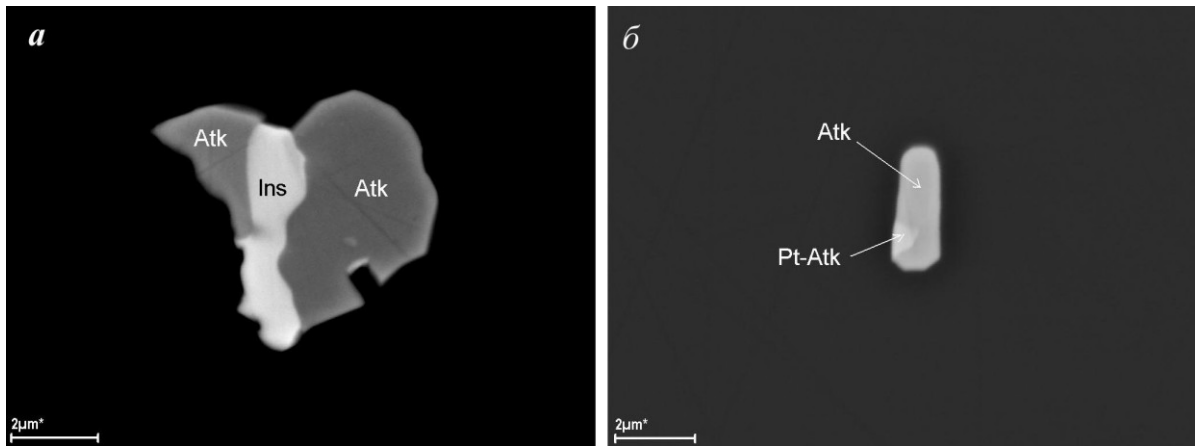


Рис. 1. Формы зерен атокита (Atk) и инсизвайта (Ins), на атоките видны многочисленные грани: а — сросток Pt-атокита с инсизвайтом; б — сросток атокита с Pt-атокитом. Здесь и далее изображение в отраженных электронах СЭМ LEO-1450

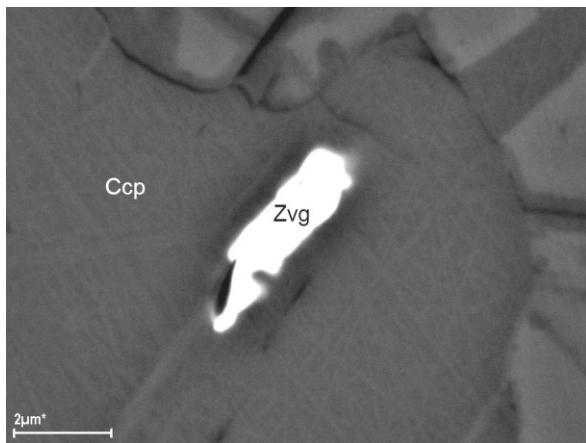


Рис. 2. Включение звягинцевита (Zvg) в халькопирите (Ccp)

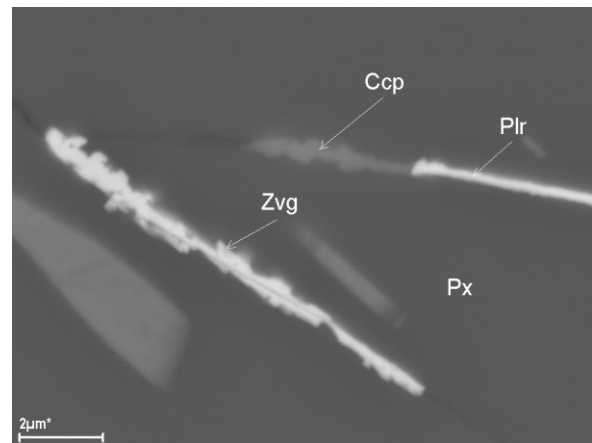


Рис. 3. Выделение звягинцевита (Zvg) полярита (Plr) и халькопирита (Ccp) в трещинах по пироксену (Px)

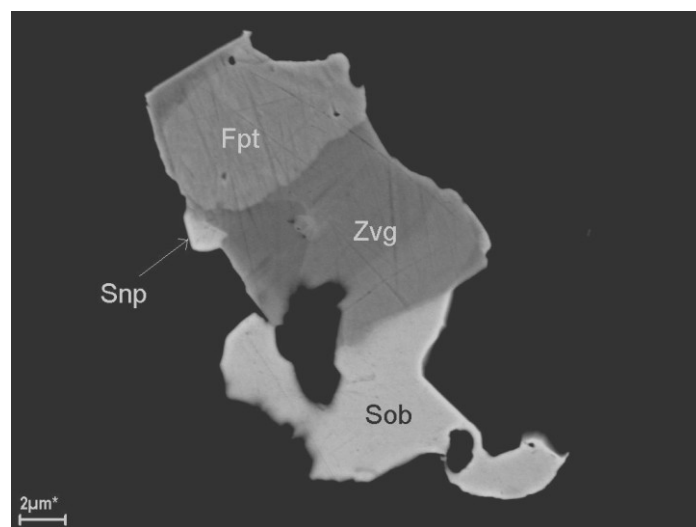


Рис. 4. Сросток звягинцевита (Zvg) с соболевскитом (Sob), тетраферроплатиной (Fpt) и станнопалладинитом (Snp). Видна неоднородность состава звягинцевита

Инсизваит $PtBi_2$ — встречается в виде включений в халькопирите (рис. 1, а) и в сростках с атокитом. Формы зерен неправильные, размеры до 6 мкм. Химический состав, мас. %: Pt — 28,0–29,91; Bi — 62,96–65,10; примеси: Pd — 2,16–4,80; Te — 4,97; Sn — 2,1.

Котульскит Pd (Te, Bi) — обнаружен в виде включений в халькопирите и борните (рис. 5). Размер зерен 1–2 мкм. Форма неправильная. Выделение котульскита приурочено к границе замещения халькопирита борнитом, возможно, отложение котульскита произошло в связи с этим событием. В химическом составе котульскита присутствует примесь Pt, Ag, Ni и Sb (табл. 1).

Майченерит $PdBiTe$ — встречается в виде включений в халькопирите, в сростках с Au-серебром и галенитом (рис. 6). Форма зерен неправильная. Размеры зерен менее 2 мкм. Химический состав, мас. %: Pd — 21,47; Bi — 43,83; Te — 29,43; примеси: Pt — 2,15; Rh — 0,72; As — 1,11; Sb — 1,29.

