

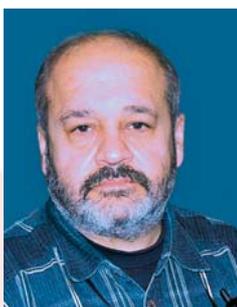
Особенности минерального состава и распределения благороднометальной минерализации платинометальной зоны «С» Восточно-Панского расслоенного массива (Кольский полуостров)



Г.В. Логовская,
Институт Наук о Земле
Санкт-Петербургского
государственного
университета,
АО «НПО «РИВС»



О.В. Казанов,
ФГБУ «Всероссийский
научно-исследовательский
институт минерального
сырья им. Н.М. Федо-
ровского»



С.И. Корнеев,
Институт Наук о Земле
Санкт-Петербургского
государственного
университета

Аннотация

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей состава и распределения платинометальной минерализации рудной зоны «С» на участках Сунгийок и Чуарвы в пределах Восточно-Панского массива. Актуальность этой работы состоит в том, что в данной части массива эта рудная зона изучена недостаточно, а рудная минерализация в ней практически не изучалась.

Методы исследований: изучение научной литературы и фондовых материалов по платинометальным месторождениям в расслоенных интрузиях мира и Кольского полуострова, макроскопические и микроскопические исследования образцов пород, шлифов, прозрачно-полированных шлифов и аншлифов в проходящем и отраженном свете, микронзондовый анализ прозрачно-полированных шлифов (21 ППШ) в ресурсном центре «Геомодель» на сканирующем электронном микроскопе «Hitachi S-3400N» (оператор Шиловских В.В.), статистическая обработка данных с использованием программы Statistica v.6.1. Впервые проведенное изучение благороднометальной минерализации рудной зоны «С» позволило разделить ее на два типа: раннюю магматическую (малосульфидную) и позднюю постмагматическую (собственно платинометальную) ассоциации. Ранняя представлена сульфидами платины и палладия – брэггитом, куперитом; самородными благородными металлами – золотом, серебром; ферроплатиновой, мончеитом, котульскитом. Минералы благородных металлов образуют включения в главных магматических сульфидах и породообразующих силикатах или расположены на их контактах; для них характерна тесная пространственная и корреляционная связь с главными сульфидами. Поздняя ассоциация включает арсениды, стибноарсениды, антимониды платины и палладия – сперрилит, мертиит, стибнопалладинит, а также темагамит, котульскит и теларгпалит. Они локализируются в зонах метасоматических изменений, образуют прожилки, развиваются по трещинам в магматических породообразующих силикатах, встречаются в ассоциации с редкими поздними гидротермальными сульфидами. Для второго типа (постмагматическая ассоциация) значимая корреляционная связь с сульфидами не наблюдается. Оба типа минерализации характеризуется аномально низкими значениями Pd/Pt = 0,1–1,7.

Ключевые слова: Федорово-Панский массив, Восточно-Панский массив, стратиформное оруденение, ранняя магматическая малосульфидная платинометальная и поздняя постмагматическая собственно платинометальная минерализации

The features of composition and distribution of the “PGM ZONE C” noble metal mineralization of the East Pana layered intrusion (Kola peninsula)

Logovskaya G.V., Kazanov O.V. Korneev S.I.

Abstract

This work investigates the composition and distribution of platinum mineralization in ore zone "C" of the Sungiyok and Chuarvy areas within the East Pana massif. The relevance of this work results from insufficient knowledge of this ore zone in this part of the massif, with its ore mineralization being virtually unexamined. Research methods: review of scientific publications and library materials on platinum-metal deposits in stratified intrusions worldwide and on the Kola Peninsula; macroscopic and microscopic studies of rock samples, thin sections, transparent polished thin and microsections in transmitted and reflected light; microprobe analysis of transparent-polished thin sections (21 pcs) in the Geomodel Resource Center using a Hitachi S-3400N scanning electron microscope (operated by Shilovskikh V. V.), statistical processing of data using the Statistica software suite v. 6.1. For the first time, a study of the noble-metal mineralization of the "C" ore zone allowed to classify it into two types: early magmatic (low-sulfide) and late post-magmatic (no-sulfide) associations. The earlier one is represented with platinum and palladium sulfides, i.e. braggite, cooperite; native noble metals, i.e. gold, silver; ferroplatinum, moncheite, kotulskite. The noble metal minerals form inclusions in the main magmatic sulfides and rock-forming silicates or are located in their contact zones; they are characterized by a close spatial and correlational relationship with the main sulfides. The late association includes arsenides, stibioarsenides, platinum and palladium antimonides, i.e. sperrylite, mertieite, stibiopalladinite, as well as temagamite, kotulskite, and telargpalite. They are localized in metasomatic alteration zones forming veinlets and developing along fractures in magmatic rock-forming silicates, and occur in association with rare late hydrothermal sulfides. For the second type, i.e. postmagmatic association, no significant correlation with sulfides is observed. Both types of mineralization are characterized by anomalously low Pd/Pt values of 0.1-1.7.

Keywords: Fedorovo-Pana massif, East-Pana massif, stratiform mineralization, early magmatic low-sulfide platinum-metal and late post-magmatic no-sulfide platinum-metal mineralization

Введение

С конца 1980-х годов на Кольском полуострове проводятся целенаправленные исследования по изучению платиноносности, связанные с ультрамафит-мафитовыми магматическими комплексами. Федорово-Панский раннепротерозойский расслоенный интрузив перидотит-пироксенит-габброноритовой формации признан наиболее перспективным объектом на обнаружение в нем промышленных запасов комплексных платинометаллических руд малосульфидного типа.

Настоящая работа посвящена исследованию рудной зоны «С» на участках Сунгийок и Чуарвы Восточно-Панского массива.

Геологическое строение массива

Федорово-Панский массив является одним из наиболее крупных расслоенных интрузивных комплексов на

Балтийском щите, его протяженность составляет 90 км, мощность – около 4 км. По данным изотопного датирования, образование массива происходило в карельский этап тектонического развития территории, от 2470 до 2501 млн лет назад [1]. Федорово-Панский комплекс разделен тектоническими нарушениями на четыре массива: Федоровых тундр, Ластьявр, Западно-Панский и Восточно-Панский (рис. 1). По одной из версий, массивы некогда были единым интрузивным телом, которое разделилось в результате тектонических воздействий. Другая версия предполагает, что каждый из массивов представлял собой самостоятельную магматическую камеру со своей историей формирования, а связывал их, вероятно, один магматический источник [7].

Восточно-Панский массив располагается к юго-востоку от Белотундровского разлома и Западно-Панского массива, его протяженность составляет около 20 км, неполная

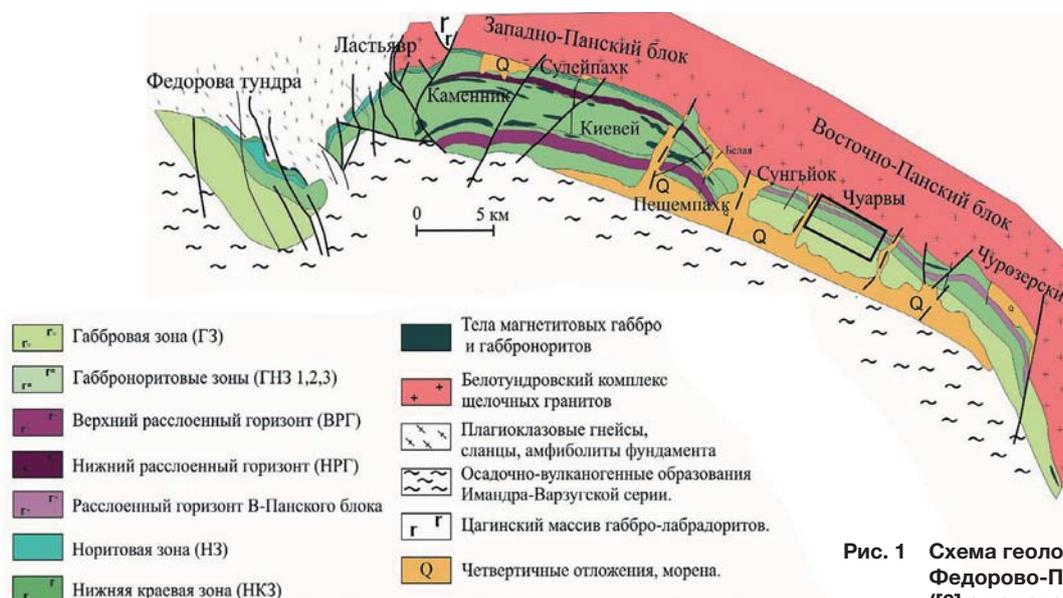


Рис. 1 Схема геологического строения Федорово-Панской интрузии [6] с изменениями, ОАО Пана

