



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-48-57

УДК 553.08

Научная статья

## Определение последовательности образования медно-никелевых руд месторождения Кун-Манье (Амурская область)

А.Е. Котельников, Д.А. Колмакова, Е.М. Котельникова

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

### История статьи:

Поступила в редакцию: 10 апреля 2020 г.

Доработана: 23 апреля 2020 г.

Принята к публикации: 29 апреля 2020 г.

### Ключевые слова:

Кун-Манье, Зейский район, медно-никелевое месторождение, микроскопия, минеральные ассоциации, парагенезисы

Целью статьи является определение последовательности минералообразования медно-никелевых руд месторождения Кун-Манье, расположенного в Зейском районе Амурской области. В строении месторождения принимают участие три залежи. Рудовмещающими образованиями являются пластовые и пластообразные тела ультраосновного состава кун-маньенского комплекса, залегающие среди пород кристаллического фундамента раннего архея. Среди пород преобладают роговообманковые разновидности габбро-пироксенитов и пироксенитов. Руды содержат, кроме никеля, широкий ряд попутных компонентов. Зона окисления руд в пределах месторождения и всего рудного поля не развита. Актуальность работы обусловлена тем, что детальными исследованиями рудных минералов ранее не проводилось. Настоящее исследование осуществлялось с использованием поляризационного рудного микроскопа по полированным рудным образцам, характеризующим разные зоны рудного тела. Результатом стало установление минеральных парагенезисов и последовательности образования минералов. Определено, что основными рудными минералами являются пирротин, пентландит, также встречаются – пирит, халькопирит, реже – ильменит, магнетит, сфалерит, элементы платиновой группы. Рудная минерализация сформировалась в два этапа. Магматический этап представляет собой раннюю и основную стадии минералообразования, включающие пирит-магнетитовую, полиметаллическую и пентландитовую ассоциации, а гидротермальный этап – позднюю стадию, включающую пиритовую ассоциацию.

### Введение

Объектом исследования является месторождение Кун-Манье, расположенное на северо-востоке

Зейского района Амурской области. Ближайший населенный пункт – поселок Бомнак – находится в 240 км к юго-западу от объекта исследования. В 25 км к юго-западу от поселка Бомнак проходит линия Байкало-Амурской магистрали с пристанционными поселками Горный и Верхнезейск. Вкрапленные медно-никелевые сульфидные руды были выявлены в 1997 году. На всей перспективной площади и ее отдельных участках был выполнен обширный комплекс поисково-оценочных геолого-геофизических работ [1], а также проведены петромагнитные, палеомагнитные и геохимические исследования позднепалеопротерозойских никеленосных мафит-ультрамафитов Кун-Маньенского рудного поля [2; 3] и определен воз-

*Котельников Александр Евгеньевич*, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН, кандидат геолого-минералогических наук, Scopus Author ID: 57205586833, Web of Science ResearcherID: O-3821-2019, eLIBRARY SPIN-код: 6280-5070, AuthorID: 590048, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0622-8391>, [kotelnikov-ae@rudn.ru](mailto:kotelnikov-ae@rudn.ru)

*Колмакова Дарья Александровна*, студентка департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН.

*Котельникова Елена Михайловна*, старший преподаватель департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН, кандидат геолого-минералогических наук, Scopus Author ID: 57205571168, Web of Science ResearcherID: L-7272-2018, eLIBRARY SPIN-код: 8173-9810, AuthorID: 728378, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8909-8953>

© Котельников А.Е., Колмакова Д.А., Котельникова Е.М., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



раст оруденения [4], при этом изучение минералогических, текстурно-структурных особенностей и последовательности образования не приводилось. Таким образом, исследование руд и рудных минералов месторождения является актуальным.

### 1. Цель, материалы и методы

Основная цель работы – определение последовательности образования руд месторождения Кун-Манье на основе изучения рудных минералов.

В качестве материалов исследования использовалась коллекция рудных образцов месторождения, поверхности которых были шлифованы и отполированы для изучения в отраженном свете под поляризационным микроскопом. Представительность образцов определена тем, что они взяты с разных зон рудного тела. Для проведения минераграфического исследования использовался рудный поляризационный микроскоп ПОЛАМ Р-312. Методика определения и изучения рудных минералов под микроскопом описана в литературных источниках [5–8].

### 2. Геологическое строение месторождения

Под Кун-Маньенским рудным полем понимается площадь развития вкрапленных медно-никелевых руд, связанных пространственно и генетически с телами мафит-ультрамафитов одноименного интрузивного комплекса раннепротерозойского возраста и локализующихся в южном эндоконтакте Кун-Маньенского массива.

По простиранию рудное поле прослежено на 30 км, ширина варьирует от 2 до 3 км. В его состав входят 12 рудопроявлений и перспективных участков, три из них образуют месторождение Кун-Манье. Структурную основу рудного поля образуют никеленосные полого падающие на север и северо-восток пластины и линзовидно-пластовые интрузии мафит-ультрамафитов, залегающие, как правило, в несколько ярусов. Промышленное оруденение приурочено к некоторым из тел ультрамафитов, охватывая их полностью или частично как по мощности, так и по латерали. Наиболее часто рудоносными являются тела нижних ярусов. Нередко сульфидная минерализация распространяется и на экзоконтактовые зоны. В геологическом строении рудного поля принимают участие метаморфические стратифицируемые образования раннего архея, интрузивные комплексы архея, раннего протерозоя и мела [1; 9].

