

Характерно отсутствие граната. Хлорит (прохлорит) в виде пятен развивается по эпидот-серицитовой (парагонит-мусковитовой) массе. Из светлых слюд преобладает серицит. Мусковит в перекристаллизованных чешуйках до 0,5–1 мм развит спорадически.

Гранат-мусковит-хлоритовая ступень наиболее распространена, образуется при возрастании температуры. Парагенезис — $xl+mu+par+kv+ab+зональный\ гр.$ Основными минералами являются: хлорит (рипидолит) со средней железистостью $f = 55\text{--}58\%$ и содержанием Al_2O_3 до 20 %. Размер мусковита (фенгита) и парагонита укрупняется почти повсеместно. Формируются плотные «пакеты» мусковита-парагонита-хлорита. Гранат зональный с марганцовистым ядром (9–14 % MnO) и алмандиновой оторочкой. Развивается сланцеватость с одновременной сегрегацией кварца, альбита и хлорито-слюдистых минералов, вследствие чего образуются полосчатые, линзовидно-полосчатые текстуры сланцев.

Гранат-биотитовая ступень. С дальнейшим повышением температуры связано появление парагенезиса $bi+Al-xl+mu\pm par+kv+ab+существенно\ альмандиновый\ гр.$ Парагенезис $gr+xl+bi$ считается критическим для верхней границы зеленосланцевой фации до границы со ставролитом [6]. Биотит в этой ассоциации не является ведущим минералом, т.к. его стабильность в умеренно глиноземистых породах зависит от температуры и отношения $Al/Mg+Fe$ в породе — стабильны либо $xl+mu$, либо $bi+mu+xl$ в сравнительно железистых породах [6].

Серицитовые сланцы, несмотря на высокое содержание светлых слюд, имеют ограниченное промышленное значение, т.к. относятся к труднообогатимым рудам. Основной промышленный интерес представляют перекристаллизованные светлые слюды гранат-мусковит-хлоритовой и гранат-биотитовой ступеней метаморфизма. Максимум перекристаллизация, укрупнение чешуек достигают в контакте прожилков и линз изофациального мономинерального крупнозернистого светлого кварца. При этом происходит только изменение облика полезного ископаемого, а концентрация остается прежней.

Температура кристаллизации мусковита-фенгита нами оценена с использованием фазовой диаграммы «мусковит-парагонит» Эйгстера и Йодера [3]. Содержание парагонитовой составляющей в мусковитах, сосуществующих с парагонитом, составляет 5–12 мол. %, чему соответствует температурный интервал кристаллизации мусковита-фенгита в $320\text{--}420^\circ$, т.е. типичные температуры зеленосланцевой фации метаморфизма. Состав мусковита (фенгита) типичен для этих условий образования и характеризуется избытком Si и недостатком Al, повышенным содержанием Mg, Fe, что отличает его от мелкочешуйчатого мусковита в сланцах, метаморфизованных в условиях других фаций (табл. 3). Повышенное содержание фемических компонентов может ограничивать область его применения. Специфической особенностью слюдистых сланцев является присутствие в составе светлых слюд наряду с мусковитом парагонита.

Таким образом, мусковит и парагонит образовались в результате метаморфизма терригенных и меньше вулканогенно-осадочных пород в условиях фации зеленых

сланцев. На разных ступенях процесса метаморфизма при повышении его температуры они изменялись в результате перекристаллизации от серицитов, до средне-, крупночешуйчатых образований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великославинский, Д.А. Сравнительная характеристика регионального метаморфизма умеренных и низких давлений / Д.А. Великославинский. — Л.: Наука, 1972. — 192 с.
2. Винклер, Г. Генезис метаморфических пород / Г. Винклер. — М.: Недра, 1979. — 327 с.
3. Дир, У.А. Породообразующие минералы. Т. 3. Листовые силикаты / У.А. Дир, Р.А. Хауи, Дж. М. Зусман. — М.: Мир, 1966. — 320 с.
4. Добрецов, Н.Л. Фации регионального метаморфизма умеренных давлений / Н.Л. Добрецов, В.С. Соболев, В.В. Хлестов. — М.: Недра, 1972. — 288 с.
5. Добродородный, В.Н. К стратиграфии протерозоя Бечасынской зоны: Сб. докладов «Проблемы геологии докембрия юга России» / В.Н. Добродородный. — Новочеркасск, 2003. — С. 47–68.
6. Кориковский, С.П. Фации и субфации регионального метаморфизма в бедных CaO породах / Термодинамический режим метаморфизма / С.П. Кориковский. — Л.: Наука, 1976. — С. 127–138.
7. Щипцов, В.В. Мусковитовые кварциты Карелии — новый тип слюдяного сырья / В.В. Щипцов, Л.С. Скамницкая, Т.П. Бубнова и др. // Геология и полезные ископаемые Карелии. — Вып. 6. — Петрозаводск, 2003. — С. 67–77.