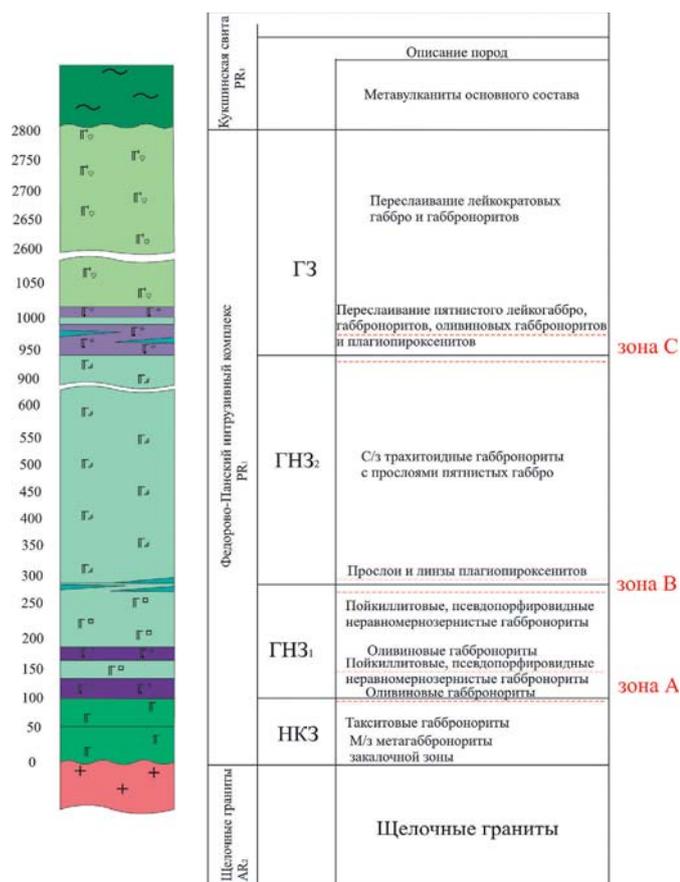


Рис. 2 Схема распределения рудных горизонтов по разрезу Восточно-Панского массива [2]

видимая мощность массива достигает 4,5 км. В разрезе выделяются три зоны, вторая и третья разделены на подзоны [2], [7] (рис. 2):

- 1) Нижняя краевая зона НКЗ;
- 2) Габброноритовая зона ГНЗ:
 - нижняя подзона габброноритовой зоны ГНЗ1,
 - верхняя подзона габброноритовой зоны ГНЗ2;
- 3) Габбровая зона ГЗ:
 - нижняя подзона габбровой зоны ГЗ1,
 - верхняя подзона габбровой зоны ГЗ2.

Каждая зона или подзона имеет общие закономерности слагающих ее пород, последние, в свою очередь, могут разделяться на пачки различной мощности. Формирование каждой подзоны является самостоятельным этапом развития интрузива.

Платинометальная минерализация Восточно-Панского массива

Платинометальная минерализация Восточно-Панского массива сосредоточена в трех рудных зонах: А, В и С, на границе нижнего оливинового горизонта с породами нижней краевой зоны, на контакте нижней и верхней подзон габброноритовой зоны только там, где граница достигает верхнего оливинового горизонта, а также на контакте верхней габброноритовой и нижней габбровой подзон соответственно [2], [3], [4] (рис. 2). Платинометальное оруденение пространственно и генетически связано с малосульфидной медно-никелевой минерализацией [8].

По данным последних работ [8], платинометальная ми-

нерализация в пределах Федорово-Панского интрузива может быть разделена на две ассоциации: более раннюю сульфидно-теллуридную, приуроченную к мезо- и меланократовым габброноритам, норитам и плагиопроксенитам, и более позднюю арсенидно-теллуридную, проявляющуюся в анортозитах, лейкогаббро, габбро-пегматитах и интенсивно измененных габброидах (месторождение базальной зоны массива Федорова тундра, Северный и Южный рифы Западно-Панского массива, расслоенные горизонты Восточно-Панского массива). Для ранней ассоциации характерны сульфиды и висмута-теллуриды МПГ, такие как меренскиит, висоцкит, мончеит, брэггит, куперит, также присутствуют палладистое золото, сульфоарсениды Pt, Ir, Ru и Ro. Минералы платиновых металлов ассоциируют с ранними сульфидами – пирротинитом и пентландитом. Для поздней ассоциации типоморфными являются арсениды палладия, сперрилит, кейтконнит, сопчеит и др. Платиносодержащие фазы ассоциируют с вторичными минералами – кварцем, амфиболами, хлоритами, минералами группы эпидота и др. В обеих ассоциациях наблюдается висмута-теллурид палладия – котульскит. Предполагается, что сульфидно-теллуридная (ранняя) ассоциация была сформирована в позднемагматических условиях, тогда как арсенидно-теллуридная (поздняя) является результатом преотложения первичных минералов платиновых металлов под действием вторичных, гидротермально-метасоматических процессов при высокой активности Cl, H₂O, CO₂, As [8].

В настоящей работе исследуется платинометальная зона С, вскрытая скважинами 494, 470 и 501 на участках Сунгийок и Чуарвы. По коренным выходам она прослежена по простиранию на 2600 м. Для этой зоны характерны следующие особенности [2]:

1. Повышенные содержания Pt, Pd и Au проявляются в основании ГЗ1 в интервале мощностью до 100 м и составляют десятки г/т. Более 1 г/т ЭПГ проявляются непосредственно на контакте с ГНЗ2;
2. Рудная зона представляет собой серию линз минерализованных пород, согласных с расслоенностью, она продолжается на восток и прерывается в западном направлении;
3. Кондиционные содержания МПГ наиболее часто характерны для трахитоидных пойкилитовых габброноритов, однако эта группа не является единственной;
4. Характерны значения Pd/Pt <1, а также содержание золота до 2,27 г/т. По результатам корреляционного анализа были выделены значимые корреляции благородных металлов с серой. Однако сульфиды не являются поисковым признаком, так как МПГ появляются в зонах без малосульфидной минерализации, а во многих сульфидсодержащих пробах МПГ вообще не было.

Благороднометальная минерализация рудной зоны «С» приурочена к интервалам тонкорасслоенных пород, содержащих незначительную вкрапленность голубого кварца и убогую вкрапленность главных сульфидов (<2–3%), варьирующих по составу и текстурно-структурным разновидностям [5].

Рудная минерализация скважины 494, уч. Сунгийок

По данным ОАО «Центрально-Кольская экспедиция» [2] в интервале 75,1–56,4 м проявляются повышенные содержания ЭПГ и золота. Изучение шлифов, прозрачно-полированных шлифов и образцов пород позволило выявить следующие особенности рудной минерализации.

Рудный интервал сложен переслаивающимися крупно- и среднезернистыми пойкилитовыми и гипидиоморфно-зернистыми; массивными, такситовыми и трахитоидными габброноритами, в т.ч. кварцсодержащими. Кумулузные ассоциации меняются от пироксеновой, $\text{CaCr}(q)$, до плагио-клазовой, $\text{PbCa}(q)$.

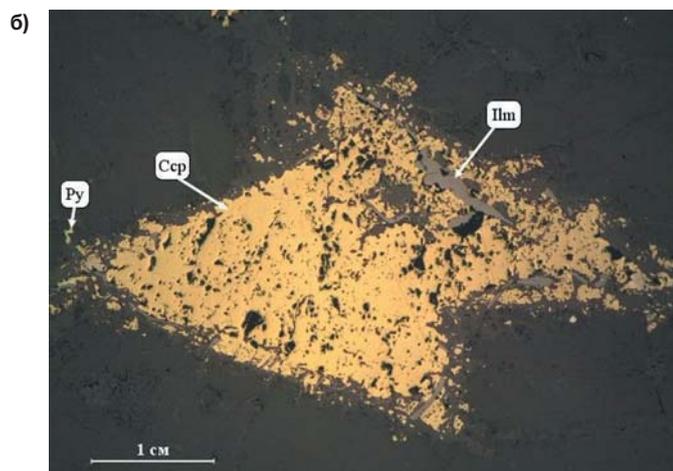
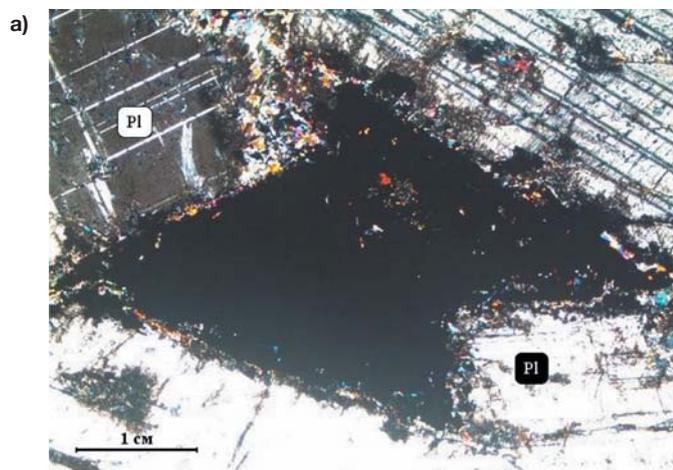