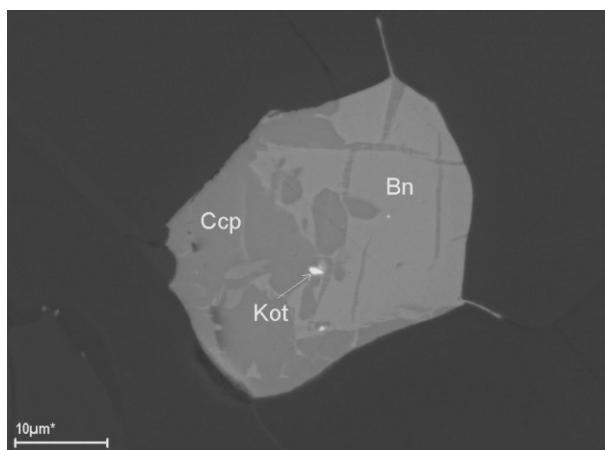


Рис. 5. Зерно котульскита (Kot) в халькопирите (Ccp) с борнитом (Bn)

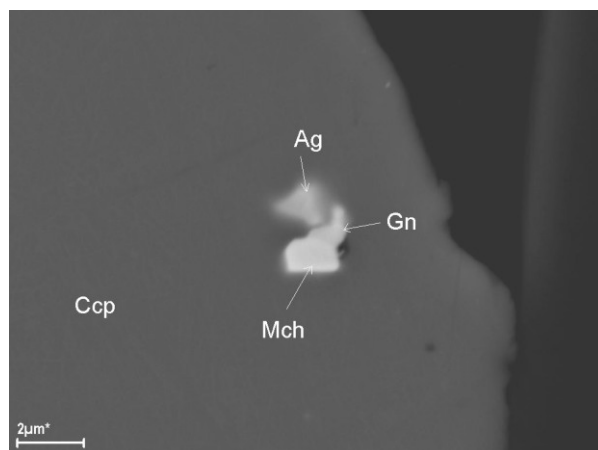


Рис. 6. Сросток майченерита (Mch) с Au-серебром (Ag) и галенитом (Gn) в халькопирите (Ccp)

Меренскиит (Pd, Pt) (Te, Bi)₂ — развит исключительно вне вкрапленников сульфидов, в трещинах, где ассоциирует с халькопиритом, пентландитом (рис. 7, 8). Форма зерен неправильная, чешуйчатая, угловатая, овальная, иногда с прямоугольными контурами, возможно, ограниченная. Размеры зерен преимущественно 1–2 мкм, отдельные зерна до 3 мкм, прожилки по длине до 10 мкм. В химическом составе характерна примесь никеля (табл. 1).

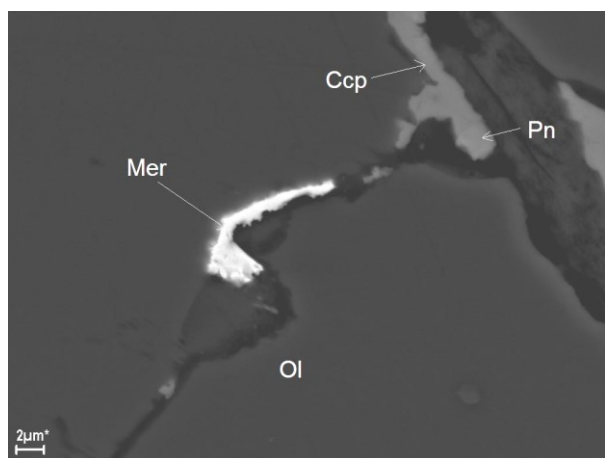


Рис. 7. Выделение меренскиита (Mer) в жилке с халькопиритом (Ccp) и пентландитом (Pn) по оливину (Ol)

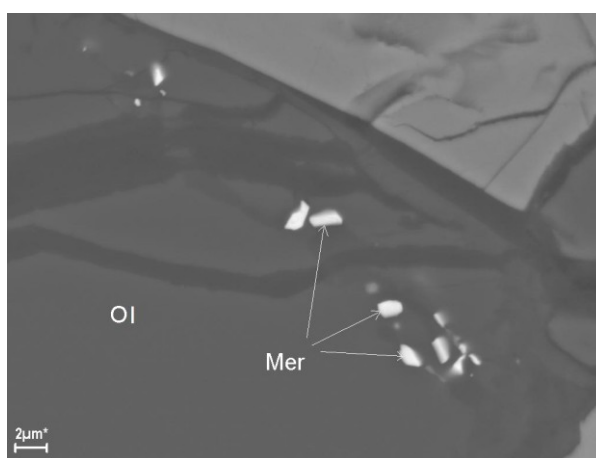


Рис. 8. Цепочка зерен меренскиита (Mer) в жилке позднего силиката по оливину (Ol)

Мончеит (Pt, Pd) (Te, Bi)₂ — встречается преимущественно в прожилках, пронизывающих породы с сульфидной вкрапленностью, редко образует включения на краю вкрапленников халькопирита. В прожилках ассоциирует с халькопиритом, алтаитом, гесситом (рис. 9, а) и минеральной фазой 1 (МФ-1) (рис. 9, б). Формы зерен линзовидные, чешуйчатые, пластинчатые. Размеры зерен до 4 мкм, прожилков до 10 мкм. Химический состав неустойчивый, присутствуют примеси Pd, Rh, Ir, Ag, Pb, Bi (табл. 1).

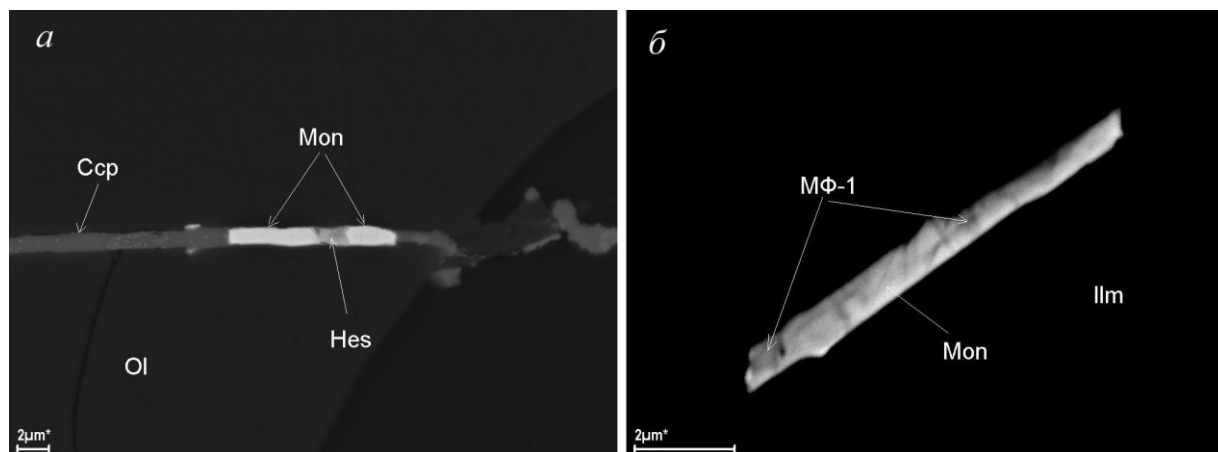


Рис. 9. Выделение мончеита (Mon) в прожилке: а — с халькопиритом (Ccp) и гесситом (Ges) по оливину (Ol); б — с минеральной фазой 1 (МФ-1) по ильмениту (Ilm)

Платина Pt — встречается в виде включений в халькопирите. Формы зерен неправильные (рис. 10, а). Размеры менее 2 мкм. Химический состав, мас. %: Pt — 92,68; Ni — 0,52; Sn — 6,8 (табл. 1).