© Коллектив авторов, 2016

Сапожникова Лариса Николаевна // sapojnikova@vims-geo.ru

Быстров Иван Георгиевич // bysivg@gmail.com

Иоспа Анастасия Владимировна // vims-rentgen@mail.ru

Добродородный Владимир Николаевич // sevka@yandex.ru

Доля Алексей Николаевич // sevka@yandex.ru

Омельченко Владислав Леонидович // vlomelchenko.geo@gmail.com

УДК 549.283:553.04

Ожогин Д.О. (ООО «ГРК»)

ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПИРИТА ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНЫХ РУД СХОЛОЖСКОГО ТИПА

*Выявлены типоморфные особенности пирита золотосульфидных руд месторождений Сухой Лог и Маломыр (морфология выделений, реальный состав и физические свойства), которые могут быть использованы при поисках и оценке руд, локализованных в углеродисто-терригенных отложениях. **Ключевые слова:** золотосульфидные руды, рудная стадия, пирит, генерация, типоморфные особенности, микро-нанопарагенезис, микротвердость, проводимость.*

Ozhogin D.O. (GRK)

TYPOMORPHIC FEATURES OF PYRITE GOLD-SULFIDE ORE SUKHOLOZHSKY TYPE

*There were revealed typomorphic features of pyrite gold-sulfide ore deposit Sukhoi Log and Malomyr (morphology selections, the real composition and physical properties), which can be used in the search for and evaluation of ore trapped in carbon-clastic sediments. **Keywords:** gold-sulfide ore, ore stage, pyrite, generation, typomorphic especially, micro-nano pairagenesis, microhardness, conductivity.*

Месторождения золота, локализованные в углеродисто-терригенных отложениях, в мировой практике считаются наиболее перспективными, с ними связано 12 %

мировых запасов металла [5]. В России к месторождениям подобного типа относятся Наталкинское, Нежданинское, Майское. Крупнейшим среди них является месторождение Сухой Лог, приуроченное к черносланцевым толщам Байкало-Патомского нагорья (северное крыло Маракано-Тунгусской синклинали), сформированное терригенно-карбонатными осадочно-метаморфическими породами верхнепротерозойского возраста.

В середине прошлого века в Приамурье выявлено золоторудное месторождение Маломир, которое по вещественному составу руд и вмещающих пород, закономерностям распределения оруденения и особенностям генезиса может рассматриваться как объект сухоложского типа [1]. Месторождение находится в западной части Приохотского звена Амуро-Охотской геосинклинально-складчатой системы, сформировано комплексом континентально-осадочных метаморфизованных отложений, относящихся к среднему карбону.

Золотосульфидные руды месторождений Сухой Лог и Маломир сформировались в результате гидротермально-метасоматического процесса и последующих пострудных изменений, определивших их современный облик. В формировании золоторудной минерализации этих месторождений выделено три стадии: дорудная, рудная и пострудная. Прожилково-вкрапленные золотосульфидные руды образовались в рудную стадию, в которой выделено три подстадии — ранняя, продуктивная и поздняя, каждой из которых соответствует своя минеральная ассоциация, отличающаяся своеобразным текстурно-структурным рисунком, постоянным набором рудных минералов, особенностями их состава и строения [2, 4]. Руды отличаются сложными взаимоотношениями слагающих их минеральных агрегатов, разновременными ассоциациями и генерациями рудных минералов, характером локализации в них золота.

В минералогии золотосульфидных руд этих месторождений прослеживаются как черты сходства, так и различия. Тем не менее, исследование главного золото-содержащего минерала руд — пирита, являющегося «сквозным» во всех ассоциациях, комплексом современных физических методов минералогического анализа позволило выявить особенности минералов, которые могут рассматриваться в качестве типоморфных.