Рис. 3 Ппш 68,9. Пойкилитовый массивный габбронорит. Интерстиционное срастание агрегатов халькопирита, ильменита и пирита в пойкилитовом массивном габбронорите: а) с анализатором; б) без анализатора

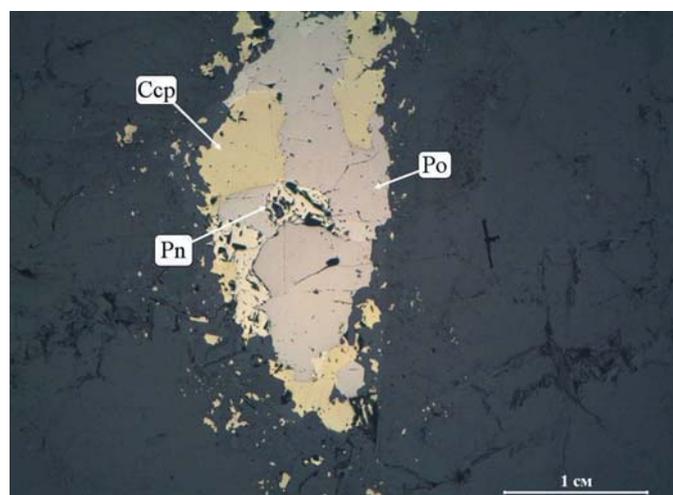


Рис. 4 Ппш 68,5. Пойкилитовый такситовый кварцсодержащий габбронорит. Деформированное каплевидное срастание главных сульфидов. Парагенезисы: I пирротин – II пентландит – III халькопирит. Без анализатора

Содержание сульфидных минералов в интервале от 0,1 до 3%, они образуют мелкую неравномерно распределенную интерстиционную вкрапленность (рис. 3). Выделяются четыре основных рудных парагенезиса: I пирротин – II пентландит – III халькопирит – IV пирит (рис. 4). Помимо главных сульфидов, среди рудных минералов отмечаются ильменит, магнетит, сфалерит, аргентопентландит, кубанит.

Для данного интервала характерны проявления благороднометальной минерализации, которая представлена каплевидными микроагрегатами самородного серебра, сплавов золота и серебра (электрум); субгидральными зернами стиллуотерита, котульскита, мончеита, брэггита; ксеноморфными образованиями гессита и мончеита. Размер зерен минералов варьирует от 1 до 52 мкм (наиболее крупные у брэггита, электрума и гессита). Платинометальные фазы проявляются в виде включений в халькопирите, в породообразующих силикатах, на контакте силикатных и сульфидных минералов (рис. 5, 6).

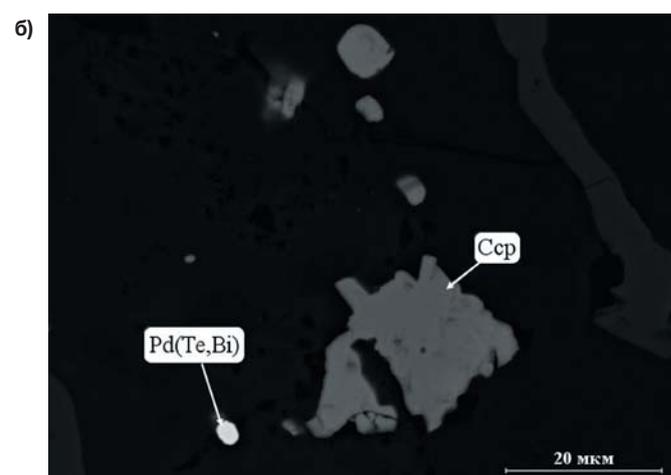
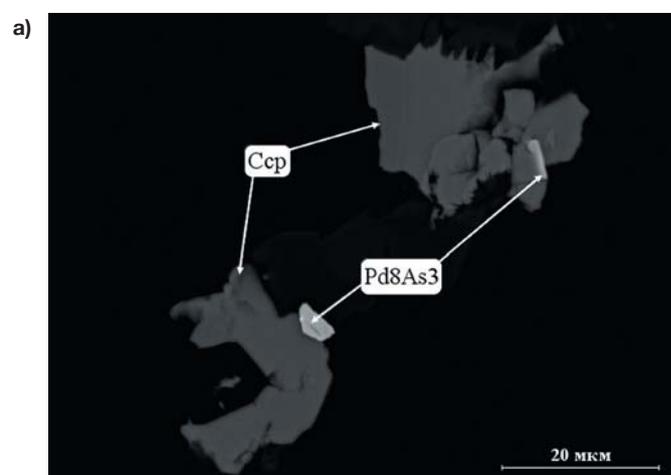


Рис. 5 Ппш 68,9. Пойкилитовый массивный габбронорит: а) гипидиоморфные зерна стиллуотерита (Pd_8As_3) в халькопирите и на контакте халькопирита с породообразующими силикатами; б) гипидиоморфный минеральный индивид котульскита ($\text{Pd}(\text{Te},\text{Bi})$), включенный в амфиболизированный пироксен совместно с вкрапленностью халькопирита. РЭМ-фото

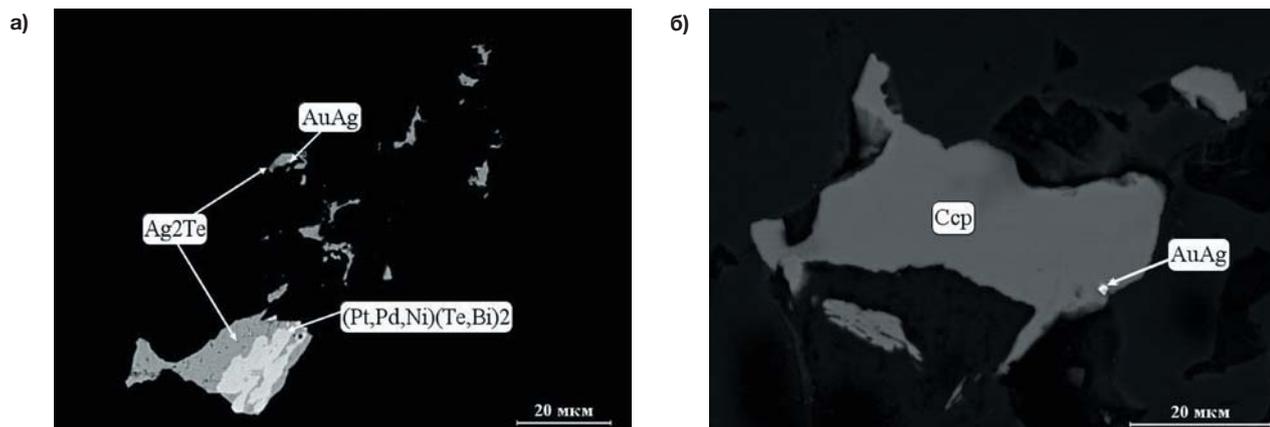


Рис. 6 Пш 60,1. Пойкилитовый трахитоидный кварцсодержащий габбронорит:
 а) срастания ксеноморфных агрегатов гессита (Ag_2Te) (15–40 мкм) с мончейтом ($(\text{Pt,Pd,Ni})(\text{Te,Bi})_2$) (5–25 мкм) сложной морфологии и ксеноморфным зерном электрума (AuAg) (1–2 мкм) в халькопирите;
 б) гипидиоморфное зерно электрума (AuAg) в халькопирите. РЭМ-фото

