

Санкт-Петербургский государственный университет

ГОРЕЛОВА Анастасия Александровна

Выпускная квалификационная работа

**МИНЕРАЛОГИЯ БРАУНИТОВЫХ И ОКСИДНО-МАРГАНЦЕВЫХ РУД
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖОМАРТ**

Основная образовательная программа бакалавриата

«Геология»

Профиль: геохимический

Научный руководитель: к.г.-м.н., ст.преп.

ПЕРОВА Елена Николаевна

Рецензент: к.г.-м.н., старший научный сотрудник

Института минералогии УрО РАН Жуков Игорь Геннадьевич,

Санкт-Петербург

2018

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение..... | 4 |
| Глава 1. Геологическое положения месторождения Жомарт | 6 |
| Глава 2. Минеральные ассоциации главных типов руд | 8 |
| Браунитовые руды | 8 |
| Гаусманитовые руды | 9 |
| Глава 3. Характеристика минералов марганцевых руд | 10 |
| 3.1. Минералы браунитовых руд..... | 11 |
| 3.1.1. Породообразующие минералы | 11 |
| Браунит | 11 |
| Кварц | 15 |
| Кальцит | 16 |
| 3.1.2. Второстепенные минералы | 20 |
| Магнезиорибекит-экерманит | 20 |
| Эгирин..... | 23 |
| Титанит | 25 |
| Калиевый полевой шпат | 27 |
| Апатит | 27 |
| Циркон | 29 |
| Кентролит | 29 |
| Неонокит | 32 |
| Барит..... | 34 |
| Аксессуарные минералы | 35 |
| Другие оксиды..... | 35 |
| 3.2. Минералы гаусманитовых руд | 38 |
| 3.2.1. Породообразующие минералы | 38 |
| Гаусманит | 38 |
| Родонит | 41 |
| Кальцит | 45 |
| Тефроит..... | 46 |
| Барит..... | 47 |
| 3.2.2. Второстепенные минералы | 48 |
| Фриделит..... | 48 |
| Кариопилит..... | 50 |
| Кутнагорит..... | 51 |
| Браунит | 52 |
| Гематит..... | 53 |

| | |
|--|----|
| Пьемонтит..... | 53 |
| 3.2.3. Акцессорные минералы..... | 55 |
| Саркинит..... | 55 |
| Глава 4. Последовательность минералообразования..... | 57 |
| Заключение | 59 |
| Литература | 60 |

Введение

Месторождение Жомарт представляет собой железо-марганцевое месторождение в Карагандинской области Казахстана, к западу от г. Каражала. Месторождение входит в район, знаменитый своими свинцово-цинковыми и железо-марганцевыми месторождениями. Район примечателен тем, что прослой железо-марганцевых руд сменяются по простиранию свинцово-цинковыми. Месторождение открыто в 1945 г.

Целью моей работы является изучение минералогии железо-марганцевых, а именно браунитовых и гаусманитовых руд.

В процессе работы решались следующие задачи: диагностика главных и второстепенных минералов руд, изучение вариаций их химического состава, выделение минеральных парагенезисов и последовательностей их образования.

Актуальность работы заключается в том, что сейчас добыча марганцевых руд на месторождении не идет. Подробное изучение пород месторождения позволит подобрать правильную технологию обогащения для руд этого месторождения.

Для исследования образцов применялись следующие методы:

1. Минералого-петрографический анализ – анализ шлифов проведен на кафедре минералогии СПбГУ при помощи оптического микроскопа Leica.

2. Рентгенофазовый анализ был проведён в РЦ СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» при помощи рентгеновского дифрактометра Mini Flex II.

3. Энергодисперсионный анализ был сделан в Ресурсном центре «Микроскопии и микроанализа» СПбГУ с помощью электронного сканирующего микроскопа с анализатором Hitachi s-3400n и в ресурсном центре «Геомодель».

4. ИК-спектроскопия была сделана в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» на ИК-спектрофотометре Bruker «Vertex 70».

За помощь в написании моей курсовой работе, я хотела бы выразить благодарность Е.С. Сухаржевской, Н.В. Платоновой, Л.П. Никитиной, М.Г. Кржижановской, В.Н. Войтенко.

Условные сокращения минералов приведены в таблице 1.

Таблица 1
Условные сокращения

| Минерал | Сокращение |
|---------------------------|------------|
| Альбит | Ab |
| Апатит | Ap |
| Барит | Bar |
| Браунит | Br |
| Гаусманит | Haus |
| Гематит | Hm |
| Голландит | Holl |
| Калиевый полевой шпат | Flsp |
| Кальцит | Cc |
| Кариопилит | Krp |
| Кварц | Qu |
| Кентролит | Kent |
| Коронадит | Cron |
| Криптомелан | Cript |
| Кутнагорит | Kut |
| Магнезиорибекит-экерманит | Amph |
| Неонокит | Ntk |
| Пиробелонит | Prb |
| Пьемонтит | Pmt |
| Родонит | Rhod |
| Саркинит | Srk |
| Тефроит | Teph |
| Титанит | Ti |
| Фриделит | Frid |
| Циркон | Zr |
| Эгирин | Eg |

Глава 1. Геологическое положение месторождения Жомарт

Месторождение приурочено к северному крылу Жомартской синклинали, являющейся частью юго-западного крыла Жайльминского синклинория (рис.1).

Породы, слагающие участок, можно разделить на три пачки: продуктивная, в которую входят рудовмещающие пласты, промежуточная и пачка «красноцветных» известняков. Последние две пачки не представляют промышленной ценности. Они сложены известняками различной морфологии и состава, рудный компонент распределен неравномерно (Каюпова, 1974).