Золотосульфидные руды месторождений сформированы тремя рудными минеральными ассоциациями, присущими подстадиям рудной стадии. В рудах месторождения Сухой Лог выделены сидерит-кварц-сфалерит-халькопирит-пирротин-пиритовая, сидерит-анкерит-хлорит-кварц-пирротин-сфалерит-халькопирит-галенит-пиритовая, анкерит-кварц-пиритовая парагенетические минеральные ассоциации [7]. В рудах месторождения Маломир присутствуют пирротин-марказит-пиритовая, халькопирит-сфалерит-арсенопирит-пиритовая и арсенопирит-пиритовая рудные ассоциации, вмещающими породами которых соответственно являются кварцевые метасоматиты, березиты и метасоматические гидротермальные породы полевошпат-кварцевого и реже карбонатного состава [2]. В каждой ассоциации присутствует пирит определенной генерации, отличающийся морфологическими особенностями, составом, физическими свойствами.

Пирит I генерации в рудах обоих месторождений представлен тонкой сыпьевидной, пылевидной вкрапленностью, иногда практически округлыми «глазковыми» выделениями. Четко прослеживаются перераспределение и перекристаллизация пирита, выражающиеся не только в сегрегации его зерен, но и в образовании кристаллов практически кубической формы, которые несколько позже приобретают четко выраженные ступени и грани роста (рис. 1). В результате динамического воздействия иногда происходит деформация отдельных микроструктурных элементов пирита. Сопоставляя отдельные фрагменты и детали структурной перегруппировки пирита, можно говорить об его последовательном и закономерном преобразовании (перекристаллизации) — от беспорядочно тонко-рассеянных зерен до индивидов с четкими кристаллографическими очертаниями.

Пирит I генерации отличается нестехиометрическим составом. Для него типичен дефицит серы (отношение серы к железу составляет 1,95–1,99), обусловленный, вероятно, низкой активностью серы в минерализующем растворе в обстановке высокой температуры. В пирите всегда присутствует мышьяк, который изоморфно входит в структуру минерала (руды месторождения Маломир) или образует включения самостоятельных фаз. Пирит этой генерации, особенно руд месторождения Сухой Лог, отличается наиболее высоким содержанием

кобальта и постоянным присутствием никеля (отношение кобальта к никелю всегда больше 1). Нами установлено, что никель и кобальт не только изоморфно входят в структуру пирита, но и встречаются в виде микронановключений минералов. Реальный состав минерала определяет его физические свойства. Он обладает высокой микротвердостью (1522–1568 кг/мм², иногда микротвердость сухоложского кобальт-пирита до-

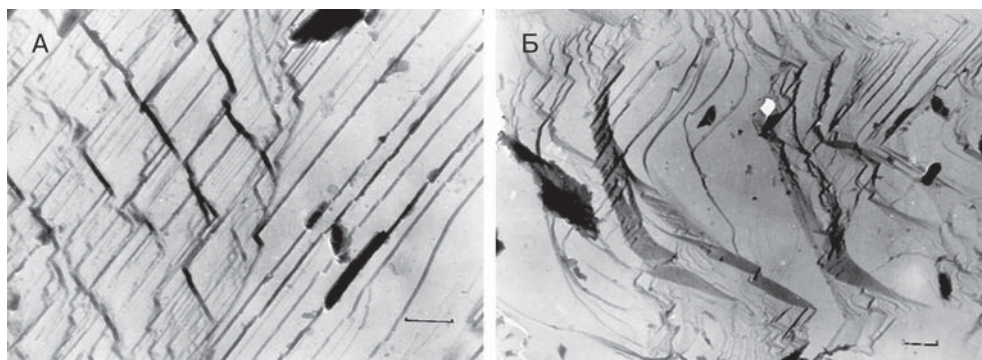


Рис. 1. Месторождение Сухой Лог. Пирит I генерации: А — четко выраженные грани и ступени роста, увел. 13000, угольная реплика со скола; Б — изогнутые поверхности ступеней роста, увел. 8000, угольная реплика с полированного шлифа