Рудоносность площади связана с кун-маньенским мафит-ультрамафитовым комплексом ( $vPR_1km$ ), который на площади проявлен весьма широко. В пределах рудного поля выявлено около 30 крупных и десятки мелких интрузий мафит-ультрамафитов, расположенных группами, часто в несколько ярусов (по вертикали), реже отмечаются одиночные разрозненные тела. Породы этого рудоносного комплекса представлены вебстеритами, плагиовестеритами (габбро-пироксенитами), лерцолитами, клино- и ортопироксенитами, верлитами. Наиболее широко среди них распространены габбро-пироксениты и вебстериты. Остальные разновидности пород встречаются значительно реже. Изредка отмечаются гарцбургиты и горнблендиты [10].

В большинстве случаев тела, особенно наиболее значительные по мощности (до 70–80 м) и протяженности, имеют с вмещающими породами контакты, осложненные зонами трещиноватости, дробления и милонитизации.

Месторождение локализовано в центральной части Кун-Маньенского рудного поля, целесообразность разработки которого установлена в ходе геолого-экономической оценки объекта.

В строении месторождения принимают участие три неравные по размерам и запасам залежи, расположенные на площади около 3 км<sup>2</sup>: Соболевская на юго-востоке и сближенные Шляпа и Треугольник на северо-западе.

Рудовмещающими образованиями являются пластовые и пластообразные тела ультраосновного состава кун-маньенского комплекса, залегающие среди пород кристаллического фундамента раннего архея – метагаббро майско-джанинского комплекса, гнейсов джанинской серии.

Зона окисления руд в пределах месторождения и всего рудного поля не развита. Причина этого, вероятно, заключается в повсеместном развитии многолетней мерзлоты. По визуальным наблюдениям в канавах верхняя часть коренных пород почти не подвергнута процессам выветривания. Вторичные минералы сульфидов (лимонит, малахит и др.) встречаются редко и в незначительных количествах.

Суммарные минеральные ресурсы месторождения Кун-Манье по состоянию на 2017 год оцениваются в 101,3 млн тонн руды, 770 тыс. тонн никеля, 207 тыс. тонн меди, 15,2 тыс. тонн кобальта, 16,7 тонны платины и 18,1 тонны палладия [11; 12].

### 3. Минеральный состав руд и особенности руд месторождения

По минеральному и петрографическому составу породы Кун-Маньенского рудного поля подразделяются на четыре группы: 1) габброиды – габбро, габбро-нориты, габбро-пироксениты (плагиовестериты); 2) пироксениты – вебстериты, клино- и ортопироксениты; 3) перидотиты – лерцолиты, верлиты, гарцбургиты; 4) серпентиниты. Преобладают среди них роговообманковые разновидности габбро-пироксенитов и пироксенитов. Руды содержат, кроме никеля, широкий ряд попутных компонентов, набор которых типичен для месторождений данного типа: Cu, Co, Pd, Pt, Au, Ag, S. По содержанию никеля и попутных элементов руды месторождения отнесены к рядовым [1].

Наиболее распространенными на месторождении Кун-Манье является вкрапленные и пятнистые руды, получивших широкое распространение на всех его изученных залежах, в меньшей степени – прожилково-вкрапленная текстура. Брекчиевидные и массивные руды развиты ограниченно и отмечены на залежи Соболевской.

Сульфидная минерализация пространственно и генетически связана с мафит-ультрамафитами кун-маньенского комплекса (часто оталькованными, серпентинизированными и серицитизированными), распространяясь также в ближние экзоконтакты [2].

### 4. Микроскопическое описание аншлифов

Коллекция рудных образцов месторождения была проанализирована с использованием рудного поляризационного микроскопа. Ниже представлено описание нескольких образцов.

Образец № 33 состоит из таких минералов, как ильменит (i) – 40 об. %, пирит (py) – 30 об. %, магнетит (mt) – 25 об. %, пентландит (pl) – 5 об. %, халькопирит (cu) – единичные зерна.

*Пирит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; встречается в виде гипидиоморфных и ксеноморфных агрегатов размерами до 400 мкм; отмечается неоднородное внутреннее строение (большинство зерен «изъедено» – диспергированная структура (рис. 1)); границы срастания с ильменитом и магнетитом довольно ровные.

*Ильменит.* Распределение по аншлифу неравномерное; представляет собой ксеноморфные и

гипидиоморфные агрегаты триклинной сингонии; наблюдается неоднородное внутреннее строение – графическая структура; границы срастания с другими минералами довольно ровные; размеры агрегатов доходят до 3 мм.

*Магнетит (титаномагнетит).* Распределение по площади аншлифа неравномерное; встречается в виде гипидиоморфных и диспергированных агрегатов; представлен в виде отдельных зерен различного размера до 100 мкм, иногда диспергированных и имеющих структуру перекристаллизации.

*Пентландит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное, встречается редко, представлен мелкими включениями в ильмените с магнетитом с большей отражательной способностью (светлее).

*Халькопирит.* Представлен единичными зернами размером до 50 мкм.