Продуктивная толща представлена метаморфизованными известняками верхнего девона (фаменского яруса). Рудовмещающая толща подразделена на 3 пачки: верхняя пачка мощностью 10-30 м содержит один марганцеворудный пласт мощностью 1,5-3 м (Mn_5). Нижняя пачка мощностью 20 м содержит четыре марганцеворудных пласта (Mn_1 , Mn_2 , Mn_3 , Mn_4) общей мощностью 8-10 м. Мощность железорудной пачки между ними 15-20 м (Fe_2), так же первый и второй марганцево-рудный пласт разделяет железорудный пласт (Fe_1) мощностью 1,5-3 м.

Нижняя пачка марганцеворудных пластов (Mn_1 , Mn_2 , Mn_3 , Mn_4) имеет однотипный состав: окисное соединение марганца (браунит) и карбонаты марганца и кальция – марганцовистый кальцит, кальциевый родохрозит, родохрозит, содержащие включения зерен кварца.

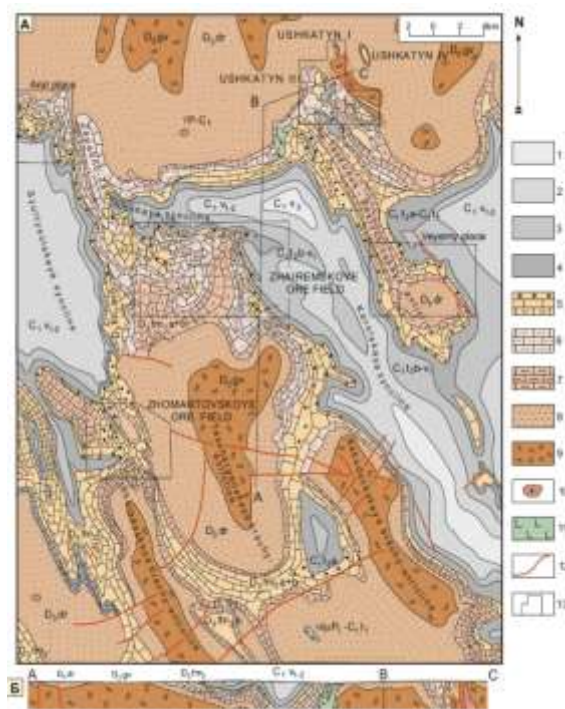


Рис 1. Схема геологического строения месторождения Жомарт (Рожнов, Бузмаков, 1970).

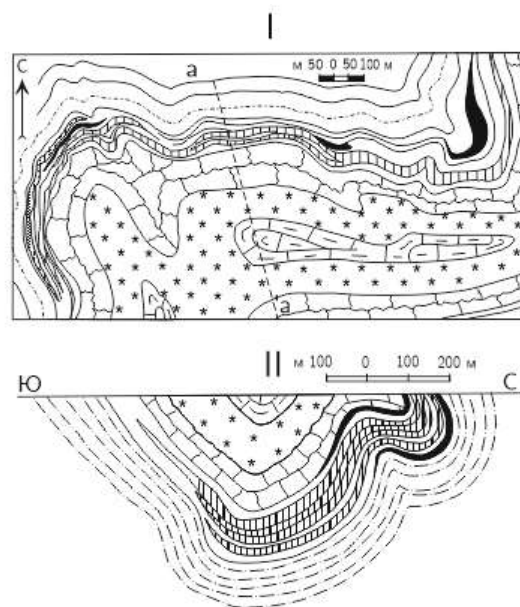


Рис 2. Геологическая карта и разрез месторождения Жомарт. I - геологическая карта, II – разрез по линии а'а (Каюпова, 1974).

В строении первого железорудного пласта (Fe_1) принимают участие прослой гематита, яшмы и серого или светло-серого известняка с примесью туфового материала (*Каюпова, 1974*).

Железорудный пласт (Fe_2) отличается сложным внутренним строением и минеральным составом, так как разные минеральные ассоциации обособляются в самостоятельные послойные и линзовидные тела. Широко распространена ассоциация гематита и кварца.

Верхние марганцеворудные слои включают в себя один пласт (Mn_5), сложенный браунитовыми рудами.

Для рудоносной части разреза верхнефаменских отложений на месторождении Жомарт характерна высокая кремнистость.

Синхронные с вмещающими породами железо- и марганцеворудные тела месторождения Жомарт имеют пласто- и линзообразную форму. Рудные пласты независимо от их мощности хорошо выдержаны по простираению и совершенно одинаково с вмещающими их породами участвуют во всех типах складчатых структур и служат маркирующими горизонтами, по которым только и отрисованы структуры (рис.2). Границы рудных залежей и вмещающих пород резкие, четкие. Рудные пласты представляют собой тонкое (нередко до микроскопических величин) ритмическое чередование рудных и породных прослоев и характеризуются широким диапазоном содержания полезных компонентов (Fe, Mn), а именно – от 6 до 26% Mn в марганцеворудном пласте, от 15% до 45% Fe в мощном железорудном.

Рудные пласты залегают согласно с вмещающими слоистыми породами со средней мощностью 130 м. Протяженность их составляет более 3 км, по падению они разведаны до 200 м. Глубина залегания рудных тел меняется от поверхности до 400 м и более (*Каюпова, 1974*).

Глава 2. Минеральные ассоциации главных типов руд

На месторождения Жомарт, можно выделить два типа руд: браунитовые и гаусманитовые руды, которые сопряжены с силикатной и карбонатной минерализацией. Рассмотрим каждый из этих типов руд подробнее.

Браунитовые руды

Браунитовые руды представлены переслаиванием черных прослоев и линз, выполненных браунитом и более светлыми прослоями, сложенными преимущественно карбонатами (рис.3). Мощность браунитовых прослоев в исследуемых образцах варьирует от нескольких миллиметров до 2-3 см. Главными минералами этих пород являются браунит, кальцит и кварц (рис.4). Также встречаются альбит, калиевый полевой шпат, минералы группы амфиболов и эгирин. По соотношению основных минералов в разных участках породы были выделены 4 минеральные ассоциации:

1) Браунитовая ассоциация представлена собственно браунитом, который является главным рудным минералом этого месторождения, с включениями карбонатов (кальцит и родохрозит).