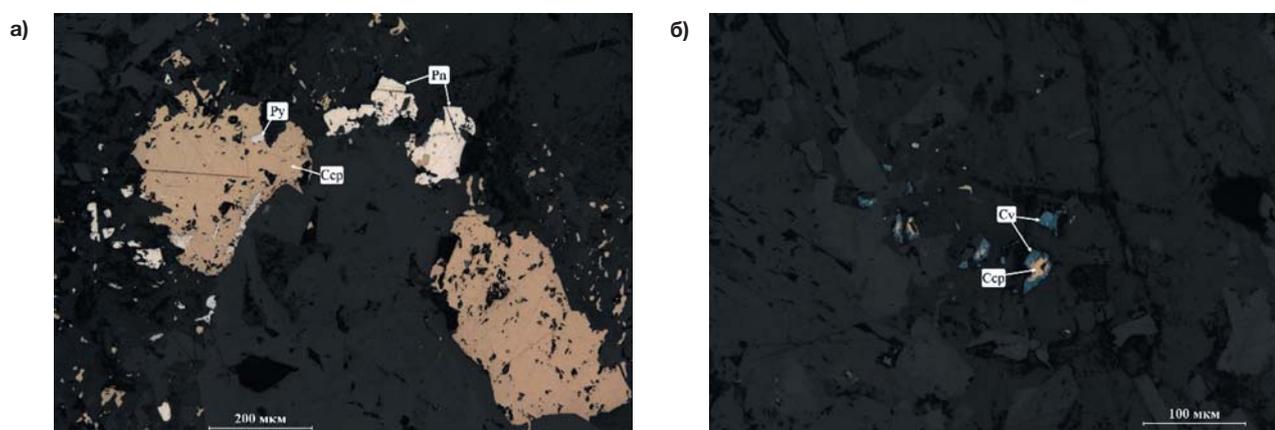


Рис. 7 Пш 94,8. Меланократовый пойкилитовый пятнистый габбронорит:
 а) коррозия краев зерен сульфидных минералов вторичными силикатами;
 б) Пш 92,65. Пойкилитовый пятнистый габбронорит. Развитие ковеллина по халькопириту
 Отраженный свет, без анализатора

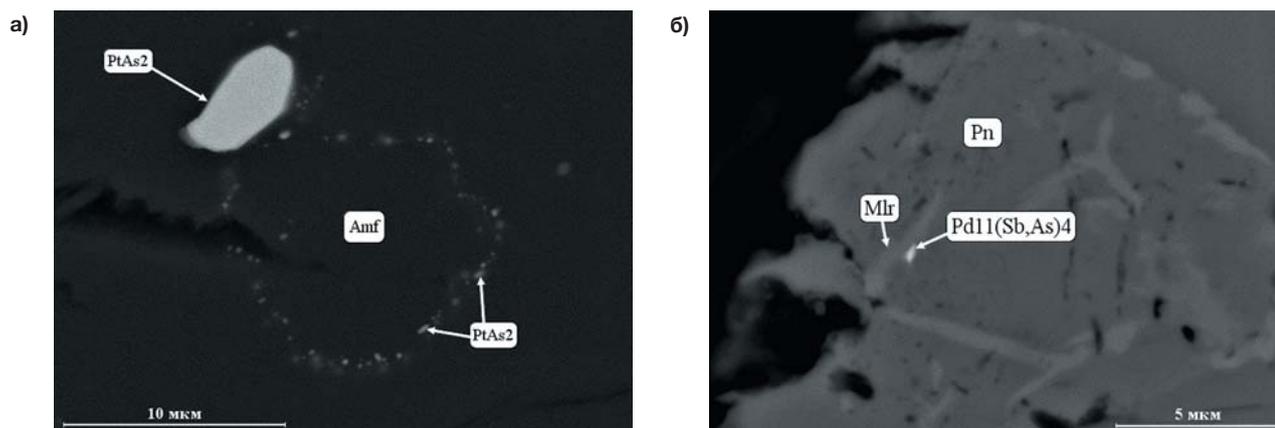


Рис. 8 Пш 93,0. Меланократовый пойкилитовый трахитоидный габбронорит:
 а) отдельное крупное гипидиоморфное зерно сперрилитита и тонкие агрегаты, образующие «точечную» кайму вокруг измененного пироксена; б) Пш 92,65. Пойкилитовый пятнистый габбронорит.
 Включение тонкого зерна мертиита-I в пентландите со структурами распада миллерита. РЭМ-фото

Рудная минерализация скважины 470, уч. Чуарвы

В скв. 470 рудный интервал отмечается на глубине 96,7–92,5 м. Вмещающими породами интервала являются габбронориты с различными кумулюс-интеркумуляусными ассоциациями, $\text{pSb}_2(\text{q})/\text{bpCa}(\text{q})/\text{baCp}(\text{q})$, и структурно-текстурными характеристиками с нечеткими, постепенными

переходами. Для пород характерны интенсивные процессы вторичных изменений породообразующих минералов – амфиболизация, хлоритизация от средней до сильной степени по пироксенам, сосюритизация от слабой до сильной интенсивности по плагиоклазу, окварцевание пород по трещинам.

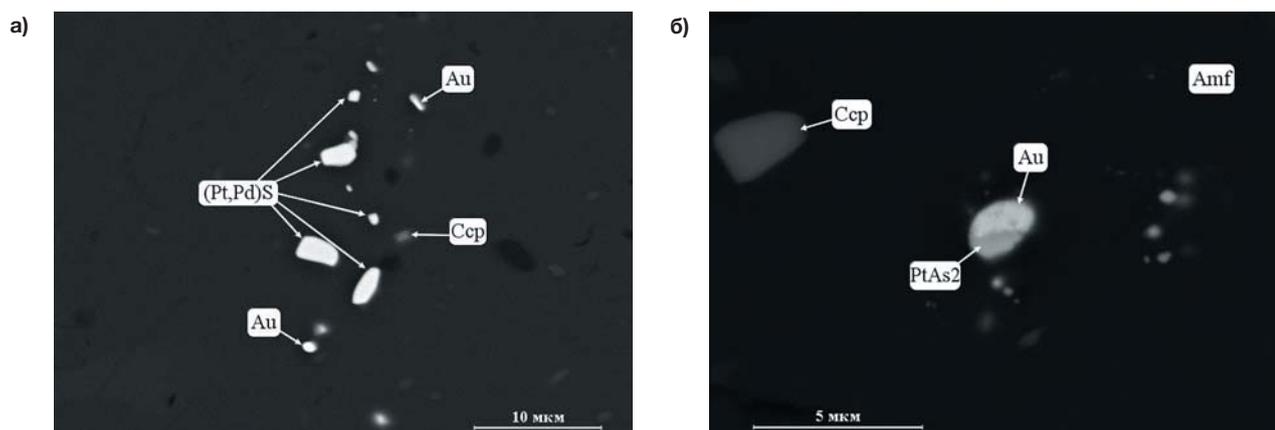


Рис. 9 а) Ппш 93,0. Меланократовый пойкилитовый трахитоидный габбронорит. Субгедральные зерна куперита и самородного золота в ассоциации с халькопиритом, включенные в амфиболизированный пироксен; б) Ппш 92,65. Пойкилитовый пятнистый габбронорит. Каплевидный сросток самородного золота со сперрилитом в амфиболизированном пироксене. РЭМ – фото

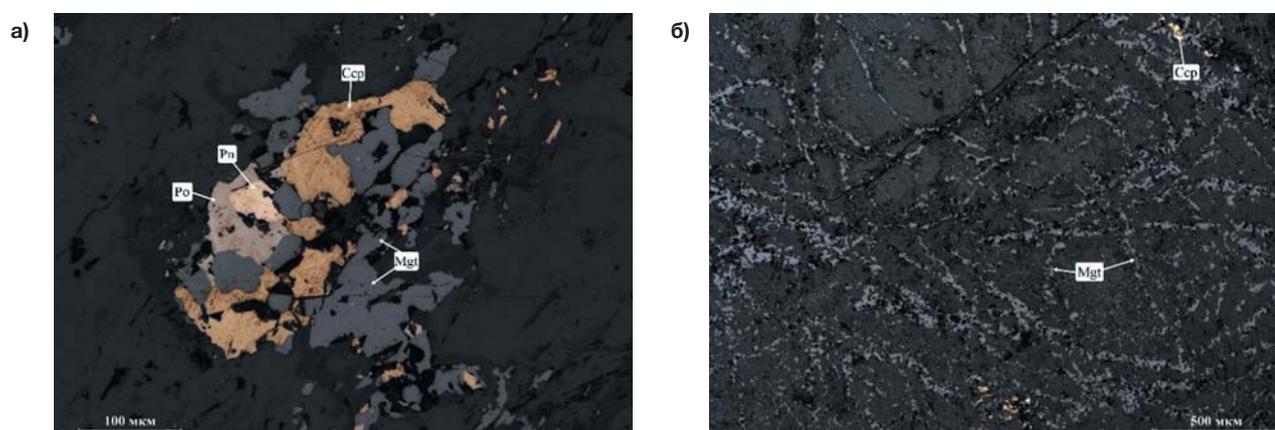


Рис. 10 Ппш 216,35. Меланократовый оливиновый пойкилитовый массивный габбронорит: а) парагенезисы: I – магнетит-1, II – пирротин, III – пентландит, IV – халькопирит; б) прожилки магнетита-2, образовавшиеся в результате серпентинизации оливина. Отраженный свет, без анализатора

Сульфидная минерализация представляет собой главным образом тонкую вкрапленность одиночных зерен пирротина, пентландита, халькопирита и пирита, реже присутствуют более крупные сростания минералов, зачастую, окисленные, с образованием оксидов и гидроксидов железа (лимонита, гетита). Рудные минералы локализуются в зонах интенсивных вторичных изменений, преимущественно темноцветных породообразующих силикатов, присутствуют признаки разъедания, замещения сульфидных минералов вторичными силикатами (рис. 7, а). Типично развитие вторичных минералов меди (ковеллина, халькозина, борнита) по халькопириту (рис. 7, б). На основе характера взаимодействия сульфидов было выявлено 4 парагенезиса: I – пирротин; II – пентландит; III – халькопирит-1; IV – халькопирит-2, пирит, миллерит. Встречаются редкие зерна галенита, сфалерита, включенные в халькопирит.