Плюмбопалладинит Pd₃Pb₂ — встречается в виде включений в кубаните (рис. 10, б). За пределами вкрапленников не наблюдался. Размеры выделения менее 2 мкм. Форма зерна округлая, каплеобразная, с одной стороны плоская, примыкает к пластинке халькопирита. Выделение минерала произошло, вероятно, в период распада твердого раствора

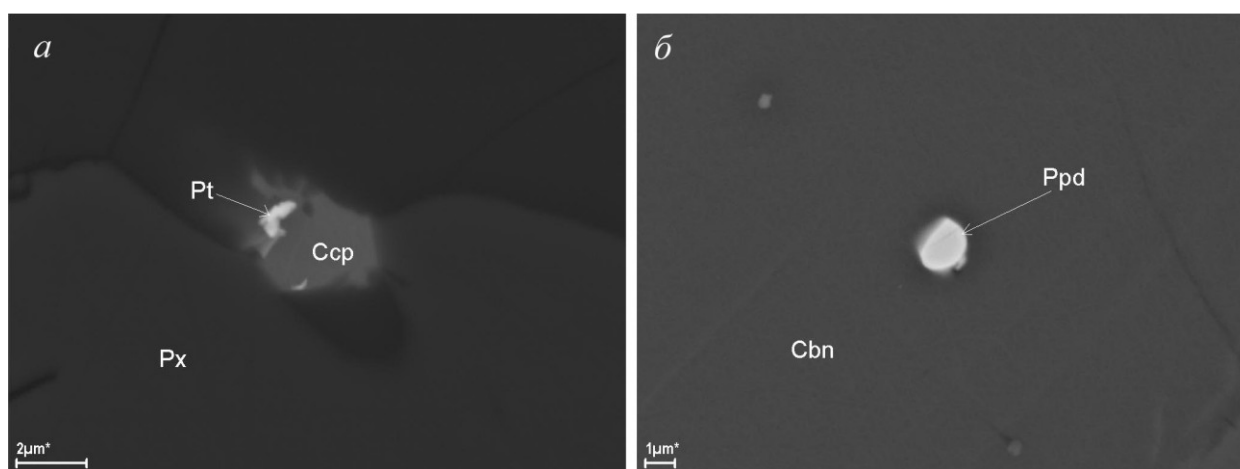


Рис. 10. Форма выделения: а — платины (Pt) с халькопиритом (Ccp) в пироксене (Px); б — плюмбопалладинита (Ppd) в кубаните (Cbn)

Паоловит Pd_2Sn — обнаружен в виде включения в кубаните, являющемся продуктом распада твердого раствора кубанит-халькопирит. Размеры зерна паоловита — 1×3 мкм, форма линзовидная (рис. 11). Химический состав, мас. %: Pd — 64,92; Sn — 35,08 (табл. 1).

Полярит $Pd(Bi, Pb)$ — встречается в жилках по трещинам, секущим титаномагнетитовую руду и вкрапленное сульфидное оруденение (рис. 3, 12), и во включениях в халькопирите. В жилках ассоциирует с поздним халькопиритом, во включениях — со станнопалладинитом. Размеры выделений полярита менее 2 мкм, в жилках — до 8 мкм.

Химический состав приведен в табл. 1, отмечается примесь Pb, Au и Hg.

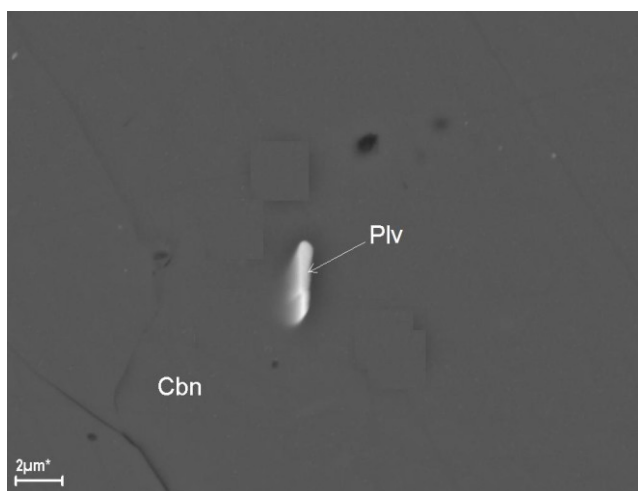


Рис. 11. Включение паоловита (Plv) в кубаните (Cbn)

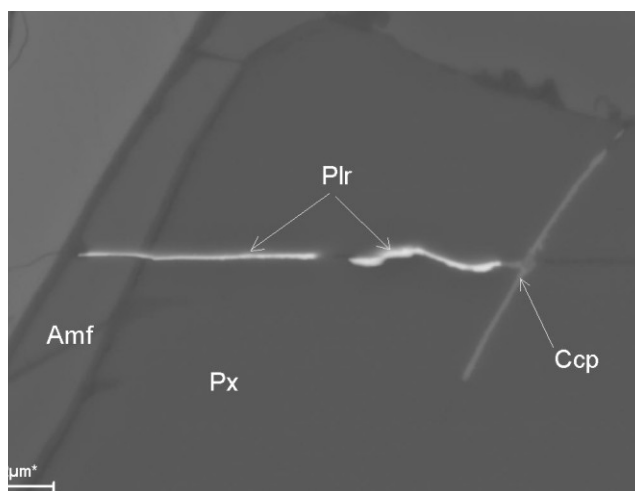


Рис. 12. Пржилки полярита (Plr) и халькопирита (Ccp) в трещинах, секущих пироксен (Px) и амфибол (Amf)

Соболевскит $PdBi$ — встречается часто в разных ассоциациях; образует жилки, секущие пироксен и титаномагнетит, вкрапления в халькопирите, клинопироксене и шпинели (рис. 13). Ассоциирует с купроауридом, звягинцевитом, тетраферроплатиной и фрудитом (рис. 4). Формы зерен в жилах — линзовидные, во вкрапленниках — изометрические неправильные, на отдельных видны плоские поверхности, возможно, грани.

Размеры зерен в основном меньше 1–2 мкм, единичные достигают 15–20 мкм, жилки до 7 мкм. Химический состав дан в табл. 1. Следует отметить большое число примесей Pt, Rh, Pb, Te, Sb, Sn, Hg.

Станнопалладинит Pd_2Sn_2Cu — развит во включениях в халькопирите, где он образует сложные комплексные сростки с звягинцевитом, тетраферроплатиной, соболевскитом (рис. 4) и поляритом (рис. 14). Непосредственные срастания наблюдаются с звягинцевитом и поляритом. Формы зерен изометрические, сложные, частично ограниченные. Размеры выделений — 2–5 мкм. В составе примеси Au и In (табл. 1).

Минеральные фазы (МФ) $(Pd, Pb, Bi)_{3+x}Te-(Pd, Pb, Ag)_{3+x}Te$. Среди минеральных фаз палладия выявлены необычные по составу фазы, в которых при постоянном содержании палладия, теллура и свинца наблюдается периодически висмут (МФ-1) или серебро (МФ-2) (табл. 1). При этом в висмутовой разновидности эпизодически присутствует серебро, а в серебряной — висмут, золото, платина и олово.