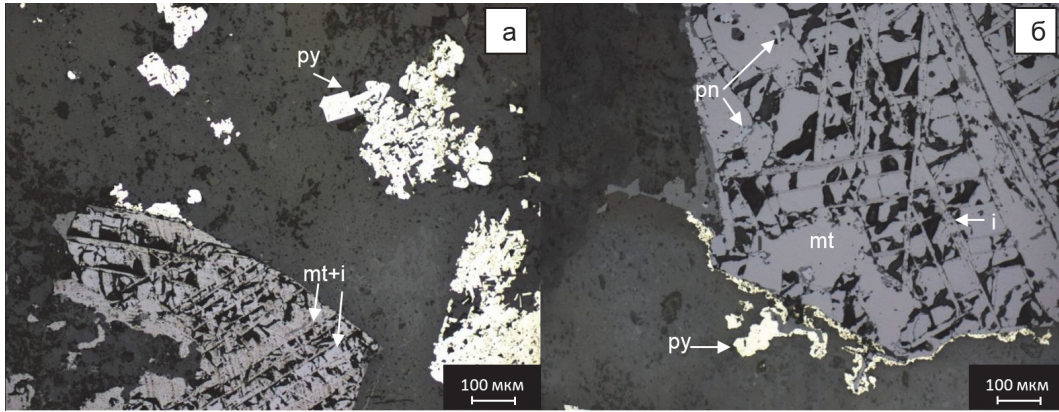
Образец № 34 состоит из ильменита (i) – 60 об. %, магнетита (mt) – 20 об. %, пирита (py) – 16 об. %, халькопирита (cu) – 4 об. %.

*Пирит.* Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в основном в виде отдельных гипидиоморфных зерен; внутреннее строение неоднородное (отмечается наличие дефектов и мелких тонких трещин); размер зерен до 100 мкм.

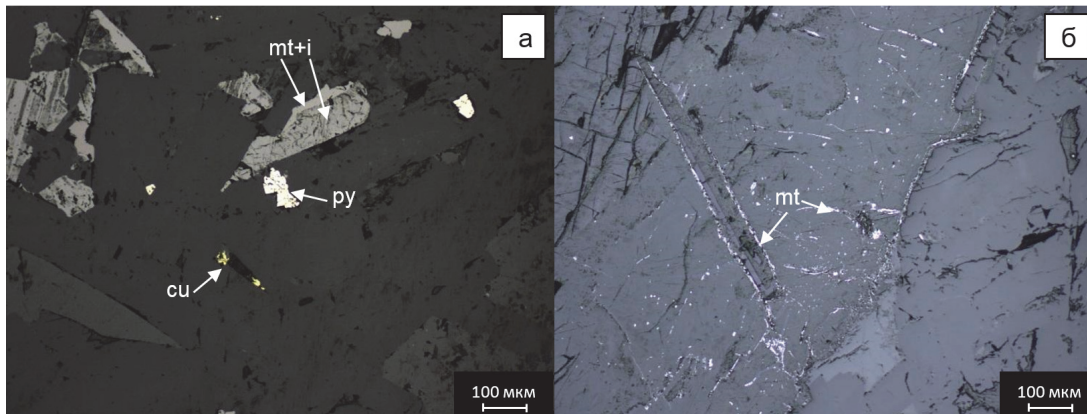
*Халькопирит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен мелкими (до 40 мкм) ксеноморфными и единичными изометрическими зернами; отмечается неоднородное внутреннее строение в виде трещин.

*Ильменит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен в виде сероватобелых с очень слабым коричневатым оттенком гипидиоморфных и ксеноморфных зерен (тригональная сингония); имеет характерное двойникование в 1–2 направлениях (рис. 2, а); внутреннее строение неоднородное (отмечаются дефекты – зерна словно «изъедены»); размер зерен в среднем 100–500 мкм; границы срастания с магнетитом довольно ровные.

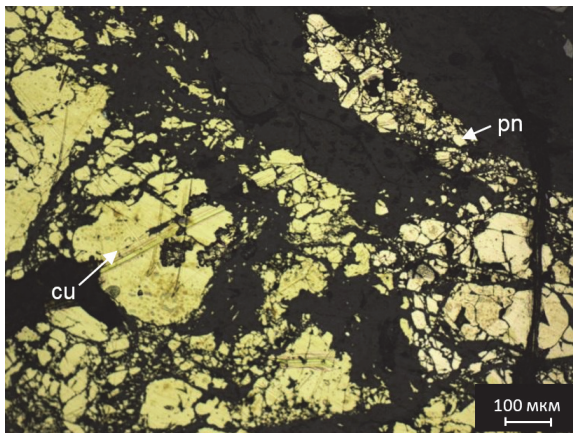
*Магнетит.* Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в виде ксеноморфных и гипидиоморфных агрегатов; внутреннее строение агрегатов близко к однородному; встречается в виде мелких диспергированных агрегатов, как бы окаймляющих минералы вмещающих пород (рис. 2, б).



**Рис. 1.** Микрофотография рудного образца № 33. Вкрапленная текстура:  
 а – сетка ильменита из распавшегося твердого раствора титаномагнетита, в котором выщелочен магнетит (серый) и пирит (белый с желтым оттенком);  
 б – графическая структура ильменита с включениями пентландита  
**[Figure 1.** Micrograph of ore sample No. 33. Interspersed texture:  
 а – a grid of ilmenite from a decayed solid solution of titanomagnetite, in which magnetite (gray) and pyrite (white with a yellow tint) are leached;  
 б – graphic structure of ilmenite with inclusions of pentlandite]



**Рис. 2.** Микрофотография рудного образца № 34:  
 а – структура замещения ильменит (i) и магнетита (mt); б – магнетит (титаномагнетит) в виде каемок во вмещающей породе  
**[Figure 2.** Micrograph of ore sample No. 34:  
 а – substitution structure of ilmenite (i) and magnetite (mt); б – magnetite (titanomagnetite) in the form of rims in the host rock]



**Рис. 3.** Микрофотография рудного образца № 35. Катакlastическая структура халькопирита и пирротина  
**[Figure 3.** Micrograph of ore sample No. 35. Cataclastic structure of chalcopyrite and pyrrhotine]

Образец № 35 состоит из халькопирита (cu) – 50 об. %, пирротина (pn) – 20 об. %, сфалерита (sf) – 20 об. %, пирита (py) – 10 об. %.