Минералы благородных металлов представлены арсенидами платины, сульфидами платины и палладия, висмута-теллуридами, теллуридами и стибноарсенидами палладия, сульфоарсенидами платины, палладия и родия, электрум, селенидами серебра, самородным золотом и серебром. Все минералы встречаются в виде тонких гипидиоморфных и каплевидных агрегатов размерами в первые мкм. Большинство из них не имеют сростков с магматиче-

скими сульфидами и образуют редкие одиночные зерна, включенные в амфиболы ряда актинолит-тремолит, замещающие пироксены (рис. 8). Электрум, самородные золото и серебро, куперит и, редко, сперрилит образуют включения в халькопирите или сростаются с последним (рис. 9).

Рудная минерализация скважины 501, уч. Сунгийок

Рудный интервал 221,95–216,8 м сложен крупно-среднезернистыми оливиновыми и оливинсодержащими, в том числе пижонитовыми, кварцсодержащими пойкилитовыми массивными мезо- и меланогабброноритами, переслаивающимися с безоливиновыми разностями, $opbCaq/obpCaq/opCbxbaq/pCbaq/pbCaq/bpCaq$. По оливину развита серпентинизация от слабой до сильной, с образованием почти полной псевдоморфозы серпентина и магнетита. По пироксенам развивается амфиболизация средней степени, по плагиоклазу – слабо-средняя сосюртитизация.

Рудная минерализация представлена ксеноморфными пойкиловключениями магнетита-1, ксеноморфными образованиями пирротина, обрастаемыми субгедральными зернами пентландита и ангедральными халькопирита. Присутствуют одиночные гипидиоморфные и ксеноморфные индивиды пирита. Наблюдается прожилковый магнетит-2 – результат серпентинизации оливина (рис. 10).

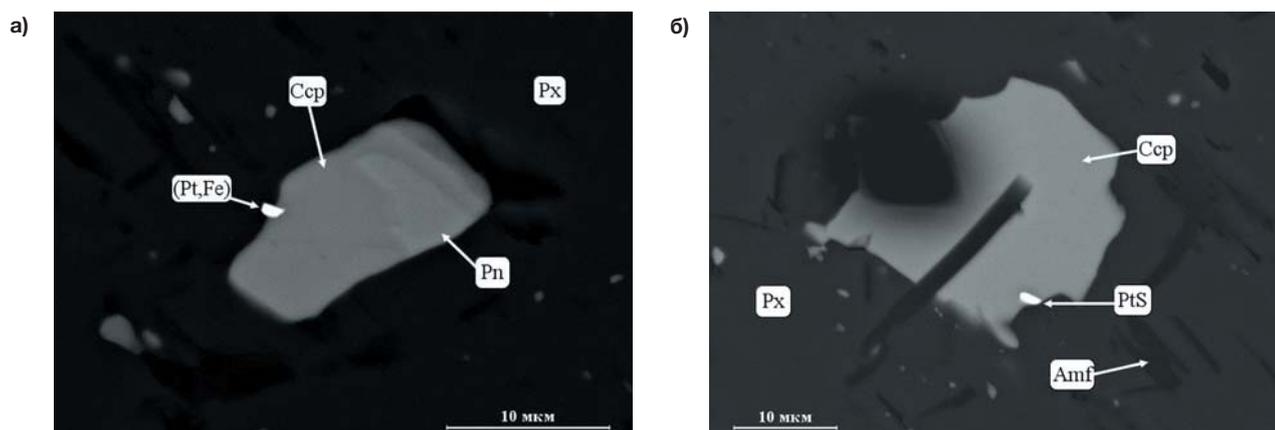


Рис. 11 Ппш 216,35. Меланократовый оливиновый пойкилитовый массивный габбронорит: а) гипидиоморфное зерно ферроплатины (Pt,Fe) на контакте халькопирита и амфиболизированного пироксена; б) гипидиоморфный агрегат куперита (PtS), расположенный на контакте халькопирита и амфиболизированного пироксена. РЭМ-фото

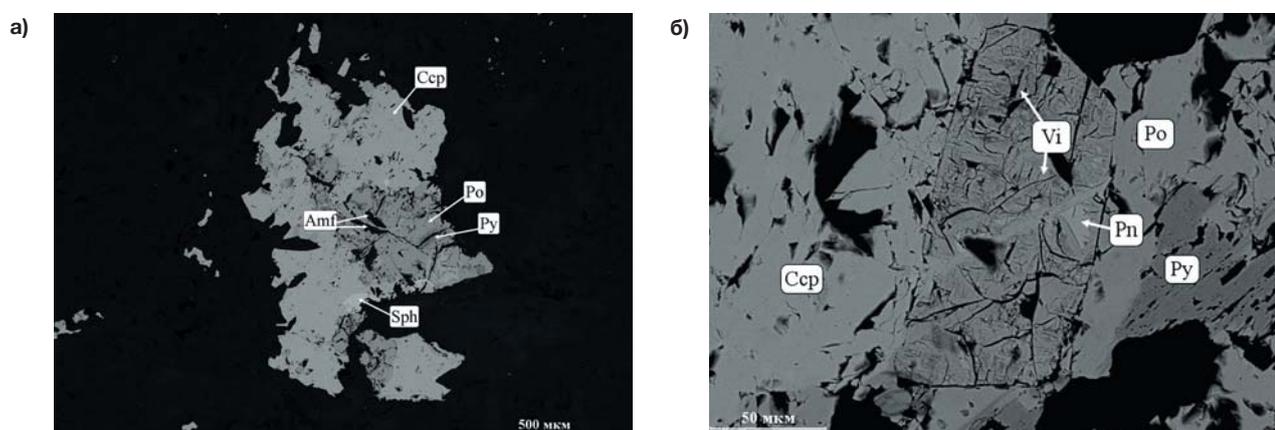


Рис. 12 а) Ппш 139,05. Кварцосодержащий пойкилитовый массивный габбронорит. Главные сульфидные минералы рудного интервала скв. 501. Ксеноморфные агрегаты пирротина обрастаются ангедральными образованиями халькопирита. Присутствуют ксеноморфные образования пирита и сфалерита. По трещинам развиты минералы группы амфибола; б) Ппш 139,05. Кварцосодержащий пойкилитовый массивный габбронорит. Ксеноморфные агрегаты виоларита, развивающиеся по пентландиту. РЭМ-фото

Среди минералов благородных металлов отмечаются ферроплатина, куперит и сперрилит, проявленные в виде субгедральных включений в халькопирите, породообразующих силикатах и зерен на их контакте (рис. 11). Размеры индивидов минералов 1,5–3 мкм.

В интервале 169,35–138,0 м вмещающие породы варьируют по составу (от лейкократовых габброноритов до пироксенитов), структурно-текстурным признакам (пойкилитовая, гипидиоморфнозернистая структуры; пятнистая, трахитоидная, массивная текстуры) и кумулус-интеркумулусным ассоциациям (pCba(q)/baCp(q)/pbCaq/a1pCba2q). Характерна средняя степень вторичных изменений пород – амфиболизации и сосюритизации.

Главными сульфидными минералами являются пирротин, пентландит, халькопирит и пирит – в порядке их образования. Им сопутствуют магнетит и ильменит, которые являются результатом перекристаллизации биотита в процессе опацизации. Встречаются пламеневидные структуры распада пентландита в пирротине. По пентландиту развивается виоларит (рис. 12).

Благороднометалльная минерализация представлена арсенидами и сульфидами платины и палладия; теллуридами платины, палладия и серебра; стибноарсенидами и антимонидами палладия; сплавами золота с серебром;

теллуридами серебра; самородными золотом и серебром. Размеры индивидов минералов варьируют от первых мкм до первых десятков мкм. Минералы ассоциируют как с главными сульфидными минералами и породообразующими силикатами (гессит, меренскиит, самородное золото, куперит, сперрилит), так и с поздними метасоматическими силикатами – минералами ряда актинолит-тремолит и хлоритом (сперрилит, котульскит, мертиит-I, темагамит, палладоарсенид, стибнопалладинит) (рис. 13).