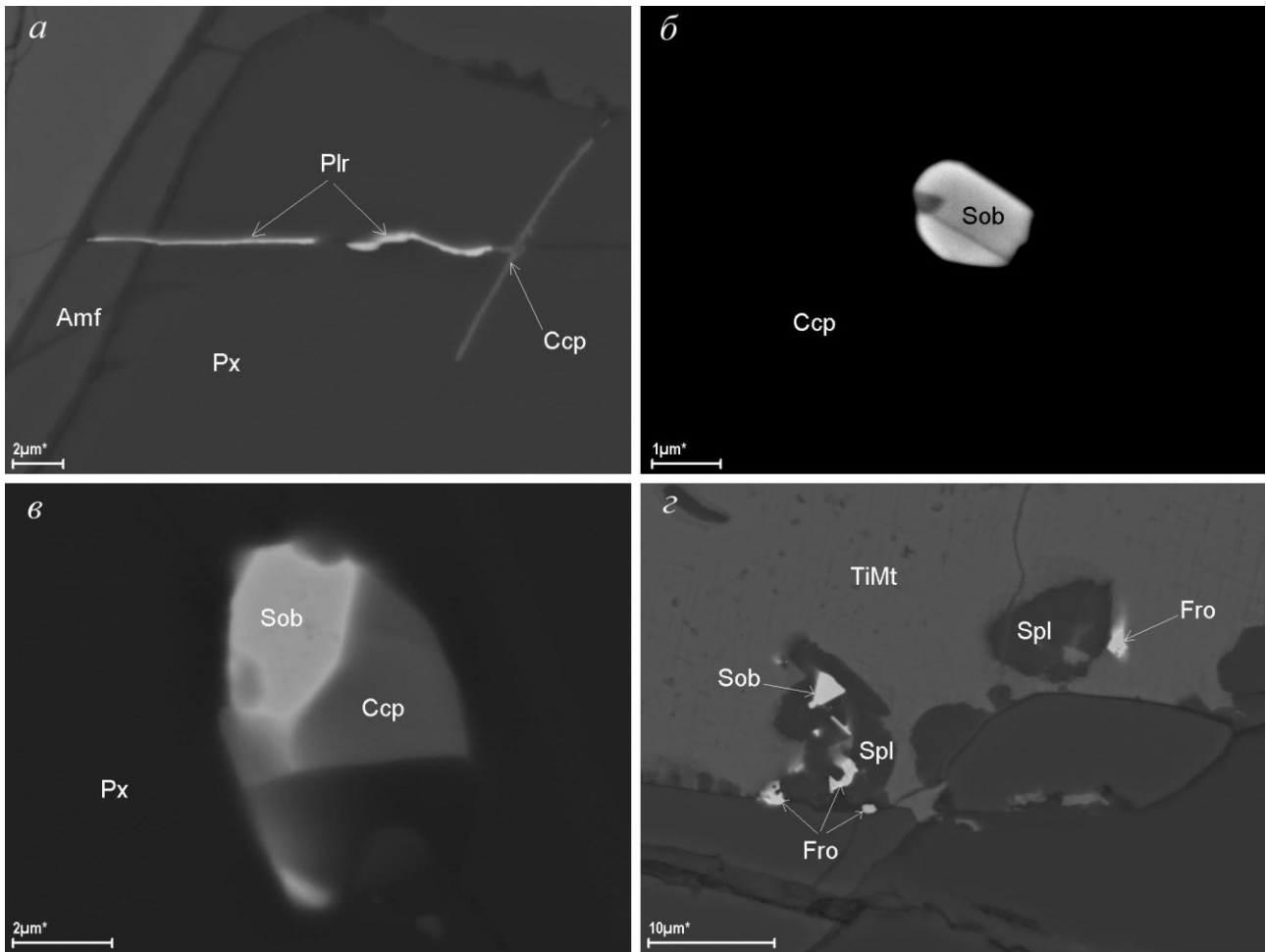


Рис. 13. Формы выделения соболевскита (Sob) в прожилке по титаномагнетиту (TiMt) (а) и во вкрапленниках: б — в халькопирите (Ccp), в — с халькопиритом в пироксене (Px), з — со шпинелью (Spl) и фрудитом (Fro) в титаномагнетите

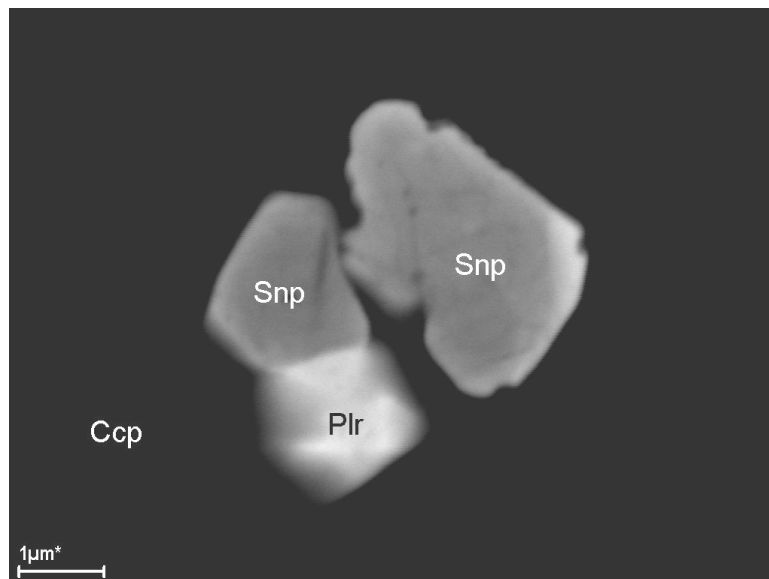


Рис. 14. Сrostок станнопалладинита (Snp) с поляритом (Plr) в халькопирите (Ccp)

Обе фазы встречаются часто и обычно образуют сростки между собой, в которых висмутовая фаза является более ранней. Приближенный расчет химического состава фаз наиболее удовлетворительно отвечает формулам $(Pd,Pb,Bi)_{3+x}Te$ или $(Pd, Pb, Ag)_{3+x}Te$. Выделение рассматриваемых фаз, как правило, контролируется трещинами, секущими силикатные минералы породы (рис. 15), но отложение происходило и в сульфидной вкрапленности. Зерна нередко ограненные, особенно при кристаллизации в сульфидах — халькопирите, кубаните и троилите. Встречаются изометрические (рис. 16) и таблитчатые кристаллы размером до 2–3 мкм. Преобладают сростки фаз в виде неправильных агрегатов, подчиненных структуре вмещающей полости (рис. 17, а). В сростках серебряная фаза нарастает на висмутовую, обрамляет ее (рис. 17, б); в свою очередь, на серебряную фазу нарастает Au-серебро. Рассматриваемые фазы требуют дальнейшего изучения.