2) Кварц-кальцитовая ассоциация представляет собой вмещающие породы для браунитовых прослоев. Она сложена преимущественно кальцитом, и в меньшей степени, кварцем, в подчиненных количествах присутствуют минералы группы полевых шпатов. Представляет собой переслаивание существенно-карбонатных, кварцево-карбонатных и кварцевых слоев. Карбонатные слои преобладают над остальными. Все вышеперечисленные слои чередуются с рудными слоями и так же сами содержат жилы, линзы, вкрапленники браунита (рис. 3).

3) Силикатно-карбонатная ассоциация распространена ограничено и представляет собой карбонатные прослои, в которых наблюдаются скопления или отдельные зерна силикатов.



Рис 3. Общий вид одного из образцов (образца ЖМ-2).



Рис.4. Главные минеральные ассоциации браунитовых руд

Силикатные минералы в этой ассоциации представлены минералами группы амфиболов, полевыми шпатами, эгирином.

4) Прожилковая ассоциация представлена минералами, которые заполняют собой прожилки, трещины в минералах первой, второй и третьей ассоциаций. Она представлена марганцевыми оксидами калия, свинца и бария: криптомелан, коронадит, голландит, соответственно.

Порода подвержена развитию гидроксидов железа по первичным минералам. Данному процессу подверглись в основном кальцит и амфибол, процесс представлен локально и занимает не более 10% породы.

Гаусманитовые руды

Гаусманитовые руды представляют собой плотные породы с пятнистой, полосчатой и линзовидно-полосчатой текстурой (рис.5).

В гаусманитовых рудах, по аналогии с браунитовыми рудами, также можно выделить 3 главные ассоциации (рис. 6).

1) Гаусманитовая ассоциация представлена собственно гаусманитом в ассоциации с карбонатами.

2) Родонит-кальцитовая ассоциация выделяется розовым и желтовато-розовым цветом на общем фоне породы. Она сложена родонитом, кальцитом, и тефроитом.

3) Фриделит-карбонатная ассоциация представлена в основном силикатами марганца, содержащими гидроксильную группу. Эта ассоциация сформирована, по-видимому, в результате перекристаллизации ранее образовавшихся

минералов. Эта ассоциация заполняет прожилки, секущие основную массу породы. Главными минералами являются фриделит, кариопилит, гаусманит-II, карбонаты кальция и марганца.



Рис 5. Общий вид одного из образцов (образца 169-241.3).



Рис. 6. Главные минеральные ассоциации гаусманитовых руд.

Глава 3. Характеристика минералов марганцевых руд

Как указано выше, породы месторождения можно разделить на две принципиально разные группы: браунитовые руды и гаусманитовые руды. Минеральный состав марганцевых руд и вмещающих пород месторождения Жомарт представлен в таблице 2:

Таблица 2

Минералы месторождения Жомарт

| Минерал | Формула минерала | Браунитовые руды | Гаусманитовые руды |
|---------------------------|--|------------------|--------------------|
| Оксиды | | | |
| Кварц | SiO_2 | + | |
| Криptomелан | $\text{K}(\text{Mn}_6^{4+}\text{Mn}_2^{3+})\text{O}_{16}$ | + | |
| Коронадит | $\text{Pb}(\text{Mn}_6^{4+}\text{Mn}_2^{3+})\text{O}_{16}$ | + | |
| Голландит | $\text{Ba}(\text{Mn}_6^{4+}\text{Mn}_2^{3+})\text{O}_{16}$ | + | |
| Гаусманит | $\text{Mn}^{2+}\text{Mn}_2^{3+}\text{O}_4$ | | + |
| Гематит | Fe_2O_3 | | + |
| Силикаты | | | |
| Браунит | $\text{Mn}^{2+}\text{Mn}_6^{3+}(\text{SiO}_4)\text{O}_8$ | + | + |
| Родонит | $\text{CaMn}_4(\text{Si}_5\text{O}_{15})$ | | + |
| Фриделит | $\text{Mn}_8^{2+}\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH},\text{Cl})_{10}$ | | + |
| Тефроит | $\text{Mn}_2^{2+}(\text{SiO}_4)$ | | + |
| Магнезиорибекит-экерманит | $(\text{Na}_2)(\text{Mg}_3\text{Fe}^{3+}_2)(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2 - \text{NaNa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$ | + | |
| Калиевый полевой шпат | $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ | + | |
| Альбит | $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ | + | |
| Циркон | $\text{Zr}(\text{SiO}_4)$ | + | |
| Пьемонтит | $\text{Ca}_2\text{Mn}^{3+}\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$ | + | + |
| Кентролит | $\text{Pb}_2\text{Mn}_2^{3+}(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}_2$ | + | |
| Неонокит | $\text{Mn}(\text{SiO}_3) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ | + | |
| Эгирин | $\text{NaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ | + | |
| Титанит | $\text{CaTi}(\text{SiO}_5)$ | + | |
| Кариопилит | $\text{Mn}_5(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_6$ | | + |
| Карбонаты | | | |
| Кальцит | $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ | + | + |
| Кутнагорит | $\text{CaMn}(\text{CO}_3)$ | | + |
| Фосфаты | | | |
| Апатит | $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F})$ | + | |
| Сульфаты | | | |
| Барит | $\text{Ba}(\text{SO}_4)$ | + | + |
| Арсенаты | | | |
| Саркинит | $\text{Mn}_2^{2+}(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ | | + |
| Ванадаты | | | |
| Пиробелонит | $\text{PbMn}^{2+}(\text{VO}_4)(\text{OH})$ | | + |

Рассмотрим вышеперечисленные минералы более подробно.