На основании результатов проведенного исследования рудной минерализации в пределах рудной зоны «С» было выделено две ассоциации благороднометалльных минералов. Первая, ранняя, магматическая ассоциация представлена сульфидами платины и палладия, самородными золотом и серебром, мончеитом, котульскитом, меренскиитом, ферроплатиной, сперрилитом, образующими включения в магматических главных сульфидных и силикатных породообразующих минералах, или на контактах их агрегатов. Она проявлена на участке Сунгийок в пределах рудных интервалов 75,1–56,4 м скв. 494, 221,95–216,8 м скв. 501. Поздняя, постмагматическая, ассоциация представлена сперрилитом, мертиитом-I, мертиитом-II, темагамитом, телларгпалитом, палладоарсенидом, стибнопалладинитом, котульскитом, ассоциирующими с вторичными силикат-

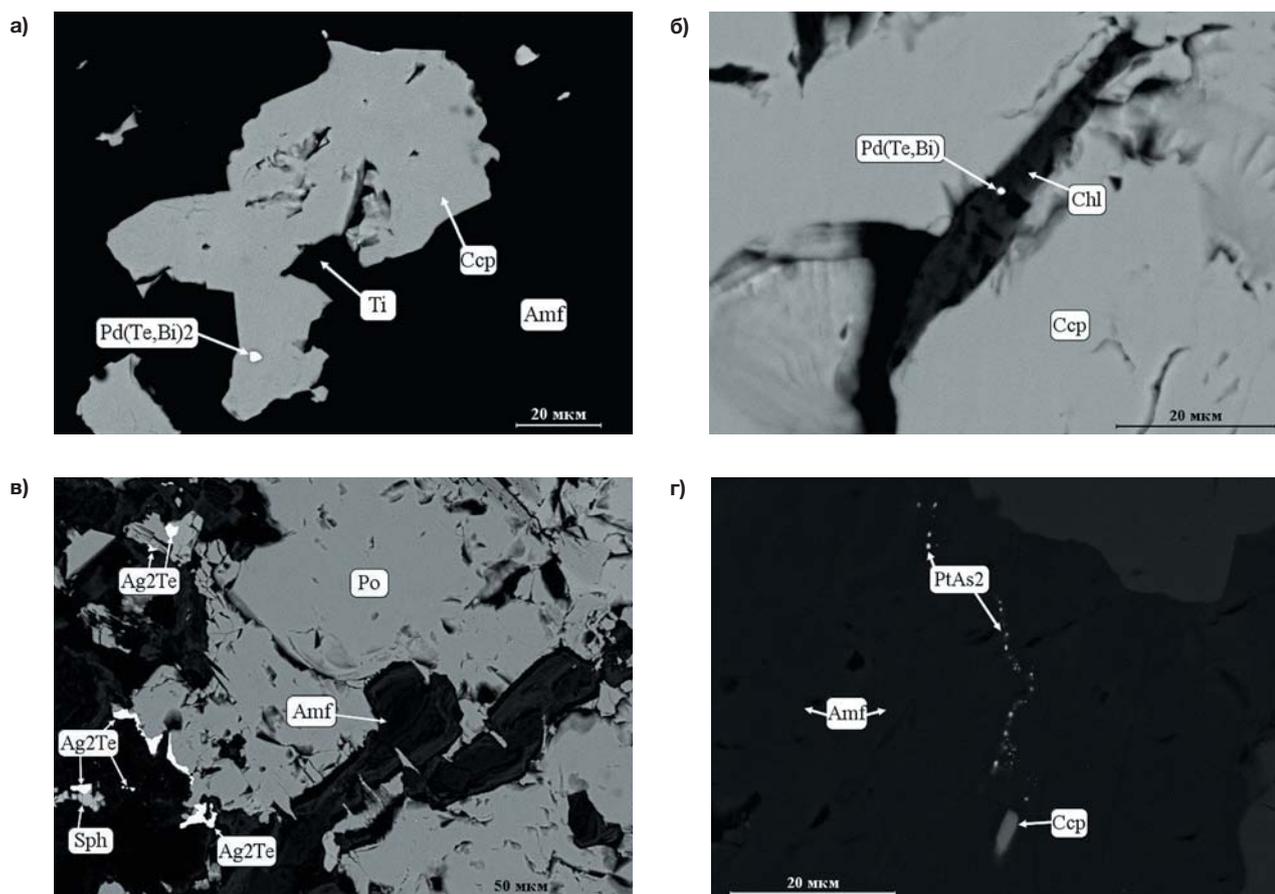


Рис. 13 а) Ппш 140,05. Кварцсодержащий пойкилитовый массивный габбронорит. Гипидиоморфное включение меренскита (Pd(Te,Bi)₂) в халькопирите;
 б) Ппш 160,5. Кварцсодержащий габбро-офитовый пятнистый габбронорит. Каплевидное зерно котульскита (Pd(Te,Bi)) в хлоритовом прожилке, секущем халькопирит;
 в) Ппш 140,05. Кварцсодержащий пойкилитовый массивный габбронорит. Ксеноморфные и гипидиоморфные образования гессита (Ag₂Te) на контактах агрегатов главных сульфидов и породообразующих силикатов;
 г) Ппш 147,8. Кварцсодержащий пойкилитовый массивный габбронорит. Вкрапленность зерен сперрилита (PtAs₂) по микропрожилку в измененном пироксене. РЭМ-фото

ными и поздними сульфидными минералами (миллерит), а также развивающимися по трещинам и прожилкам в породообразующих и ранних сульфидных минералах. Ассоциация наблюдается на участке Чуарвы в рудном интервале 96,7–92,5 м скв. 470, на участке Сунгийок в рудном интервале 169,35–138,0 скв. 501.

Особенности распределения Cu, Ni, S, Pt, Pd и Au по разрезам скважин 494, 501 и 470

Скважина 494, уч. Сунгийок

На рис. 14 представлены графики распределения содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au по разрезу скв. 494. Как видно из рисунка, повышенные содержания (до 4,6 г/т) ЭПГ и золота наблюдаются в интервале разреза 75,1–56,4 м, также повышаются содержания серы, никеля и меди. Максимумы содержаний всех вышеперечисленных элементов совпадают на глубинах 68,1–69,7 м и 60,1–60,95 м.

Отмечается, что с глубины 70 м увеличивается содержание главных сульфидов, МПГ и золота, при этом с глубины 58 м количество меди, никеля и серы также повышается, тогда как содержание благороднометаллических элементов резко падает. Таким образом, в верхней части разреза содержание сульфидов увеличивается, но Pt, Pd и Au здесь не проявляются, либо проявляются в малых количествах. В то

же время повышение содержания Pt и Pd не всегда сопровождается увеличением количества сульфидных минералов (интервалы 77–73 м, 70–62 м).

Авторами была проведена статистическая обработка результатов анализов на Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au, PGE+Au в породах

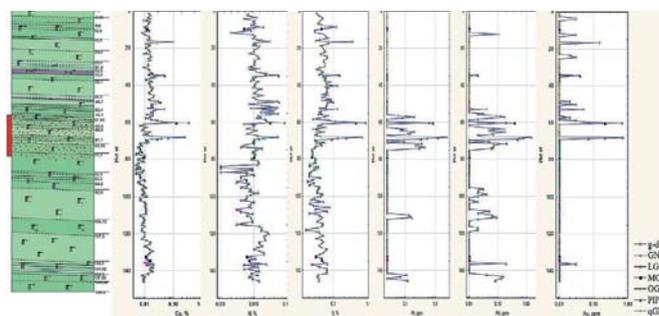


Рис. 14 Распределение содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au по разрезу скв. 494. Красным обозначен рудный интервал 75,1–56,4 м: g-dol – габбродолериты, GN – габбронориты, LGN – лейкократовые габбронориты, MGN – меланократовые габбронориты, OGN – оливиновые габбронориты, PIPer – плагиоперидотиты, qGN – кварцевые габбронориты

Таблица 1
Корреляционная матрица для содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au, PGE+Au в пробах пород скв. 494 (вся выборка), $N = 179$, $r_{0,05} = 0,16$

	Au	Pt	Pd	Cu	Ni	S	PGE+Au
Au	1,00	0,55	0,51	0,78	0,40	0,74	0,67
Pt		1,00	0,87	0,37	0,16	0,39	0,95
Pd			1,00	0,33	0,17	0,35	0,95
Cu				1,00	0,60	0,86	0,46
Ni					1,00	0,52	0,22
S						1,00	0,47
PGE+Au							1,00

Таблица 2
Корреляционная матрица для содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au, PGE+Au в пробах пород скв. 494, PGE+Au > 0,045 г/т, $N = 57$, $r_{0,05} = 0,26$

	Au	Pt	Pd	Cu	Ni	S	PGE+Au
Au	1,00	0,42	0,32	0,92	0,62	0,92	0,56
Pt		1,00	0,83	0,36	0,13	0,42	0,94
Pd			1,00	0,29	0,10	0,35	0,90
Cu				1,00	0,73	0,94	0,50
Ni					1,00	0,62	0,23
S						1,00	0,57
PGE+Au							1,00

скв. 494, предоставленных ОАО «Центрально-Кольская научная экспедиция». Использовалась программа Statistica v.6.1. Были рассчитаны две корреляционные матрицы. В первой выборке были взяты все 179 проб, во второй были взяты пробы, содержание суммы ЭПГ и золота в которых выше порога определения 0,045 г/т.