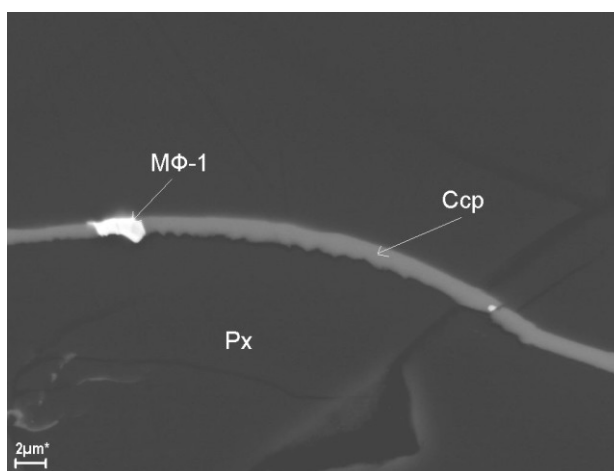


Рис. 15. Выделение минеральной фазы 1 (MФ-1) в жилке с халькопиритом (Ccp), секущей пироксен (Px)

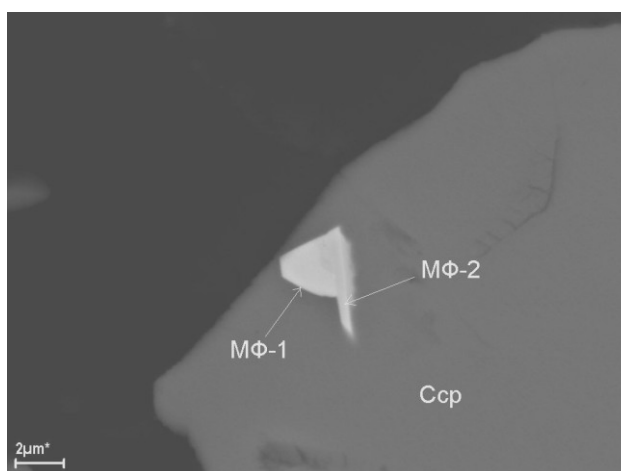


Рис. 16. Сросток минеральных фаз 1 и 2 (MФ-1 и MФ-2) в халькопирите (Ccp), видна огранка кристалла MФ-1

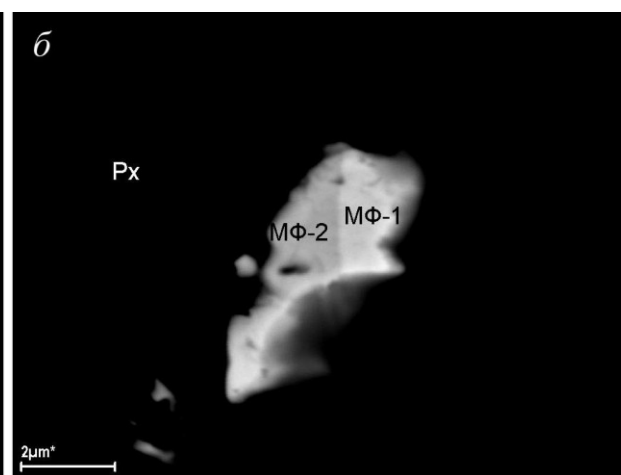
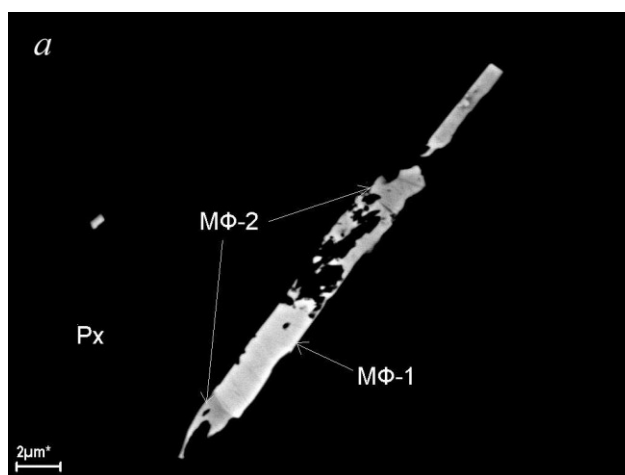


Рис. 17. Сросток минеральных фаз 1 и 2 (MФ-1 и MФ-2): а — в жилке по пироксену (Px); б — в пироксене (Px)

Тетраферроплатина PtFe — встречается в жилках по трещинам и во вкрапленниках сульфидов, в частности в халькопирите. В халькопирите тетраферроплатина присутствует в мономинеральных зернах и в сростках с звягинцевитом, соболевскитом и станнопалладинитом

(рис. 4; 18, *a*). В жилках по пироксену тетраферроплатина образует сростки с Pt-содержащим атоцитом (рис. 18, *б*). Формы зерен тетраферроплатины неправильные. Размеры зерен от 0,5 до 10 мкм. Химический состав приведен в табл. 1.

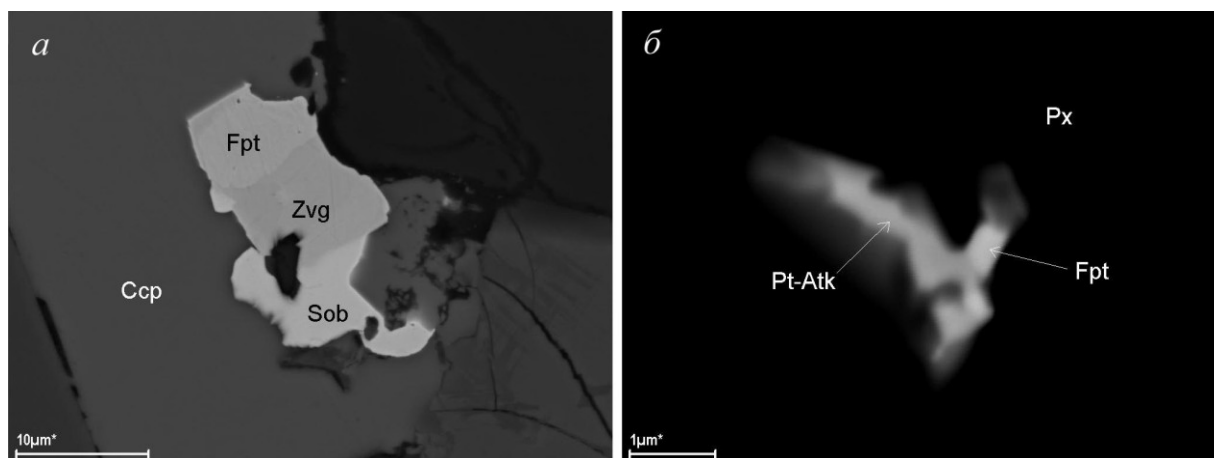


Рис. 18. Сросток тетраферроплатины (Fpt): *a* — с звыгинцевитом (Zvg) и соболевитом (Sob) в халькопирите (Ccp); *б* — с Pt-содержащим атоцитом (Pt-Atk) в пироксене (Px)

Фрудит $PdBi_2$ — образует мелкие зерна в трещинах, секущих силикаты и титаномagnetит (рис. 19). Размеры зерен — менее 2 мкм, формы — неправильные, угловатые, линзовидные, пластинчатые, частично подчинены форме трещин, но также имеют и собственные формы роста в трещинах с замещением вмещающего минерала. Характерны цепочки зерен вдоль открытых и закрытых трещин. Ассоциирует с самородным висмутом, галенитом и акантитом. Отложение всей ассоциации произошло позднее распада твердого раствора титаномagnetита. Химический состав фрудита стабилен, эпизодически присутствует примесь Rh и Sn (табл. 1).