3.1. Минералы браунитовых руд

Главными минералами браунитовых руд являются браунит кальцит и кварц. В качестве второстепенных выступают минералы группы полевых шпатов (альбит и калиевый полевой шпат), минералы группы амфиболов, эгирин и барит. В качестве аксессуарных присутствуют титанит, апатит, циркон. Марганцевые минералы продуктов выветривания браунитовые руд представлены группой криптомелана.

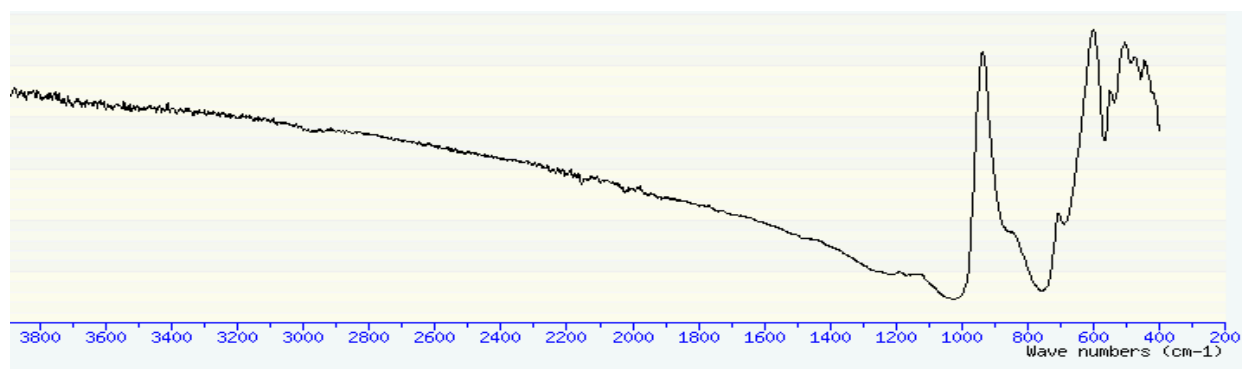
3.1.1. Породообразующие минералы

Браунит $Mn^{2+}Mn^{3+}_6(SiO_4)O_8$

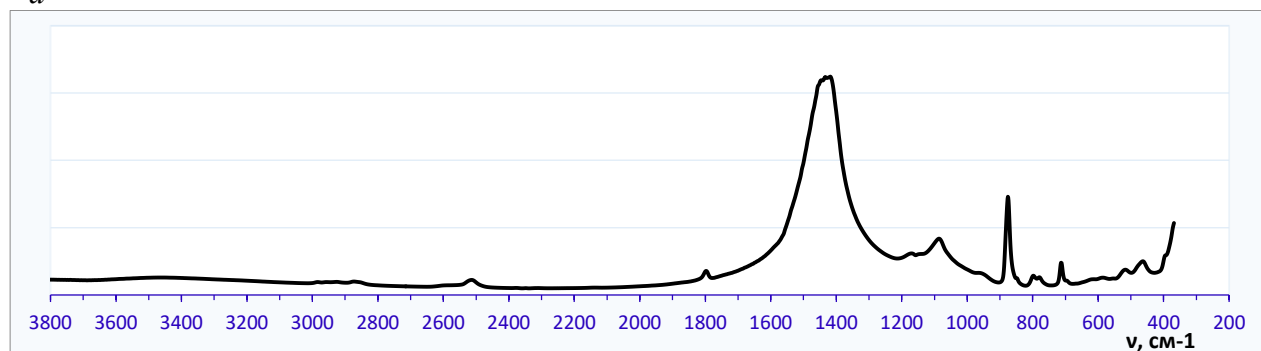
Браунит - один из самых распространенных в природе рудных минералов марганца. На месторождении Жомарт браунит является главным рудным минералом. Слагает прослой, линзы в карбонатной массе (рис.9, а, д, е), а также образует изометричные зерна или иногда субидiomорфные кристаллы ромбовидной формы (рис. 9, б, в, г). Размер индивидов колеблется от 0.02 до 0.50 мм в поперечнике. Они могут быть равномерно распределены в породе, но обычно основная их масса собрана в слои и линзы, ритмично чередующиеся с «безрудными» кальцит-кварцевыми прослоями.

Цвет браунита темный, коричневато-черный до стального серого, блеск металлический, в шлифах непрозрачен.

ИК-спектр изученного минерала близок к спектрам эталона браунита (рис. 7, а).



а



б

Рис. 7. ИК-спектры браунита: а – эталона, б – изученных образцов

Пики 1300-1800 см^{-1} , 700-200 см^{-1} соотнесены с присутствием группы CO_3 , так как рудные слои браунита в породе не представлены мономинеральной фазой и в них всегда есть примесь кальцита (рис.7, б). В остальной части спектра колебания являются идентичными, что свидетельствует о схожести химического состава, наиболее интенсивной является полоса 850 см^{-1} . Отметим, что в спектрах отсутствуют полосы, характерные для молекул воды или гидроксила. В целом, полученные спектры хорошо согласуются с данными рентгенофазового анализа. Интерпретация полос спектра выполнена с использованием корреляционных таблиц Kazuo Nakamoto "Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds".

Типичные химические анализы браунита изученных месторождений приведены в таблице 3. Все они хорошо рассчитываются на кристаллохимическую формулу браунита-I $\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_6(\text{SiO}_4)_8$, содержащего примерно 10 масс. % SiO_2 . Составы, отвечающие низкокремниевому брауниту-II $\text{CaMn}^{3+}_{14}(\text{SiO}_4)_{20}$, в изученных образцах не обнаружены. Содержания элементов-примесей (Al, Fe, Mg и Ca) в брауните варьируют от слоя к слою даже на очень небольшом расстоянии (первые миллиметры). Наибольший разброс устанавливается для железа (от 0.06 до 0.27 к.ф. Fe^{3+}).