**Пирит.** Распределение неравномерное по площади аншлифа; представлен гипидиоморфными и ксеноморфными зёрнами с неоднородным внутренним строением; размеры зёрен до 100 мкм.

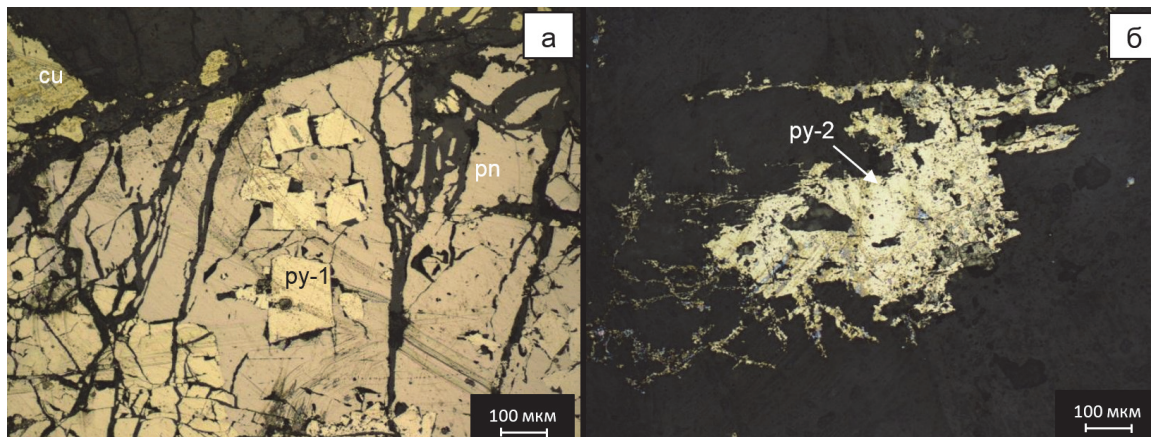
**Халькопирит.** Распределение по площади аншлифа неравномерное, ближе к пятнистому (агрегат размером 0,7 мм); представлен ксеноморфными агрегатами с катакlastической структурой (рис. 3); имеет достаточно ровные границы сращения с пирротинном и сфалеритом.

**Пирротин.** Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в виде ксеноморфных зёрен с катакlastической структурой, переходящей

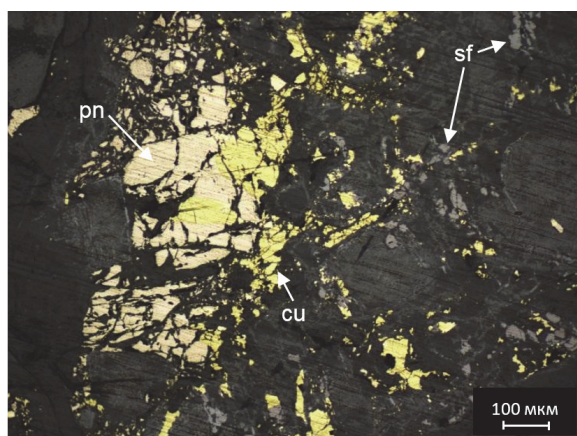
в диспергированную, развивается одновременно с халькопиритом; границы срастания с халькопиритом довольно ровные.

*Сфалерит*. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен чаще ксеноморф-

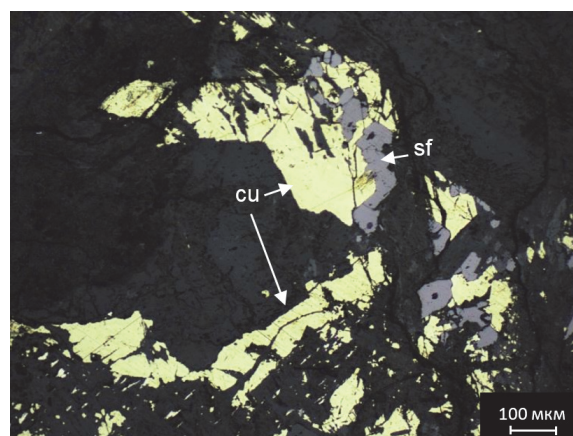
ными агрегатами, достигающими 0,2 мм; внутреннее строение неоднородное (имеются дефекты в виде трещин, образующие катакластическую структуру); границы срастания с халькопиритом – ровные.



**Рис. 4.** Микрофотография рудного образца № 36:  
 а – катакластическая структура и структура замещения – халькопирит и пирротин замещают пирит;  
 б – структура перекристаллизации – ксеноморфный диспергированный пирит  
**[Figure 4.** Micrograph of ore sample No. 36:  
 а – cataclastic structure and substitution structure – chalcopyrite and pyrrhotine replace pyrite;  
 б – recrystallization structure – xenomorphic dispersed pyrite]



**Рис. 5.** Микрофотография рудного образца № 37.  
 Катакластическая структура пирротина с халькопиритом  
**[Figure 5.** Micrograph of ore sample No. 37.  
 Cataclastic structure of pyrrhotine with chalcopyrite]



**Рис. 6.** Микрофотография рудного образца № 38.  
 Сфалерит образует агрегаты неправильной формы размером до 70 мкм в ксеноморфных зернах халькопирита  
**[Figure 6.** Micrograph of ore sample No. 38.  
 Sphalerite forms irregularly shaped aggregates up to 70 microns in xenomorphic chalcopyrite grains]

Образец № 36 состоит из халькопирита (cu) – 45 об. %, пирротина (pn) – 20 об. %, сфалерита (sf) – 20 об. %, пирита (py) – 15 об. %.