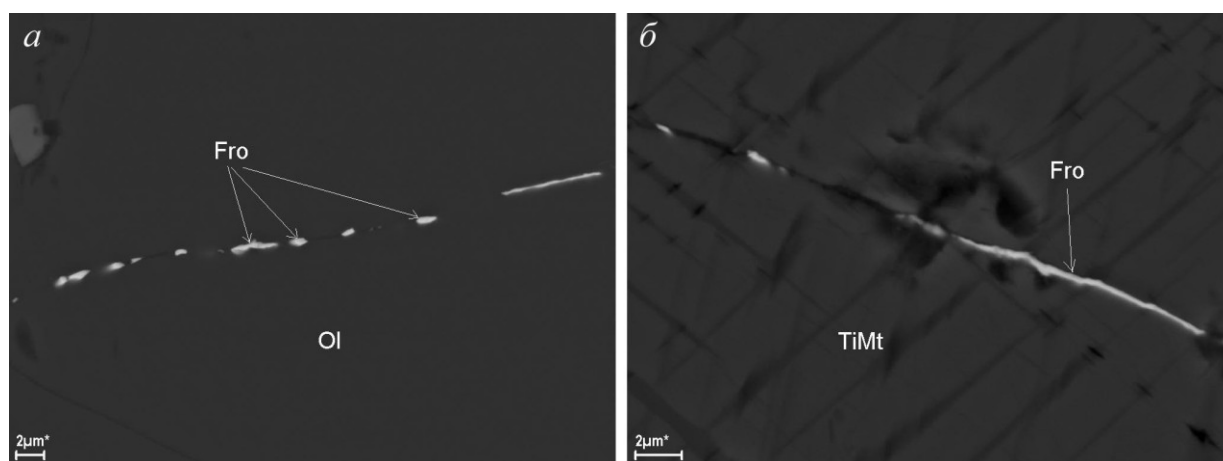


Рис. 19. Цепочки зерен фрудита (Fro) в прожилках по оливину (Ol) (*a*) и титаномagnetиту (TiMt) (*б*)

Минералы Ag и Au

Акантит Ag_2S — обнаружен в виде включения в сульфидном вкрапленнике в ассоциации с пирротинном, пентландитом и халькопиритом (рис. 20). Размеры выделения — до 5 мкм, формы — неправильные, с признаками замещения пирротина и пентландита. Химический состав близок стехиометрическому, мас. %: Ag — 88,39; S — 11,61 (табл. 2).

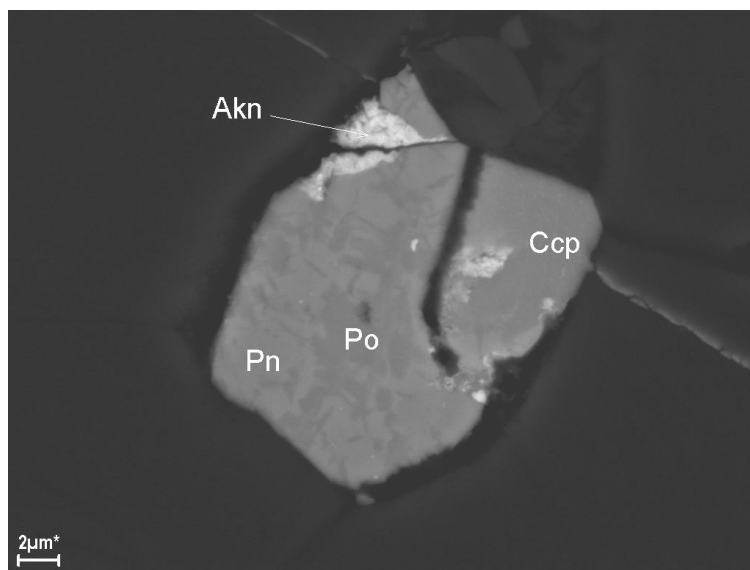


Рис. 20. Выделение акантита (Akn) в сульфидном вкрапленнике в ассоциации с пирротинном (Po), пентландитом (Pn) и халькопиритом (Ccp)

Таблица 2

Результаты исследования химического состава минералов Au и Ag

| Минерал | Pd | Ag | Au | Fe | Cu | S | Te | Σ |
|-----------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Акантит | – | 88,39 | – | – | – | 11,61 | – | 100 |
| Тетрааурикуприд | 13,01 | | 57,96 | – | 29,00 | – | – | 99,97 |
| Гессит | – | 57,47 | – | – | – | – | 42,53 | 100 |
| | – | 62,64 | – | – | – | – | 37,36 | 100 |
| | – | 61,90 | – | – | – | – | 38,10 | 100 |
| | – | 61,12 | – | – | – | – | 38,88 | 100 |
| | – | 60,89 | – | – | – | – | 39,11 | 100 |
| | – | 59,57 | – | – | – | – | 40,43 | 100 |
| | – | 60,41 | – | – | – | – | 39,59 | 100 |
| | – | 60,22 | – | – | – | – | 39,78 | 100 |
| | – | 59,33 | – | – | – | – | 40,67 | 100 |
| | – | 61,31 | – | – | – | – | 38,69 | 100 |
| Au-серебро | – | 62,50 | 34,96 | – | 2,54 | – | – | 100 |
| | – | 73,58 | 26,42 | – | – | – | – | 100 |
| | – | 71,00 | 28,44 | 0,56 | – | – | – | 100 |
| | 0,40 | 73,55 | 26,05 | – | – | – | – | 100 |
| | – | 61,26 | 38,74 | – | – | – | – | 100 |
| | – | 69,97 | 30,03 | – | – | – | – | 100 |
| | – | 57,45 | 42,55 | – | – | – | – | 100 |
| Эмпрессит | – | 37,86 | – | – | – | – | 62,14 | 100 |

Купроаурид Cu_3Au — встречается в жилках, секущих пироксен (рис. 21), где ассоциирует с соболевскитом. По составу относится к Pd-содержащему купроауриду [9]). Формы зерен линзовидные, размеры по толщине линз — около 1 мкм, по удлинению — до 3 мкм. Химический состав, мас. %: Pd — 13,01; Au — 57,96; Cu — 29,0 (табл. 2).

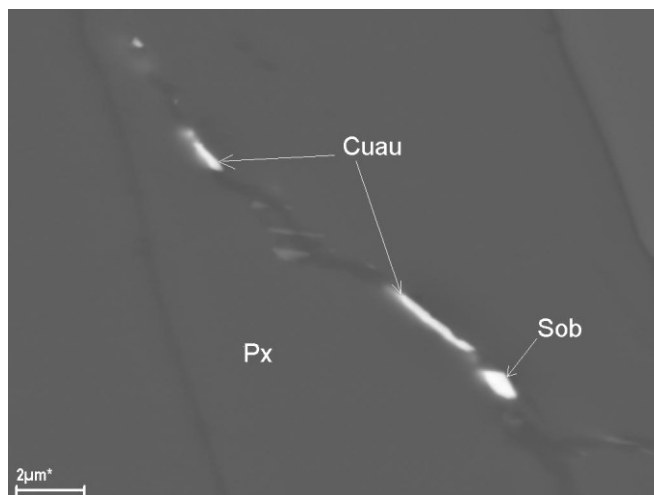


Рис. 21. Выделение купроаурида (Cuau) и соболевскита (Sob) в трещине по пироксену (Px)

Гессит Ag_2Te — один из наиболее часто встречающихся минералов серебра в титаномагнетитовых рудах. Наблюдается в жилах (рис. 22, *а*) и включениях в сульфидной вкрапленности (рис. 22, *б*). Часто находится в сростках с мончеитом, реже с Au-серебром и молибденитом. Выделения гессита ассоциируют с поздней генерацией сульфидов. Формы выделения гессита неправильные, округлые, линзовидные, характерны высыпки зерен вдоль трещин. Размеры выделений менее 6 мкм. Химический состав гессита представлен в табл. 2.