Таблица 3

Химический состав браунита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO_2 | 10,53 | 9,41 | 10,59 | 10,15 | 10,69 | 10,69 | 10,76 | 10,67 |
| $\text{FeO}^{\text{общ}}$ | 1,27 | 1,65 | 1,26 | 0,00 | 2,92 | 1,09 | 0,00 | 0,65 |
| CaO | 2,58 | 13,55 | 2,46 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,11 |
| $\text{MnO}^{\text{общ}}$ | 85,62 | 75,00 | 85,69 | 89,85 | 86,39 | 88,22 | 89,24 | 87,57 |
| MgO | 0,00 | 0,38 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 100,00 | 99,99 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | | |
| Si | 0,97 | 0,85 | 0,98 | 0,94 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 0,98 |
| Al | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,07 |
| Сумма | 0,97 | 0,85 | 0,98 | 0,94 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,05 |
| Mn^{3+} | 6,06 | 5,68 | 6,04 | 6,12 | 6,48 | 6,20 | 6,00 | 5,97 |
| Mn^{2+} | 0,62 | 0,00 | 0,64 | 0,94 | 0,30 | 0,72 | 1,00 | 0,87 |
| Fe^{3+} | 0,10 | 0,12 | 0,10 | 0,00 | 0,23 | 0,08 | 0,00 | 0,00 |
| Ca | 0,25 | 1,30 | 0,24 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,11 |
| Mg | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 7,03 | 7,15 | 7,02 | 7,06 | 7,01 | 7,00 | 7,00 | 6,95 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%. Все железо в брауните принято за трехвалентное.

Порошковые рентгенограммы браунита месторождения Жомарт близки к эталонным данным для этого минерала (эталон 01-071-1791) и представлены в таблице 4. Главные линии рентгенограммы жомартского браунита показаны на рис.8.

Таблица 4

Результаты расчета рентгенофазового анализа браунита

| Образец | | Эталон 01-071-1791 | | | | |
|------------|-----|--------------------|-----|---|---|---|
| d | I | d | I | h | k | l |
| 5.45 | 1 | 5.41 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 4.73 | 2 | 4.70 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 3.86* | 11 | 4.10 | 5 | 2 | 1 | 1 |
| 3.50 | 9 | 3.49 | 7 | 2 | 1 | 3 |
| 3.34** | 76 | 3.33 | 1 | 2 | 2 | 0 |
| 2.72 | 100 | 2.71 | 100 | 2 | 2 | 4 |
| 2.49* *** | 16 | 2.51 | 8 | 3 | 1 | 4 |
| 2.36 | 7 | 2.35 | 12 | 4 | 0 | 0 |
| 2.34 | 7 | 2.33 | 6 | 0 | 0 | 8 |
| 2.28** | 12 | 2.28 | 1 | 4 | 0 | 2 |
| 2.23** *** | 5 | 2.25 | 2 | 2 | 1 | 7 |
| 2.15 ** | 22 | 2.16 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 2.15*** | 10 | 2.15 | 3 | 3 | 1 | 6 |
| 2.09* | 2 | 2.09 | 1 | 2 | 0 | 8 |
| 2.06 | 4 | 2.05 | 1 | 4 | 2 | 2 |
| 1.92** | 8 | 1.95 | 1 | 3 | 2 | 4 |
| 1.91* | 35 | 1.91 | 1 | 2 | 2 | 8 |
| 1.88** | 2 | 1.87 | 2 | 4 | 3 | 1 |
| 1.82** | 6 | 1.81 | 1 | 5 | 1 | 2 |
| 1.74 | 2 | 1.74 | 1 | 5 | 2 | 1 |
| 1.67* | 13 | 1.73 | 1 | 4 | 1 | 7 |
| 1.66 | 21 | 1.66 | 11 | 4 | 4 | 0 |
| 1.66** | 1 | 1.66 | 2 | 4 | 0 | 8 |
| 1.54 | 22 | 1.54 | 1 | 4 | 3 | 7 |

Примечание. * пик совпадает с отражением кальцита, ** пик совпадает с отражением кварца, *** пик совпадает с отражением амфибола.