*Пирит*. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен гипидиоморфными и ксеноморфными зернами с неоднородным внутренним строением; отмечаются генерации: py-1

(представлен катакластическими и гипидиоморфными кубическими кристаллами – рис. 4, а) и py-2 (неравномерное распределение, представлен диспергированными ксеноморфными агрегатами – перекристаллизация – рис. 4, б).

*Халькопирит*. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен ксеноморф-

ными и катакластической агрегатами; имеет достаточно ровные границы срастания с пирротином и сфалеритом.

*Пирротин.* Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в виде ксеноморфных и катакластических зерен, развивается одновременно с халькопиритом – структура замещения пирита; границы срастания с халькопиритом довольно ровные.

*Сфалерит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен чаще ксеноморфными агрегатами; внутреннее строение неоднородное (дефекты в виде трещин); границы срастания с халькопиритом – ровные.

Образец № 37 состоит из пирротина (pn) – 30 об. %, халькопирита (cu) – 30 об. %, сфалерита (sf) – 25 об. %, пирита (py) – 15 об. %.

*Пирит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен гипидиоморфными и ксеноморфными зернами с неоднородным внутренним зональным строением – диспергированные, перекристаллизация.

*Халькопирит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен ксеноморфными и мелкими изометрическими зернами (перекристаллизация); имеет довольно ровные границы срастания с пирротином (рис. 5).

*Пирротин.* Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в виде ксеноморфных зерен, развивается вместе с халькопиритом; границы срастания с халькопиритом довольно ровные.

*Сфалерит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен зернами неправильной формы; внутреннее строение неоднородное (дефекты в виде трещин); границы срастания с халькопиритом – ровные.

Образец № 38 состоит из халькопирита (cu) – 40 об. %, сфалерита (sf) – 35 об. %, пирита (py) – 30 об. %, пирротина (pn) – единичные зерна.

*Пирит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен гипидиоморфными и ксеноморфными зернами с неоднородным внутренним зональным строением – «изъеденные», перекристаллизация.

*Халькопирит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен ксеноморфными и мелкими изометрическими зернами (перекристаллизация); имеет ровные границы срастания со сфалеритом (рис. 6).

*Сфалерит.* Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен зернами непра-

вильной формы; внутреннее строение неоднородное (имеются дефекты в виде трещин); границы срастания с халькопиритом – ровные.

*Пирротин.* Встречается в виде мелких единичных зерен с халькопиритом.

## **5. Минеральные парагенезисы, последовательность образования минералов**

Схема последовательности формирования руд месторождения основана на результатах изучения текстурных и структурных особенностей руд, а также возрастных соотношений минеральных агрегатов. В истории формирования руд месторождения выделено три стадии: ранняя рудная (I), рудная (II), поздняя рудная (III) (см. таблицу).

*Пирит-магнетитовая ассоциация* представлена преимущественно гипидиоморфными зернами пирита-1 и ксеноморфными агрегатами магнетита, имеющими размеры до 200–500 мкм.

Пирит-1 – распределение неравномерное и часто встречается в образцах; представлен в виде гипидиоморфных и ксеноморфных зерен, реже – в виде мелких почти изометрических зерен во вмещающей породе; имеет диспергированную структуру, иногда – зональное строение; размеры до 500 мкм.

Магнетит – распределяется в аншлифах неравномерно; представлен ксеноморфными агрегатами размером до 200 мкм, иногда диспергированных, образующих структуру перекристаллизации; имеет ровные границы срастания с ильменитом.

*Полиметаллическая ассоциация (сфалерит-пирротин-халькопирит-пирит-магнетит-ильменитовая)*, в которой сфалерит с халькопиритом и пирротином представлены ксеноморфными агрегатами, заполняющими пространство между зернами пирита, нередко образуя катакластическую структуру. Также в это время минералообразования формировались агрегаты ильменита путем выщелачивания раствора магнетита из титаномагнетита.

Халькопирит – в аншлифах распределен неравномерно; находится в виде ксеноморфных и катакластических агрегатов, а также в виде мелких зерен во вмещающей породе (до 10 мкм).

Сфалерит – неравномерное распределение в аншлифах; представлен ксеноморфными зернами до 0,2 мм.

Пирротин – распределен в аншлифах неравномерно; встречается в виде ксеноморфных и ка-

такластических агрегатов, развивается совместно с халькопиритом, размеры до 3 см.

Ильменит – неравномерное распределение в аншлифах; отмечается графическая структура (представлена в виде сетки ильменита, образовавшегося, скорее всего, из титаномагнетита, из которого был выщелочен магнетит).

*Халькопирит-ильменитовая (сфалерит-пирротин-халькопирит-ильменитовая) ассоциация* представляет собой неравномерно распределенные, доминирующие в объемном количестве зерна халькопирита и ильменита, а также зерна сфалерита и пирротина (описание минералов приведено выше).