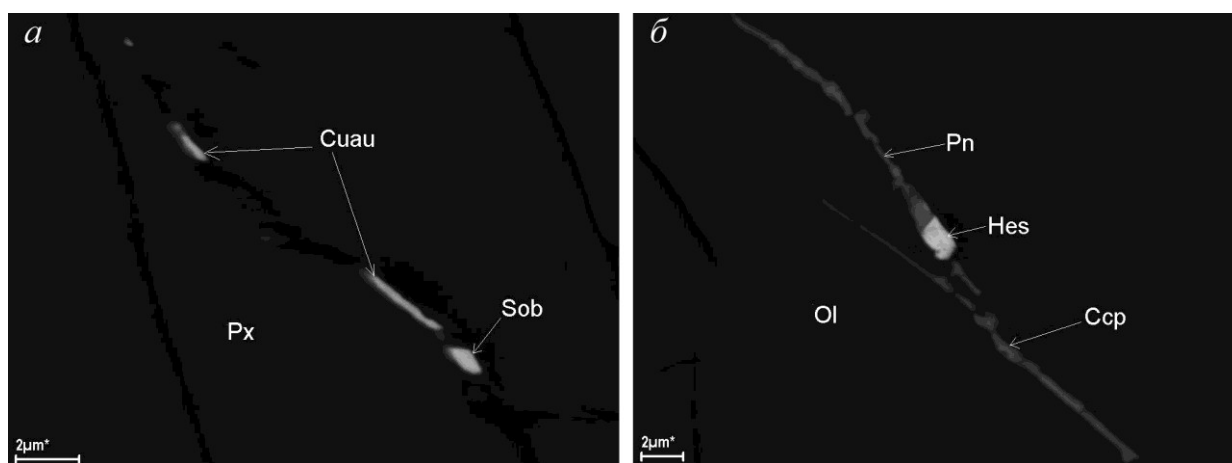


Рис. 22. Выделение гессита (Hes):

а — в жилке с халькопиритом (Csp) и пентландитом (Pn) по оливину (Ol); *б* — в кубаните (Cbn)

Серебро Ag_3Au — с примесью золота от 26 до 42,5 % (табл. 2) распространено довольно широко. Выделялось одним из последних. Встречается чаще обособленно (рис. 23), реже в сростании с платиноидами, в частности с минеральной фазой 2, на которую нарастает (рис. 24). Размеры выделений серебра наиболее крупные из минералов БМ, достигают 20 мкм. Формы зерен овальные, эллипсоидные, иногда с признаками огранки. Серебро встречается в жилках по халькопириту и во вкрапленниках в кубаните, титаномагнетите и других минералах.

Эмпрессит AgTe — обнаружен в пироксене (рис. 25), в зоне гидротермального изменения с хлоритом. Размеры зерен эмпрессита — 1–2 мкм, формы — пластинчатые или таблитчатые. Химический состав, мас. %: Ag — 37,86; Te — 62,14 (табл. 2).

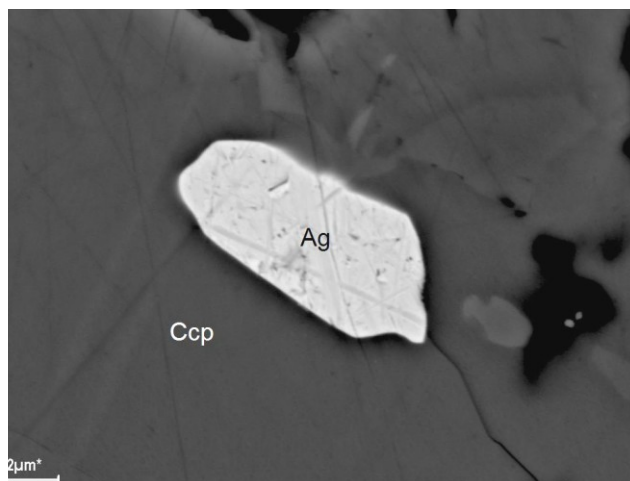


Рис. 23. Выделение серебра (Ag) в халькопирите (Ccp)

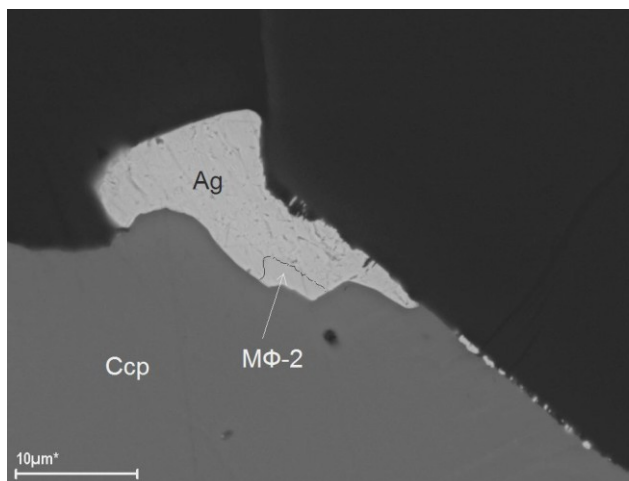


Рис. 24. Сrostок серебра (Ag) с минеральной фазой 2 (MФ-2)

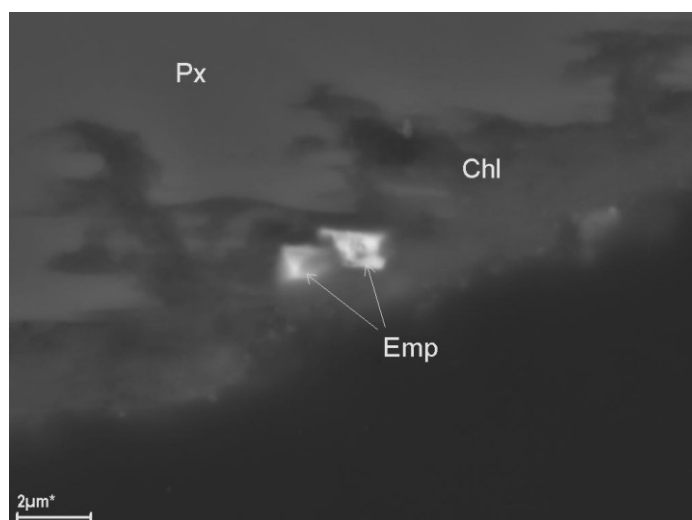


Рис. 25. Выделения эмпрессита (Emp) с хлоритом (Chl) в пироксене (Px)

Минералы с примесью благородных металлов

Примесь БМ обнаружена в двух редких сопутствующих минералах — алтаите PbTe (Pd — 0,81–0,94 мас. %; Pt — 2,91 мас. %) и иодиде свинца PbI₂ (Ag — 2,52 мас. %) (табл. 3).