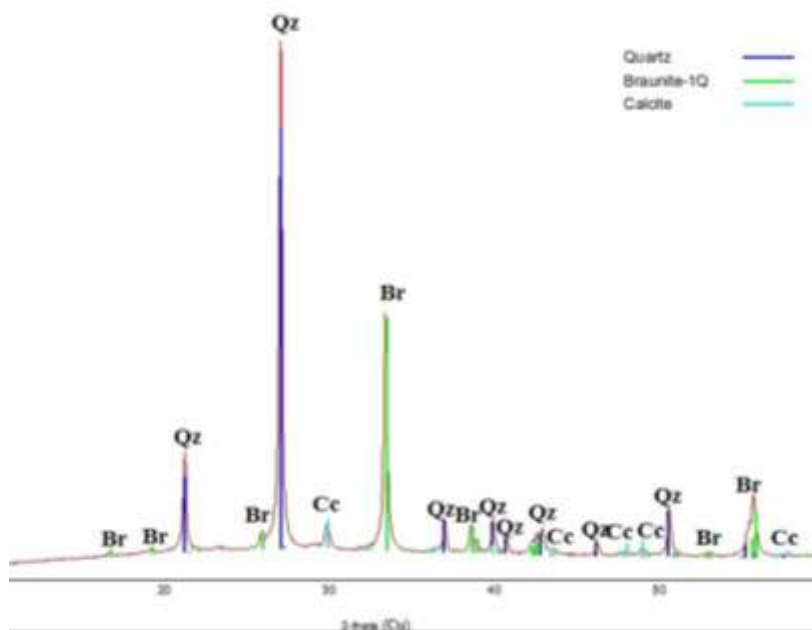
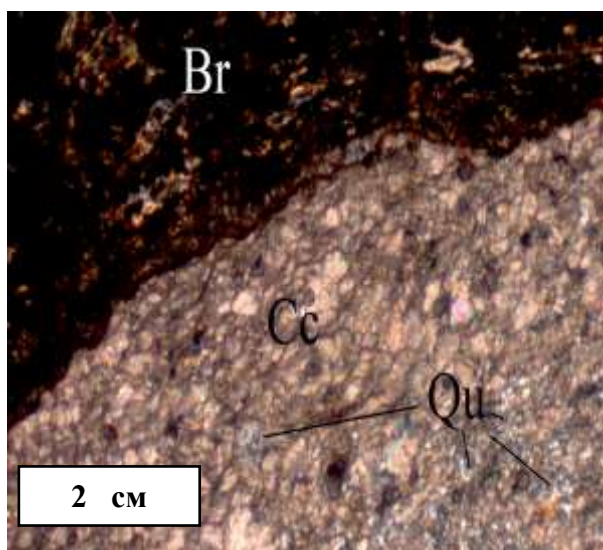
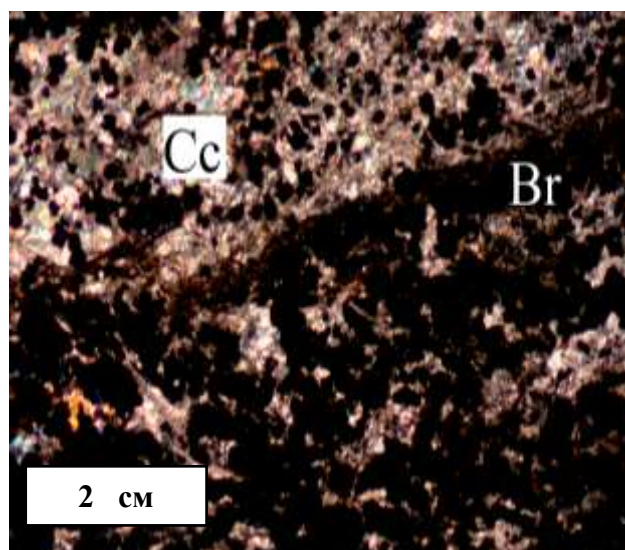


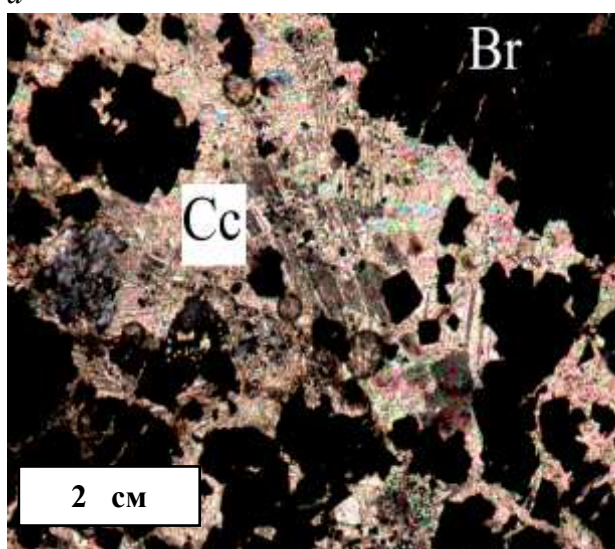
Рис. 8. Рентгенограмма образца ЖМ-2.