Таблица

**Схема последовательности минералообразования в рудах месторождения Кун-Манье**  
[Table. The sequence of mineral formation in the ores of the Kun-Manye deposit]

СТАДИИ [STAGES]	Ранняя [Early]	Основная [Basic]			Поздняя [Late]
Минеральные ассоциации [Mineral associations]	пирит-магнетитовая [pyrite-magnetite]	полиметаллическая [polymetallic]	халькопирит-ильменитовая [chalcopyrite-ilmenite]	пентландитовая [pentlandite]	пиритовая [pyrite]
Оливин [Olivine]	██████████				
Пироксен [Pyroxene]	██████████				
Плагиоклаз [Plagioclase]	██████████				
Пирит [Pyrite]		██████████			██████████
Магнетит [Magnetite]		██████████			
Сфалерит [Sphalerite]			██████████		
Халькопирит [Chalcopyrite]			██████████		
Пирротин [Pyrrhotine]			██████████		
Ильменит [Ilmenite]			██████████		
Карбонат [Carbonate]					██████████
Пентландит [Pentlandite]				██████████	
Блеклая руда [Fahlore]				██████████	

Примечание: — — — — — тектонические перерывы; ██████████ – главные минералы; ██████████ – второстепенные минералы; ██████████ – редкие минералы.

Note: — — — — — tectonic fissures; ██████████ – major minerals; ██████████ – minor mineral; ██████████ – rare mineral.

*Пентландитовая ассоциация.* Пентландит представлен мелкими, почти изометрическими включениями в ильмените с магнетитом; в аншлифах распределяется неравномерно; встречается редко, размеры до 10 мкм.

В гидротермальном этапе (*пиритовая ассоциация*), образовался пирит второй генерации – распределение неравномерное в аншлифах; встречается редко в виде идиоморфных и катакластических кристаллов, замещающихся халькопиритом и пирротинном; размеры кристаллов достигают 400 мкм.

Изучение образцов показало, что рудная минерализация сформировалась в два этапа:

1) магматического (ранняя и основная стадии минералообразования), в пределах которого выделено три ассоциации минералов: пирит-магнетитовая, полиметаллическая (сфалерит-пирротин-халькопирит-пирит-магнетит-ильменитовая), пентландитовая;

2) гидротермального (поздняя стадия), в котором выделена пиритовая ассоциация.

Полученные результаты коррелируют с результатами других исследователей по схожим медно-никелевым объектам [13–19].

## Заключение

На месторождении по структурно-текстурным особенностям можно выделить несколько типов сульфидных руд: наиболее распространенные – вкрапленные и пятнистые, в меньшей степени – прожилково-вкрапленная, редко – брекчиевидные и массивные.

В результате проведенного исследования рудных образцов медно-никелевого месторождения Кун-Манье была установлена последовательность минералообразования и выявлены парагенетические ассоциации и порядок их образования. Формирование рудной минерализации происходило в два этапа: магматический и гидротермальный. Определено, что основными среди рудных минералов являются пирротин, пентландит, также встречаются – пирит, халькопирит, реже – ильменит, магнетит, сфалерит, элементы платиновой группы.

## Список литературы

1. Карлюсов Е.Д. Технично-экономическое обоснование временных разведочных кондиций на вкрапленные медно-никелевые руды объекта Кун-Манье: протокол ГКЗ Роснедра № 236-к от 23 апреля 2008 г. Красноярск: ОАО «СибцветметНИИпроект», 2007.

2. Гурьянов В.А., Приходько В.С., Петухова Л.Л., Песков А.Ю. Минералого-геохимические особенности даек коматиитов Кун-Маньенского рудного поля: источники, условия и обстановка формирования (юго-восточное обрамление Сибирской платформы) // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: материалы V Международной конференции (Гремячинск, 2–6 сентября 2017 г.). Улан-Удэ: Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, 2017. С. 105–107.

3. Песков А.Ю., Диденко А.Н., Гурьянов В.А. Эволюция палеопротерозойского мафит-ультрамафитового магматизма Кун-Маньенского рудного поля (Алдано-Становой щит) по палеомагнитным данным // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 5. С. 3–15.

4. Степанов В.А. Платиноидно-медно-никелевые провинции Северо-Азиатского кратона // Региональная геология и металлогения. 2013. № 56. С. 78–87.

5. Исаенко М.П., Боршианская С.С., Афанасьева Е.Л. Определитель главнейших минералов руд в отраженном свете. М.: Недра, 1986.

6. Попов В.А. Морфологическая информативность минералов // Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы конференции. Екатеринбург – Миасс, 2010. С. 54–55.

7. Коваль И.К., Коробкина Т.П. Основы минералогии. Воронеж: ВГУ, 2011.

8. Bernhard P. The Ore Minerals under the Microscope: An Optical Guide. 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier, 2016. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01360-9>

9. Гурьянов В.А., Петухова Л.Л., Приходько В.С., Матвеев А.В., Вельма А.М., Алексеев М.И., Кремнецкий М.И. Оценка перспектив никеленосности юго-восточного обрамления Сибирской платформы // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: Четвертая Всероссийская научная конференция с международным участием (Благовещенск, 5–7 октября 2016 г.). Благовещенск: Буквица, 2016. С. 48–51.

10. Копылов М.И., Тихомирова А.И. Особенность вещественного состава и специализация габброанортозитовых массивов Дальневосточного пояса на титановые и медно-никелевые руды // XVI Ферсмановская научная сессия ГИ КНЦ РАН: сборник трудов (Апатиты, 7–10 апреля 2019 г.). Апатиты, 2019. № 16. С. 288–293. <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.058>

11. Кун-Манье // NEDRADV (Недра ДВ). URL: <https://nedradv.ru/nedradv/invetsp/?obj=c5bfec301d9737167c9489604b0d1ff7#about> (дата обращения: 15.02.2020 г.).