В первом случае выяснилось, что содержания ЭПГ и Au обладают высокой значимой положительной корреляционной связью с серой, медью и более слабой с никелем (табл. 1). Следует отметить заметно более высокие значения коэффициентов корреляции для Au с Cu ($r_{0,05} = 0,78$), с Ni ($r_{0,05} = 0,4$) и с S ($r_{0,05} = 0,74$) по сравнению с их значениями для Pt и Pd (см. табл. 1).

Во втором случае программой было выбрано 57 наблюдений. Была выявлена значимая прямая корреляционная зависимость между содержаниями благородных металлов, серы и меди. Другими словами, благороднометалльная минерализация ассоциирует с халькопиритом (табл. 2). Можно отметить, что корреляционная зависимость между Ni и ЭПГ во втором случае не является значимой, а Ni, Cu с Au еще усиливается.

Скважина 501, уч. Сунгийок

Для скв. 501 также были построены графики распределения Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au по ее разрезу (рис. 15). Как видно на рисунке, повышенные содержания платины и палладия свойственны интервалам разреза от 230 до 190 м, от 180 до 137 м, при этом повышенное содержание золота отмечается лишь на глубине 140 м. В интервале 178–159 м повышение содержания минералов платиновой группы сопровождается повышением содержания серы, а затем содержание серы резко падает при дальнейшем повышении количества платины и палладия. Содержания меди и никеля распределены неравномерно по разрезу скважины и никак не влияют на рост и снижение количества благородных металлов, лишь на глубине 220 м повышенному количеству никеля соответствуют повышенные значения платины и палладия.

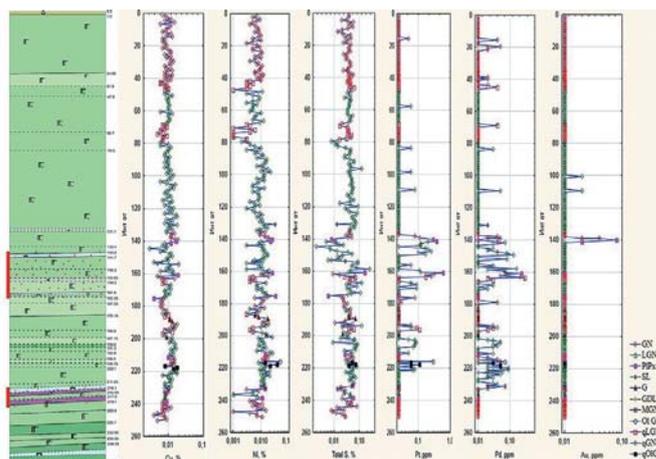


Рис. 15 Распределение содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au по разрезу скв. 501. Красным обозначены рудные интервалы 169,35–138,0 м; 221,95–216,8 м: GN – габбронориты, LGN – лейкократовые габбронориты, PIPx – плагиопротексениты, SL – сланцы, G – габбро, GDL – габбродолериты, MGN – меланократовые габбронориты, OIGN – оливиновые габбронориты, q – кварцевые породы

Была проведена статистическая обработка результатов анализов на Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au в породах скв. 501, предоставленных Центрально-Кольской научной экспедицией. При помощи программы Statistica были рассчитаны две корреляционные матрицы. В первой выборке были выбраны все 288 проб Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au, во второй – пробы, в которых содержание суммы ЭПГ и золота выше порога определения 0,045 г/т (83 наблюдения). В первом случае было выявлено, что Cu, Ni, Pt, Pd и Au значимо положительно коррелируют между собой, при этом S обладает значимой отрицательной корреляционной связью с Pt ($r_{0,05} = -0,14$) и Au ($r_{0,05} = -0,11$) и незначимой с Pd ($r_{0,05} = 0,06$) (табл. 3).

Во второй выборке Pt значимо положительно коррелирует с Pd, Au и Ni, и значимо отрицательно – с S. Pd коррелирует только с Pt. Au обладает значимой положительной корреляционной связью с Pt, Cu и Ni (табл. 4).

Таблица 3
Корреляционная матрица для содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au в пробах пород скв. 501 (вся выборка), $N = 288$, $r_{0,05} = 0,11$

	Pt	Pd	Au	Cu	Ni	S
Pt	1,00	0,68	0,32	0,22	0,28	-0,14
Pd		1,00	0,06	0,24	0,29	0,06
Au			1,00	0,21	0,16	-0,11
Cu				1,00	0,40	0,42
Ni					1,00	0,05
S						1,00

Таблица 4
Корреляционная матрица для содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au в пробах пород скв. 501, PGE+Au > 0,045 г/т, $N = 83$, $r_{0,05} = 0,21$

	Pt	Pd	Au	Cu	Ni	S
Pt	1,00	0,31	0,25	0,17	0,27	-0,35
Pd		1,00	-0,19	0,17	0,20	0,08
Au			1,00	0,29	0,22	-0,20
Cu				1,00	0,54	0,33
Ni					1,00	-0,04
S						1,00

Скважина 470, уч. Чуарвы

Были построены графики распределения Cu, Ni, S, Pt, Pd и Au по разрезу скважины, они представлены на рис. 16. Можно заметить, что повышению содержаний благородных металлов не соответствуют повышенные содержания Cu, Ni и S, минерализация не приурочена к определенному петрографическому типу пород.

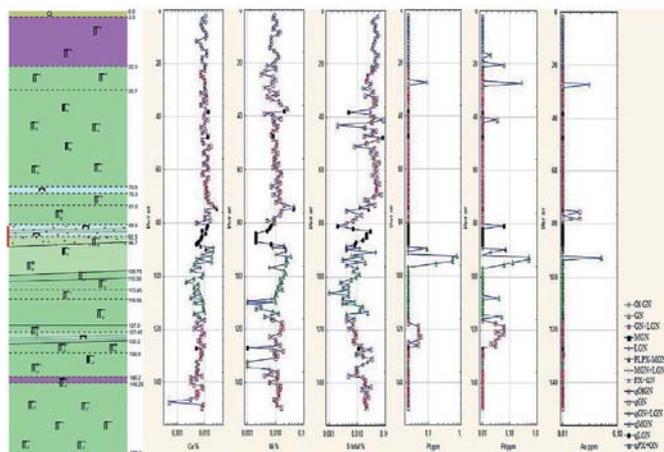


Рис. 16 Распределение содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au по разрезу скв. 470. Красным обозначен рудный интервал 96,7–88,9 м: OIGN – оливиновые габбронориты, GN – габбронориты, MGN – меланократовые габбронориты, LGN – лейкократовые габбронориты, PIPX – плагипироксениты, PX – пироксениты, q – кварцевые породы

Статистическая обработка данных показала, что при анализе всей выборки Au и Ni значимо положительно коррелируют с Pt и Pd, при этом не коррелируя между собой. Для Pt и Pd, в свою очередь, характерны значимые отрицательные корреляционные связи с S ($r_{0,05} = r 0,18$, $r_{0,05} = r 0,23$ соответственно) (табл. 5).

Таблица 5
Корреляционная матрица для содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au в пробах пород скв. 501 (вся выборка), $N = 288$, $r_{0,05} = 0,11$

	Au	Pt	Pd	Cu	Ni	S
Au	1,00	0,47	0,48	0,14	0,12	-0,04
Pt		1,00	0,85	0,06	0,27	-0,18
Pd			1,00	0,04	0,24	-0,23
Cu				1,00	0,15	0,39
Ni					1,00	0,02
S						1,00

Таблица 6
Корреляционная матрица для содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd, Au в пробах пород скважины 470, $PGE+Au > 0,045$ г/т, $N = 24$, $r_{0,05} = 0,38$

	Au	Pt	Pd	Cu	Ni	S
Au	1,00	0,35	0,35	0,35	0,26	0,13
Pt		1,00	0,81	0,19	0,72	-0,09
Pd			1,00	0,10	0,44	-0,05
Cu				1,00	0,39	0,58
Ni					1,00	0,03
S						1,00

При увеличении предела обнаружения $PGE+Au$ до $>0,045$ г/т корреляционная зависимость Au с остальными элементами становится незначимой, пропадает отрицательная связь S с Pt и Pd, при этом увеличивается корреля-

ционная связь трех элементов: Pt с Ni ($r_{0,05} = 0,72$) и Pd с Ni ($r_{0,05} = 0,44$) (табл. 6), что можно объяснить вхождением Ni в состав некоторых платинометаллических минералов, характерных для оруденения.