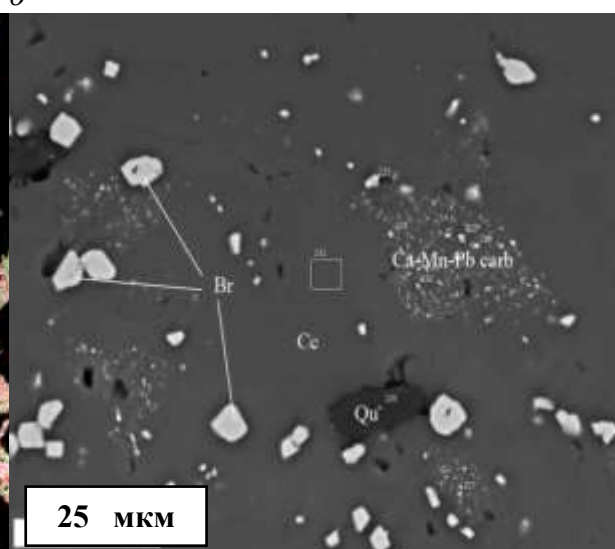
a



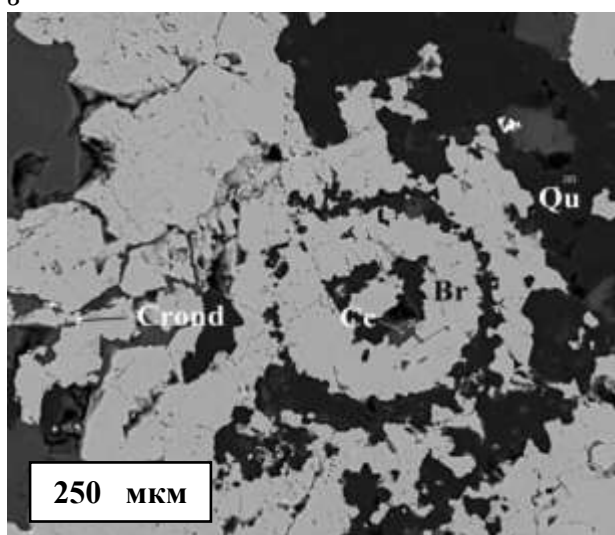
б



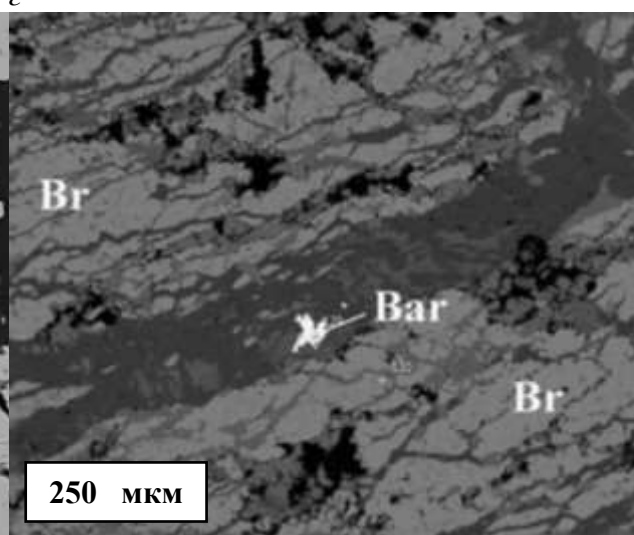
в



г



д



е

Рис. 9. Морфология выделений браунита. а, г, д, - браунитовые слои, линзы, б, в, г - зернистые агрегаты браунита. Фотографии шлифов: а,б, в - изображения в проходящем свете в скрещенных николях, г,д,е - изображения в обратно-рассеянных электронах.

Кварц SiO₂

Кварц совместно с браунитом и карбонатами составляет основную массу браунитовых руд и является главным породообразующим минералом.

Кварц в проходящем свете бесцветен и прозрачен, образует вытянутые хорошо окатанные зерна размера 0,2 до 1 см, у которых отсутствует спайность. У минерала очень слабая шагреневая поверхность и низкий положительный рельеф. Нередко зерна кварца имеют волнистое (облачное) показание.

Результаты рентгенофазового анализа близки к эталонным данным рентгенограммы кварца (эталон 01-075-0443) (табл. 5).

Кварц имеет постоянный состав во всех зернах, изоморфизм не наблюдается.

Таблица 5

Результаты расчета рентгенофазового анализа кварца

| Образец | | Эталон 01-075-0443 | | | | |
|-----------------|-----|--------------------|-----|---|---|---|
| d | I | d | I | h | k | l |
| 4.25 | 21 | 4.25 | 22 | 1 | 0 | 0 |
| 3.34* | 100 | 3.34 | 100 | 1 | 0 | 1 |
| 2.46** | 6 | 2.46 | 7 | 1 | 1 | 0 |
| 2.28** | 7 | 2.28 | 8 | 0 | 1 | 2 |
| 2.24 | 2 | 2.24 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 2.13** | 12 | 2.13 | 6 | 2 | 0 | 0 |
| 1.98 | 3 | 1.98 | 3 | 0 | 2 | 1 |
| 1.82** *** | 8 | 1.82 | 9 | 1 | 1 | 2 |
| 1.67 ** *** | 2 | 1.67 | 4 | 2 | 0 | 2 |
| 1.66** | 1 | 1.66 | 1 | 1 | 0 | 3 |
| 1.60* ** *** | 3 | 1.61 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| 1.54** | 12 | 1.54 | 8 | 2 | 1 | 1 |

Примечание. * пик совпадает с отражением кальцита, ** пик совпадает с отражением браунита, *** пик совпадает с отражением амфибола

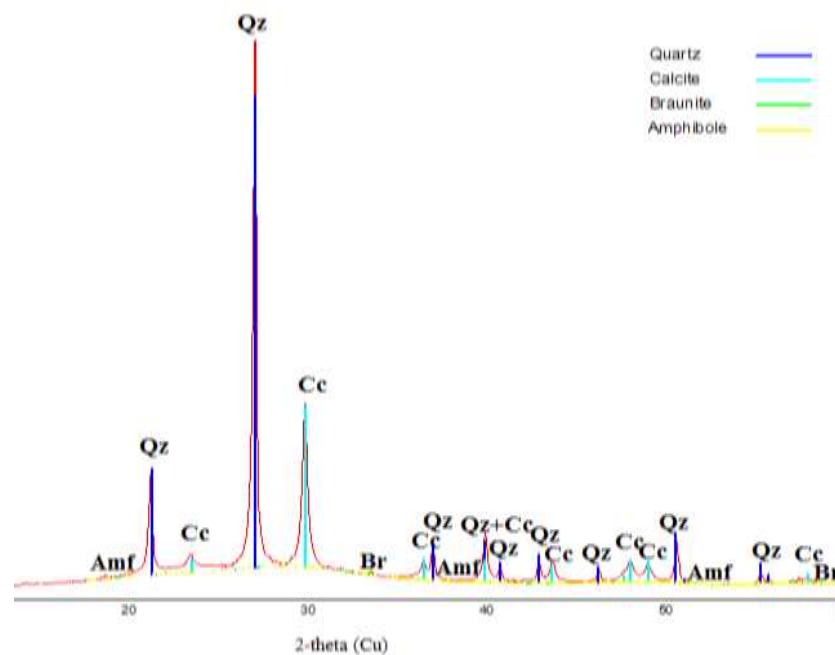


Рис. 10. Рентгенограмма образца ЖМ-2.

Кальцит CaCO_3

Кальцит, наравне с кварцем, широко развит в марганцевых породах и является главным породообразующим минералом браунитовых руд.