12. Project Background / Amur Minerals Corporation (AMC). URL: <https://amurminerals.com/project-details> (дата обращения: 15.02.2020 г.).

13. Гурьянов В.А., Приходько В.С., Пересторонин А.Н., Потоцкий Ю.П., Петухова Л.Л., Соболев Л.П. Новый тип медно-никелевых месторождений юго-востока Алдано-Станового щита // Доклады академии наук. 2009. Т. 425. № 4. С. 505–508.

14. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006.

15. Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. СПб.: СПбГУ, 2003.

16. Маракушев А.А., Паняк Н.А., Зотов И.А. Проблемы формирования медно-никелевых сульфидных месторождений // Руды и металлы. 2002. № 2. С. 23–33.

17. Barnes S.J., Mungall J.E., Le Vaillant M., Godel B., Leshner C.M., Howell D., Lightfoot P.C., Krivolutskaia N., Wei B. Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: disseminated and net-textured ores // American Mineralogist. 2017. Vol. 102. No. 3. Pp. 473–506. doi: <https://doi.org/10.2138/am-2017-5754>

18. Schulz K.J., Woodruff L.G., Nicholson S.W., Seal R.R. II, Piatak N.M., Chandler V.W., Mars J.L. Occurrence model for magmatic sulfide-rich nickel-copper (platinum-group element) deposits related to mafic and ultramafic dike-sill complexes: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–I. 2014. 80 p. <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070I>

19. Liu Y.G., Li W.Y., Lü X.B., Huo Y.H., Zhang B. The Pobei Cu-Ni and Fe ore deposits in NW China are comagmatic evolution products: evidence from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and geochemistry // Geologica Acta. 2017. Vol. 15. No. 1. Pp. 37–50. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2017.15.1.4>



**Для цитирования**

Котельников А.Е., Колмакова Д.А., Котельникова Е.М. Определение последовательности образования медно-никелевых руд месторождения Кун-Манье (Амурская

область) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 48–57. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-48-57>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-48-57

Research paper

## Determination of the copper-nickel ores formation sequence of the Kun-Manye deposit (Amur region)

Alexander E. Kotelnikov, Daria A. Kolmakova, Elena M. Kotelnikova

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

*Article history:*

Received: April 10, 2020

Revised: April 23, 2020

Accepted: April 29, 2020

*Keywords:*

Kun-Manie, Zeya district, copper-nickel deposit, microscopy, mineral associations, paragenesis

The purpose of the article is to determine the sequence of mineral formation of copper-nickel ores of Kun-Manie deposit, which is located in Zeya district of Amur region. Three ore chutes take part in the structure of the deposit. Ore-bearing formations are sheet and sheetlike bodies of ultrabasic composition of the Kun-Manien complex, lying among rocks of crystal foundation of the Early Archean. Among the rocks, hornblende differences of gabbro-pyroxenites and pyroxenites predominate. In addition to nickel, the ores contain a wide range of associated components. The ores oxidation zone within the deposit and the entire ore field is not developed. The relevance of the work is due to the fact that detailed studies of ore minerals have not previously been carried out. The study presented in the work was conducted by polarizing ore microscope on polished ore samples characterizing different zones of the ore body. The result of the study was the establishment of mineral paragenesis and the sequence of mineral formation. It has been determined that the main ore minerals are pyrrhotite, pentlandite, also found – pyrite, chalcopyrite, less often – ilmenite, magnetite, sphalerite, platinum group elements. Ore mineralization formed in two stages. The magmatic stage is an early and main mineral formation phases including pyrite-magnetite, polymetallic and pentlandite associations. The hydrothermal stage is a late phase involving a pyrite association.

**References**

1. Karalyusov ED. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vremennykh razvedochnykh konditsii na vkraplennyye medno-nikelevyye rudy ob'ekta Kun-Man'e* [Feasibility study of temporary exploration conditions for disseminated copper-nickel ores at the Kun-Manye site]: Protocol GKZ Rosnedra No. 236-k dated April 23, 2008. Krasnoyarsk: OJSC "SibsvetmetNIIproekt"; 2007. (In Russ.)
2. Guryanov VA, Prikhodko VS, Petukhova LL, Peskov AY. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti daek

komatiitov Kun-Man'enskogo rudnogo polya: istochniki, usloviya i obstanovka formirovaniya (yugo-vostochnoe obramlenie Sibirskoi platformy) [Mineralogical and geochemical features of the Kun-Manye ore field katiitis dikes: sources, conditions and formation conditions (southeastern border of the Siberian platform)]. *Ul'tramafit-mafitovyye kompleksy: geologiya, stroenie, rudnyi potential* [Ultramafic-mafic complexes: geology, structure, ore potential]: *proceedings of Fifth International Conference (Gremyachinsk, September 2–6, 2017)*. Ulan-Ude: Dorji Banzarov Buryat State University; 2017. p. 105–107. (In Russ.)

3. Peskov AY, Didenko AN, Guryanov VA. Paleoproterozoic Evolution of Mafic-Ultramafic Magmatism of the Kun-Manie Ore Field (Aldan-Stanovoy Shield): Evidence from Paleomagnetic Data. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2018;12(5):341–353. (In Russ.)

4. Stepanov VA. Platinoidno-medno-nikelevyye provintsi Severo-Aziatskogo kratona [Platinum-copper-nickel provinces of the North-Asian craton]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional geology and metallogeny]. 2013;56:78–87. (In Russ.)