Минерал	Месторождения	
	Сухой Лог	Маломыр
Пирит I генерации	Миллерит, никелин, виоларит, бравоит, кобальтин, герсдорфит, сафлорит, раммельсбергит, скуттерудит, смальтин, глаукодит	Герсдорфит, кобальтин, макинавит, миллерит, бравоит, хизлевудит, каттерит, никелин, леллингит, раммельсбергит
Пирит II генерации	Петцит, гессит, берцелиит, умангит, науманнит, эвкайрит, маухерит, энаргит, коринит	Кобальтин, коринит, теннантин
Пирит III генерации	Алтаит, галенобисмутит, жозеит, арамайит, пиростильпнит, овихит, гитерманит, аргентит, висмутин, молибденит, буланжерит, тетрадимит, дискразит, цилиндрит	Акантит, аргентит, антимонит, сарторит, иорданит, теннантит, тетраэдрит, пруситит, ксантоконит, пираргирит, стефанит, геокронит, виттит

стигает 1734 кг/мм²) и устойчивыми значениями электронной проводимости (величина термоЭДС пирита руд месторождений Сухой Лог и Маломыр соответственно составляет от –25 до –60 и от –22 до –30 мкВ/град.).

В пирите руд обоих месторождений методами прецизионной минералогии выявлены микро-нанофазы рудных минералов (таблица). В пирите I генерации обнаружен типичный гидротермальный микропарагенезис сульфидов и арсенидов никеля и кобальта, позволяющий считать, что источником оруденения в данном случае являлись гидротермальные растворы, поднимающиеся с больших глубин, подводящими каналами для которых служили тектонические трещины.

Пирит II генерации представлен достаточно крупными кристаллами и метакристаллами, отличается исключительно идиоморфным строением. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что метакристаллы сформированы кристаллами кубической, реже пентагон-додекаэдрической формы (рис. 2). В рудах месторождения Сухой Лог пирит II генерации в основном образует комбинации кристаллов октаэдрической и пентагон-додекаэдрической, реже кубической формы.

Пирит II генерации в основном имеет стехиометрический состав (отношение серы к железу равно 2 и отношение никеля к кобальту меньше 1). Следует отметить, что в рудах месторождения Маломыр присутствует пирит II генерации, имеющий нестехиометрический состав (отношение серы к железу равно 2,02–2,04), в котором постоянно присутствует мышьяк, входящий как в структуру минерала, так связанный с арсенопиритом, иногда замещающим пирит. Микротвердость пирита II генерации в целом ниже, чем у пирита I генерации и равна 1342–1588 кг/мм² (руды месторождения Сухой Лог) и 1315–1495 кг/мм² (руды месторождения Маломыр). Для пирита типична смешанная проводимость при явно доминирующей роли дырочного типа. Электронная проводимость в основном отмечается по периферии крупных кристаллов. Значения термоЭДС

у пирита из руд месторождения Сухой Лог варьируют от –15 до +35 мкВ/град. Более высокие значения термоЭДС имеет пирит из руд месторождения Маломыр, дырочная проводимость изменяется от +90 до +110 мкВ/град., а электронная от –40 до –60 мкВ/град. Типоморфный микропарагенезис пирита II генерации руд месторождения Сухой Лог более разнообразен по сравнению с пиритом из

руд месторождения Маломыр (таблица). В пирите идентифицированы микрофазы теллуридов золота и серебра (петцит и гессит), сульфоарсениды меди, арсениды селениды никеля и кобальта, а также сульфоантимонитарсенит никеля. В пирите маломырских руд обнаружено всего три микрофазы кобальтин, коринит и As-разновидность блеклых руд — теннантит. В обоих случаях микро-напарагенезисы, присутствующие в пирите, однозначно указывают на его более позднюю кристаллизацию и понижение температуры рудообразующего раствора.

Появление в рудах месторождения Маломыр пирита II генерации с незначительным избытком серы, его более низкая микротвердость и более высокие значения термоЭДС, отсутствие в нем микрофаз теллуридов золота и серебра не исключают, что минерал находится в стадии перекристаллизации в пирите III генерации.

Пирит II является основным золотосодержащим минералом в рудах обоих месторождений. В нем присутствует как тонкодисперсное золото, кристаллизующееся, вероятно, одновременно с ним, так и наложенное более позднее золото (рис. 3) [4, 6].