Заключение

В результате проведенных петрографических исследований были выявлены определенные закономерности в изменении структурно-текстурных особенностей пород и последовательности минералообразования основных породообразующих минералов в них.

Рудная толща, рудная зона «С», пересеченная во всех трех скважинах, характеризуется выраженной тонкой ритмической расслоенностью контрастных по составу и кумулюсным ассоциациям пород – от лейкоабброноритов до плагипироксенитов, $pCba(q)/baCp(q)/pbCa(q)/bpCa(q)$ – в рудных интервалах участков Сунгийок и Чуарвы (инт. 75,1–56,4 м скв. 494, инт. 96,7–92,5 м скв. 470, инт. 169,35–138,0 м скв. 501). В скв. 501 участка Сунгийок в рудном интервале 221,95–216,8 м вмещающими породами являются оливиновые и оливинсодержащие, в том числе пижонитовые, мезо- и меланогаббронориты, переслаивающиеся с безоливиновыми разновидностями, $opCbxbaq/pCbaq/pbCaq/bpCaq/opbCaq/obpCaq$. Часто наблюдается вкрапленность магматического интерстиционного голубого кварца. Структура может резко меняться от пойкилитовой до гипидиоморфнозернистой и габбро-офитовой. Одновременно с этим наблюдается чередование текстур: массивная, трахитоидная, пятнистая. В скв. 494 в интервалах с аномально высокими содержаниями ЭПГ и Au наиболее характерна такситовая текстура, обусловленная проявлениями резкой ритмичной смены кумулуса с пироксенового на плагноклазовый ($baCp(q)/pCbaq$).

Сульфидная тонко-среднезернистая вкрапленность распределена неравномерно. Выделяются следующие парагенезисы: ильменит, магнетит-1 → пирротин → пентландит, аргентопентландит → халькопирит-1, кубанит, сфалерит → пирит → халькопирит-2, миллерит, виоларит → магнетит-2. Благороднометаллическая минерализация распределена в пределах рудных интервалов неравномерно и не имеет четкого петрографического контроля. Она нередко сопровождается проявлениями вторичных метасоматических процессов повышенной интенсивности во вмещающих породах (амфиболитизации, хлоритизации, сосущитизации).

Благородные металлы образуют собственные тонкие минеральные фазы, которые разделены на две ассоциации: раннюю и позднюю. Ранняя, или магматическая, ассоциация представлена ферроплатиной, сульфидами платины и палладия – брэггитом, куперитом, самородными благородными металлами – золотом, серебром, а также мончеитом, котульскитом. Минералы образуют включения в главных сульфидах и магматических породообразующих силикатах, расположены на их контакте. Поздняя, сформированная в постмагматическую (метасоматическую) стадию, ассоциация включает арсениды, стибноарсениды и антимониды платины и палладия – сперрилит, мертиит, стибнопалладинит, а также темагамит, теларггалит и котульскит. Они локализуются в зонах метасоматоза, образуют прожилки и развиваются по трещинам в магматических породообразующих силикатах, окаймляют их (сперрилит), иногда появляются в ассоциации с поздними гидротермальными сульфидами. Ранняя ассоциация минералов благородных металлов проявлена на участке Сунгийок в пределах рудного интервала скв. 494 (75,1-56,4 м),

в рудном интервале 221,95-216,8 м скв. 501. Поздняя ассоциация характерна для рудного интервала скв. 470 участка Чуарвы (96,7-92,5 м) и для рудного интервала скв. 501 169,35-138,0 м в пределах участка Сунгийок.

Исследования особенностей распределения содержаний Cu, Ni, S, Pt, Pd и Au показали, что на разных участках наблюдаются различные корреляционные зависимости между данными элементами. В пределах участка Сунгийок, скважины 494 содержания благородных металлов значимо положительно коррелируют с Cu, Ni и S, т.е. с проявлениями убогой сульфидной минерализации ($S < 3$ масс.%) с явным преобладанием халькопирита. Важно отметить заметно более высокую корреляционную зависимость между Cu, Ni, S и Au. Наиболее отчетливо это проявляется в рудной зоне скв. 494 (интервал 75,1–56,4 м). Здесь особо выделяются два рудных интервала (69,7-68,1 м и 60,95–60,1 м) с содержаниями Pt+Pd+Au 0,8–4,59 г/т и аномально низкими значениями Pd/Pt=1,5–0,6 и 0,5–0,3 соответственно, приуроченные к кварцсодержащим мелано-, мезо- и лейкократовым габроноритам с явно выраженной такситовой текстурой. Золоторудная минерализация скв. 501 обладает положительной корреляционной связью с Cu и Ni, платино-палладиевая – только с Ni, отрицательной – с S. В пределах участка Чуарвы (скв. 470) благородные металлы характеризуются отсутствием корреляционной связи с сульфидными минералами. Наблюдается значимая отрицательная корреляционная связь Pt и Pd с S, значимая положительная – с Ni, что, скорее всего, связано с присутствием Ni в составе некоторых благороднометаллических фаз.

Благороднометаллическая минерализация рудной зоны «С» обладает аномально низкими значениями отношения Pd/Pt 0,1–0,8, реже 1,1–1,7.

Таким образом, исходя из выявленных особенностей благороднометаллической минерализации рудного горизонта «С» ее можно разделить на два типа: **малосульфидную платинометаллическую (магматическую) и собственно платинометаллическую (постмагматическую)**. Для первого типа характерна тесная ассоциация с сульфидными минералами – минералы благородных металлов образуют сростания с главными сульфидами, а также они могут быть включены в породообразующие магматические силикатные минералы в пространственной связи с сульфидной минерализацией. Присутствует значимая положительная корреляционная зависимость Pt, Pd, Au с Cu, Ni и S. Данный тип типичен для рудных горизонтов скв. 494 и 501 участка Сунгийок. Для второго типа нехарактерны корреляционные связи с Cu, с S наблюдается значимая отрицательная корреляционная связь. Минералы благородных металлов локализируются в трещинах и прожилках и ассоциируют с минералами, образованными в постмагматическую стадию развития интрузива. Этот тип наблюдается в рудных интервалах скв. 501 (участок Сунгийок) и скв. 470 (участок Чуарвы).

Благодарности

Авторы выражают благодарность Шиловских В.В., сотруднику ресурсного центра СПбГУ «Геомодель», за помощь в исследовании рудной минерализации на сканирующем электронном микроскопе «Hitachi S3400-N».

Список литературы

1. Баянова Т.Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. – СПб.: Наука, 2004. – 174 с.
2. Войтехович В.С., Казанов О.В., Калинин А.А. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на платинометалльное оруденение в восточной части массива Панских тундр в 2006–2008 гг. ООО «Кольская горно-геологическая компания», г. Апатиты, ноябрь 2008 г.
3. Казанов О.В., Калинин А.А. Геолого-генетическая модель малосульфидного платинометаллического месторождения Восточное Чуарвы и ее использование при проведении поисково-оценочных работ в Восточно-Панском массиве (Кольский полуостров) // Руды и металлы. – 2011. – № 3–4. – С. 78.
4. Kazanov O. Magmatic stratigraphy control on PGM mineralization of the East Pana layered massif // 12th International Platinum Symposium. Abstracts. Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, 2014. p. 72-74.
5. Kazanov O.V., Logovskaya G.V., Korneev S.I. Noble metal mineralization of the «PGM zone C» of the East-Pana layered intrusion (Kola Peninsula) // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, 23-27 September 2019, Belgorod, Russia. p.198-200.
6. Карпов С.М. «Геологическое строение Панского интрузива и особенности локализации в нем комплексного платинометаллического оруденения». Дисс. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.11: Апатиты, 2004. 207 с.
7. Митрофанов Ф.П., Чашин В.В. Палеопротерозойская Имандра-Варзугская рифтогенная структура (Кольский полуостров): интрузивный магматизм и минерогения // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – №5 (1). – С. 231-256.
8. Субботин В.В., Корчагин А.У., Савченко Е.Э. Платинометаллическая минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2012. – №1. – С. 55-65.