*Alexander E. Kotelnikov*, Associate Professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering of Engineering Academy of RUDN University, PhD in Geology, Scopus Author ID: 57205586833, Web of Science ResearcherID: O-3821-2019, eLIBRARY SPIN-код: 6280-5070, AuthorID: 590048, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0622-8391>, [kotelnikov-ae@rudn.ru](mailto:kotelnikov-ae@rudn.ru)

*Daria A. Kolmakova*, student of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

*Elena M. Kotelnikova*, senior lecturer of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering of Engineering Academy of RUDN University, PhD in Geology, Scopus Author ID: 57205571168, Web of Science ResearcherID: L-7272-2018, eLIBRARY SPIN-код: 8173-9810, AuthorID: 728378, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8909-8953>

5. Isaenko MP, Borishanskaya SS, Afanasyeva EL. *Opredelitel' glavnishikh mineralov rud v otrazhennom svete [Key to the most important minerals of ores in reflected light]*. Moscow: Nedra Publ.; 1986. (In Russ.)
6. Popov VA. Morfologicheskaya informativnost' mineralov [Morphological information content of minerals]. *Mineraly: stroenie, svoystva, metody issledovaniya [Minerals: structure, properties, research methods]*: conference proceedings. Ekaterinburg, Miass; 2010. p. 54–55. (In Russ.)
7. Koval IK, Korobkina TP. *Osnovy minerografii [The basics of mineragraphy]*. Voronezh: Voronezh State University; 2011. (In Russ.)
8. Bernhard P. *The Ore Minerals Under the Microscope: An Optical Guide*. 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier; 2016. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01360-9>
9. Guryanov VA, Petukhova LL, Prikhodko VS, Matveev AV, Velma AM, Alekseev MI, Kremenetsky MI. Otsenka perspektiv nikelenosnosti yugovostochnogo obramleniya Sibirskoi platform [Assessment of the prospects for nickel content of the southeastern frame of the Siberian platform]. *Voprosy geologii i kompleksnogo osvoeniya prirodnikh resursov Vostochnoi Azii [Questions of geology and integrated development of natural resources of East Asia]: proceedings of Fourth All-Russian Scientific Conference with International Participation (Blagoveshchensk, October 5–7, 2016)*. Blagoveshchensk: Bukvitsa Publ.; 2016. p. 48–51. (In Russ.)
10. Kopylov MI, Tikhomirova AI. Osobennost' veshchestvennogo sostava i spetsializatsiya gabbroanortozitovykh massivov Dal'nevostochnogo poyasa na titanovye i medno-nikelevye rudy [Mineralogical composition and specialization of the gabbro-anorthosite massifs of the Far Eastern belt for titanium and copper-nickel ores]. *XVI Fersmanovskaya nauchnaya sessiya GI KNTs RAN [16<sup>th</sup> Fersmanov Scientific Session of the Geological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]: session proceedings (Apatity, April 7–10, 2019)*. Apatity; 2019. No. 16. p. 288–293. <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.058> (In Russ.)
11. Kun-Manye. *NEDRADV*. Available from: <https://nedradv.ru/nedradv/investsp/?obj=c5bfec301d9737167c9489604b0d1ff7#about> (accessed: February 15, 2020). (In Russ.)
12. Amur Minerals Corporation (AMC). *Project Background*. Available from: <https://amurminerals.com/project-details> (accessed: February 15, 2020).
13. Guryanov VA, Prikhodko VS, Perestoronin AN, Pototsky YuP, Petukhova LL, Sobolev LP. Novyi tip medno-nikelevykh mestorozhdenii yugo-vostoka Aldano-Stanovogo shchita [A new type of copper-nickel deposits in the south-east of the Aldan-Stanovoi shield]. *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*. 2009;425(4):505–508. (In Russ.)
14. Likhachev AP. *Platino-medno-nikelevye i platinovye mestorozhdeniya [Platinum-copper-nickel and platinum deposits]*. Moscow: Eslan Publ.; 2006. (In Russ.)
15. Naldrett AJ. *Magmaticheskie sulfidnye mestorozhdeniya medno-nikelevykh i platinometall'nykh rud [Magmatic sulfide deposits of copper-nickel and platinum metal ores]*. Saint Petersburg: SPbSU Publ.; 2003. (In Russ.)
16. Marakushev AA, Paneyakh NA, Zotov IA. Problemy formirovaniya medno-nikelevykh sulfidnykh mestorozhdenii [Problems of the formation of copper-nickel sulfide deposits]. *Rudy i metally [Ores and metals]*. 2002; 2:23–33. (In Russ.)
17. Barnes SJ, Mungall JE, Le Vaillant M, Godel B, Leshner CM, Holwell D, Lightfoot PC, Krivolutsкая N, Wei B. Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: disseminated and net-textured ores. *American Mineralogist*. 2017;102(3):473–506. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5754>
18. Schulz KJ, Woodruff LG, Nicholson SW, Seal RR, II, Piatak NM, Chandler VW, Mars JL. *Occurrence model for magmatic sulfide-rich nickel-copper-(platinum-group element) deposits related to mafic and ultramafic dike-sill complexes: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–I*. 2014. <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070I>
19. Liu YG, Li WY, Lü XB, Huo YH, Zhang B. The Pobei Cu-Ni and Fe ore deposits in NW China are comagmatic evolution products: evidence from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and geochemistry. *Geologica Acta*. 2017;15(1):37–50. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2017.15.1.4>

#### For citation

Kotelnikov AE, Kolmakova DA, Kotelnikova EM. Determination of the copper-nickel ores formation sequence of the Kun-Manye deposit (Amur region). *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):48–57. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-48-57> (In Russ.)