Пирит III генерации представлен крупными порфиробластическими выделениями. Кристаллы пирита имеют исключительно кубическую форму и нередко грубую прерывисто линейную штриховку (рис. 4 А). В отличие от пирита II генерации минерал подвержен вторичным изменениям, особенно явно проявленным в маломырских рудах. Это «расщепление» кристаллов

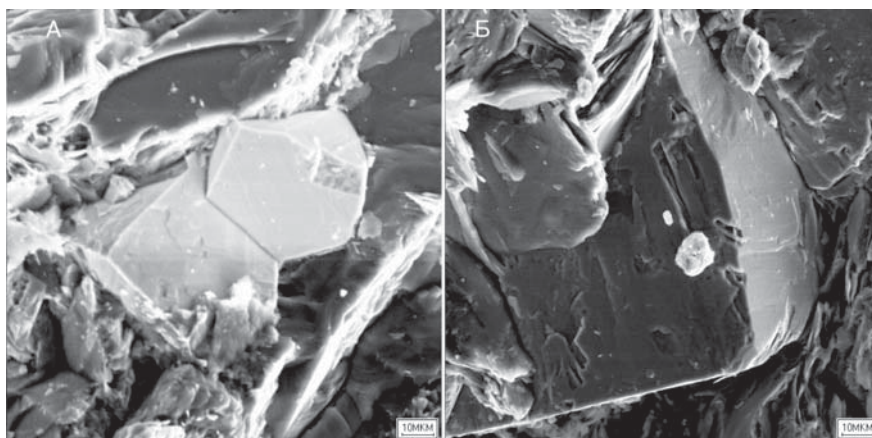


Рис. 2. Месторождение Маломыр. Идиоморфные (А) и панидиоморфные (Б) кристаллы пирита II генерации. РЭМ

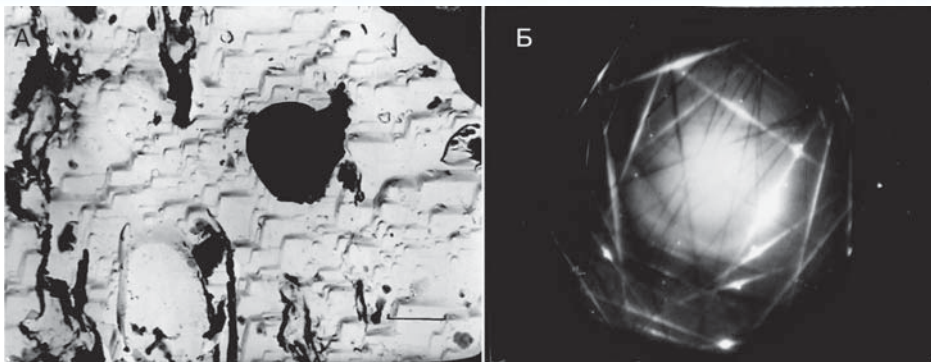


Рис. 3. Месторождение Сухой Лог. А — идиоморфный кристалл пирита II генерации ступенчатого микростроения с каплевидным включением самородного золота, прицельная угольная реплика с полированного шлифа, увел. 19000; Б — точечная электронограмма золота

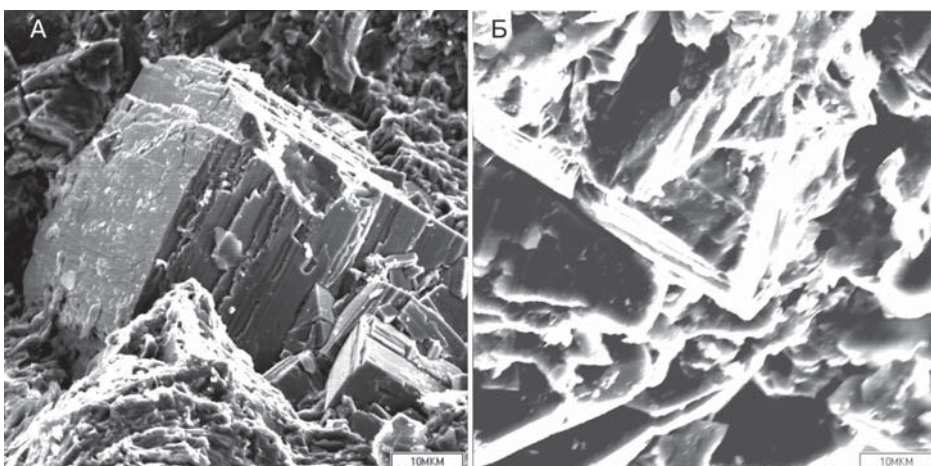


Рис. 4. Месторождение Маломыр. А — идиоморфный кристалл пирита III генерации с линейной штриховкой; Б — пирит III генерации с неравномерно выщелоченной поверхностью. РЭМ

на блоки, видимо, связанное с процессами катаклаза, выщелачивание поверхности зерен с образованием полостей разного размера и формы, коррозией арсенопиритом и нерудными минералами (рис. 4 Б). В пирите III генерации всегда отмечается значительное количество порообразующих и рудных минералов ранних ассоциаций.