Таблица 3

Результаты исследования химического состава редких минералов

| Минерал | Pt | Pd | Ag | Pb | Se | Te | I | Σ |
|--------------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| Алтаит | — | — | — | 61,46 | — | 38,54 | — | 100 |
| | — | 0,94 | — | 62,54 | 1,67 | 34,85 | — | 100 |
| | 2,91 | 0,81 | — | 53,70 | — | 42,57 | — | 99,99 |
| Иодид свинца | — | — | 2,52 | 44,49 | — | 1,93 | 51,06 | 100 |
| | — | — | — | 57,75 | — | — | 42,25 | 100 |

Выводы

1. В титаномагнетитовых рудах Порьереченского комплекса развит необычно широкий спектр минералов благородных металлов, преимущественно Pd, Pt, Au и Ag. Наблюдается развитие разнообразных сочетаний элементов, видов минеральных фаз, высоких содержаний примесей в фазах, развитие парагенетических рядов с последовательным изменением химического состава минералов, присутствие в минералах ртути и иода. Эти особенности геохимии, в совокупности с морфологическими особенностями выделения минералов, свидетельствуют, вероятно, о проявлении гидротермального процесса в образовании наблюдаемой минеральной ассоциации и требуют дальнейшего исследования.

2. Ассоциация минералов платиновых металлов с титаномагнетитовыми рудами, по данным исследований А. Дж. Налдретта [10, 11], не характерна, но в последние годы появляется информация о более тесном сочетании таких минерализаций [6, 12] и выделении комплексных месторождений нового типа. Это позволяет отнести Колвицкое месторождение к таким месторождениям, в которых главный вид сырья — Fe-Ti-V-руды — сопровождается сингенетическим Cu-Ni-Co-оруденением и наложенной Pt-Pd-Au-Ag-минерализацией.

3. Таким образом, полученные данные подтверждают высокий потенциал титаномагнетитовых месторождений как комплексного сырья не только для получения Fe, Ti и V [13] но и цветных — Cu, Ni, Co, редких — Sc, Ga и благородных — Pt, Pd, Rh, Ir, Au, Ag металлов [14].

Благодарности

За помощь в полевых работах авторы благодарят коллег по Геологическому институту КНЦ РАН: А. В. Мокрушина, П. А. Серова, М. Г. Тимофееву.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин Б. А. Габбро-лабрадоритовая формация Кольского полуострова и ее металлогения. Л.: Наука, 1980. 169 с.
2. Беляев К. Д., Р. В. Карпов Геологические предпосылки поисковых работ на Кольском полуострове и новые направления их развития // Состояние и перспективы расширения минерально-сырьевой базы Северо-Запада РСФСР. Л.: Недра, 1973. С. 15–29.
3. Комплексные титаномагнетитовые руды Колвицкого месторождения (Кольский полуостров) / Ю. Л. Войтеховский [и др.] // Региональная геология, минералогия и полезные ископаемые Кольского полуострова: труды XIII Всерос. (с междунар. участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 50-летию Дня геолога (Апатиты, 4–5 апреля 2016 г.). Апатиты, 2016. С. 67–69.
4. Сульфидная минерализация в титаномагнетитовых рудах Колвицкого месторождения (Кольский полуостров) / Ю. Н. Нерадовский [и др.] // Наука и образование — 2014: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Мурманск, 24–28 марта 2014 г.). 2014. С. 858–863. URL: <http://www.mstu.edu.ru/science/actions/conferences/files/nio-9.pdf>
5. Нерадовский Ю. Н. Исследование фазового состава титаномагнетита (на примере Колвицкого месторождения, Кольский полуостров) // Рациональное недропользование: сб. научн. тр. / под ред. С. Е. Гавришова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. С. 158–167.
6. Трофимов Н. Н., Голубев А. И. Пудожгорское благороднометалльное титаномагнетитовое месторождение. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 123 с.
7. Геология и вещественный состав комплексных титано-ванадиевых руд Колвицкого месторождения (Кольский полуостров) / Ю. Л. Войтеховский [и др.] // Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования: материалы докл. Всерос. конф., посвященной 85-летию ИГЕМ РАН (Москва, 25–27 ноября 2015 г.). М.: ИГЕМ РАН, 2015. С. 180–181.
8. Минералы платиновых металлов и серебра в Порьереченском интрузивном комплексе с титаномагнетитовыми рудами (Кольский полуостров) / С. В. Бороздина [и др.] // Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы VII Всерос. молодеж. науч. конф. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2015. С. 14–15.
9. Сульфидные медно-никелевые руды Норильских месторождений / А. Д. Генкин [и др.]. М.: Наука, 1981. 234 с.
10. Налдретт А. Дж. Природа распределения и концентрации элементов платиновой группы в различных геологических средах // Доклады, 27-й МГК. Т. 10, Минералогия. М.: Наука, 1984. С. 10–27.
11. Налдретт А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 487 с.
12. New insights into the petrogenesis of the Jameson Range layered intrusion and associated Fe-Ti-P-V-PGE-Au mineralisation, West Musgrave Province, Western Australia. Mineralium Deposita / B. T. Karykowski [et al.]. 2016.

13. *Шабалин Л. И.* Титаномагнетитовые месторождения (геология, генезис, перспективы промышленного использования). Новосибирск: СНИИГГИМС, 2010. 174 с. 14. *Быховский Л. З., Пахомов Ф. П., Турлова М. А.* Комплексные руды титаномагнетитовых месторождений России — крупная минерально-сырьевая база черной металлургии // Разведка и охрана недр. 2007. № 6. С. 20–23.

Сведения об авторах

Нерадовский Юрий Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: nerad@geoksc.apatity.ru

Грошев Николай Юрьевич — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: nikolaygroshev@gmail.com

Войтеховский Юрий Леонидович — доктор геолого-минералогических наук, директор Геологического института КНЦ РАН

E-mail: woyt@geoksc.apatity.ru

Бороздина Светлана Васильевна — аспирант, младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: borozdina.svetlana@bk.ru

Савченко Евгений Элланович — инженер Геологического института КНЦ РАН

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Yury N. Neradovsky — PhD (Geology & Mineralogy), Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nerad@geoksc.apatity.ru

Nikolay Yu. Groshev — PhD (Geology & Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nikolaygroshev@gmail.com

Yury L. Voytekhovsky — Dr. Sci. (Mineralogy & Crystallography); Director of Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: woyt@geoksc.apatity.ru

Svetlana V. Borozdina — Post-graduate, Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: borozdina.svetlana@bk.ru

Evgeny E. Savchenko — Engineer at the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

О минералах платины, палладия, серебра и золота в Порьереченском титаноносном комплексе (Кольский полуостров) / *Ю. Н. Нерадовский [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 71–87.

Reference

Neradovsky Yury N., Groshev Nikolay Yu., Voytekhovsky Yury L., Borozdina Svetlana V., Savchenko Evgeny E. Minerals of Platinum, Palladium, Argentinum and Gold of the Por'yerechensky Titan-Bearing Complex (Kola Peninsula). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 71–87. (In Russ.).