Пирит III имеет нестехиометрический состав с явным преобладанием серы (отношение серы к железу равно 2,02–2,07, отношение никеля к кобальту всегда меньше 1). Пирит из руд месторождения Маломыр отличается наиболее высоким содержанием мышьяка по сравнению с пиритом ранних генераций, что обусловлено в основном присутствием значительного количества микро-нановключений блеклых руд. Пирит этой генерации в целом имеет наиболее низкие значения микротвердости (1245–1374 кг/мм²), преимущественно положительный характер проводимости (термоЭДС изменяется от +30 до +100 мкВ/град.), наиболее высокие значения типичны для пирита из руд месторождения Маломыр. Практически всегда отмечается, что краевые зоны пирита имеют низкие отрицательные значения термоЭДС, достигающие в среднем — 30 мкВ/град.

Для пирита III генерации типичен низкотемпературный микро-нанопарагенезис, представленный микро-

фазами сульфидов, антимонидов, висмутидов и сульфоселов серебра, меди и свинца, свидетельствующий о снижении температуры минералообразования к концу рудообразовательного процесса.

Выявленные особенности пирита разных генераций позволяют четко различать пирит различных минеральных ассоциаций, типичных для рудной стадии образования золотосульфидных руд месторождений Сухой Лог и Маломыр. На основании типоморфных особенностей пирита четко устанавливается минералогическая зональность золотосульфидного оруденения месторождений, выражающаяся в смене минеральных ассоциаций и соответственно пирита разных генераций с глубиной оруденения. В тоже время явно прослеживается постепенный переход пирита ранней генерации к пириту поздней генерации, что указывает на генетическую общность их образования.

Схожесть морфологии выделения, реального состава и физических свойств пирита изученных месторождений позволяет установить его типоморфные

особенности, которые, в свою очередь, могут быть использованы при поисках и оценке золотосульфидных руд сухоложского типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буряк, В.А. Маломыр — первое крупное золоторудное месторождение сухоложского типа в Приамурье / В.А. Буряк, А.Е. Пересторонин. — Благовещенск-Хабаровск: ИКАРП ДВО РАН, 2000. — 48 с.
2. Ожогин, Д.О. Вертикальная минералогическая зональность золотосульфидного оруденения месторождения Маломыр / Д.О. Ожогин, Н.И. Орлова, Н.Г. Власов и др. // Разведка и охрана недр. — 2008. — № 8. — С. 16–21.
3. Викулова, Л.П. Пирит — индикатор золотосульфидного оруденения / Л.П. Викулова, А.Н. Новикова, В.П. Котельников // Разведка и охрана недр. — 1980. — № 9. — С. 58–60.
4. Викулова, Л.П. Минералого-геохимические критерии золото-сульфидных руд Бодайбинского района / Л.П. Викулова, Е.Г. Ожогина, В.Т. Дубинчук, Е.А. Викулова // Благородные и редкие металлы Сибири и Дальнего Востока. Т.1. — Иркутск, 2005. — С. 122–127.
5. Дудкин, Н. Сырьевая база и мировой рынок золота / Н. Дудкин // Золото и технологии. — 2014. — № 1. (23). — С. 16–21.
6. Ожогин, Д.О. Минералогия золотосульфидных руд месторождения Маломыр (Дальний Восток) / Д.О. Ожогин // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2016. — № 1. С. 11–17.
7. Ожогин, Д.О. Наноминералогические особенности пирита месторождения Сухой Лог (Иркутская область) / Д.О. Ожогин, Л.П. Викулова // Доклады VIII Международной конф. «Новые идеи в науках о Земле». Т.3. — М., 2007. — С. 224–225.

© Ожогин Д.О., 2016

Ожогин Денис Олегович // ozhogindenis@yandex.ru