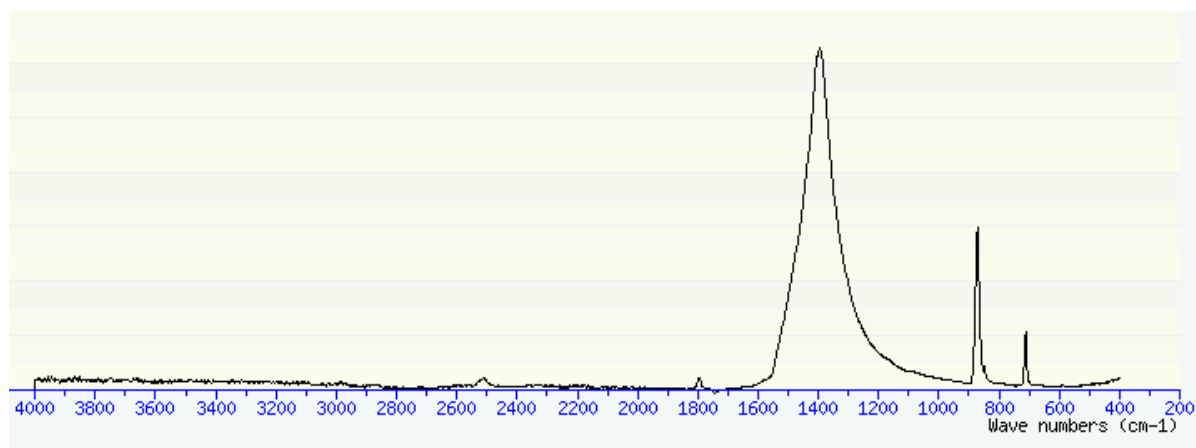
В породе он слагает мелкозернистые массы с кварцем и браунитом. Зерна кальцита вытянутые и изометричные. Так же кальцит принимает участие в составе секущих породы прожилков. Размер его индивидов в сегрегационных агрегатах может достигать 2 см в поперечнике.

Кальцит в шлифе бесцветен. При совмещении Ng с P появляется резкая шагрень, создающая впечатление серого цвета. Многие зерна кальцита имеют ярко выраженную штриховку – полисинтетические двойники. Отчетливо видна спайность по ромбоэдру в некоторых индивидах. Зерна имеют очень сильное (до исключительно сильного) двупреломление – до перламутровых цветов интерференции.

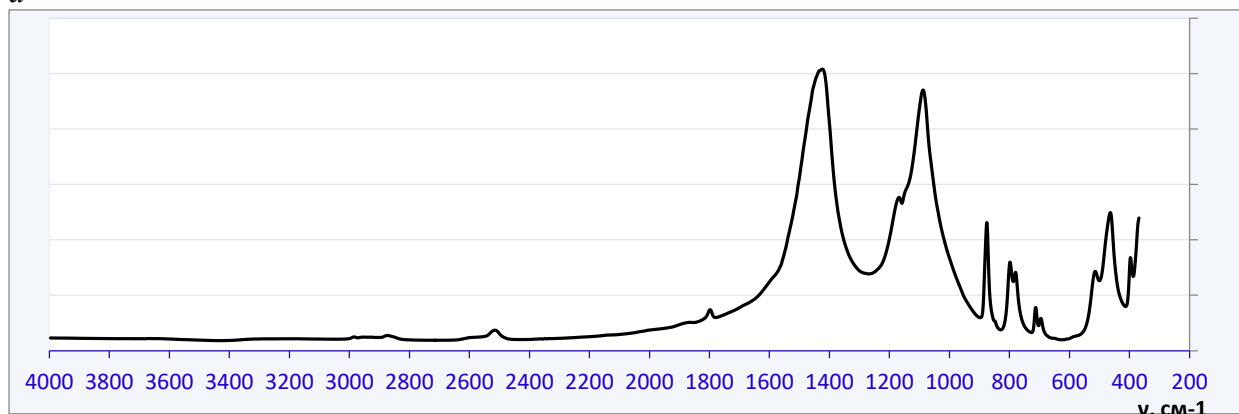
ИК-спектр изученного минерала близок к спектрам эталона кальцита (рис. 11).

Пики $1100\text{-}1400\text{ см}^{-1}$, $700\text{-}200\text{ см}^{-1}$ могут быть отнесены к колебаниям Si-O, так как вмещающие породы представляют собой смесь кварц и кальцита. В остальной части спектра колебания являются идентичными, что свидетельствует о схожести фазового состава, наиболее интенсивной является полоса 1419 см^{-1} . Отметим, что на спектре отсутствуют полосы, характерные для молекул воды или гидроксила. В целом, полученные спектры хорошо

согласуются с данными рентгенофазового анализа. Интерпретация полос спектра выполнена с использованием корреляционных таблиц Kazuo Nakamoto “Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds”.



а



б

Рис. 11. ИК-спектры кальцита: а – эталона, б – изученных образцов.

По данным микрондового анализа кальцита месторождения Жомарт наиболее распространенными элементами-примесями в кальците являются Mn, Mg (ниже 4 масс. % каждого) (табл. 7).

Таблица 7

Химический состав кальцита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MgO | 0,55 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,64 | 0,65 | 0,50 | 0,75 |
| MnO | 1,48 | 1,52 | 0,84 | 1,08 | 1,22 | 1,23 | 3,73 | 1,07 |
| CaO | 97,97 | 98,48 | 99,16 | 98,92 | 98,16 | 98,12 | 95,77 | 98,18 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Миналы, % | | | | | | | | |
| MgCO ₃ | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| MnCO ₃ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| CaCO ₃ | 98 | 99 | 99 | 99 | 98 | 98 | 96 | 98 |

Примечание. В таблице микрондовые анализы нормализованы к 100%.

Дифрактограмма изученных карбонатов близка к эталонным данным для кальцита (эталон 01-072-1652) (рис.12).

Таблица 6.

Результаты расчета рентгенофазового анализа кальцита

| Образец | | Эталон 01-072-1652 | | | | |
|----------|-----|--------------------|-----|---|---|---|
| d | I | d | I | h | k | l |
| 3.85 | 9 | 3.85 | 9 | 0 | 1 | 2 |
| 3.03 | 100 | 3.03 | 100 | 1 | 0 | 4 |
| 2.84* | 2 | 2.83 | 2 | 0 | 0 | 6 |
| 2.49 | 10 | 2.49 | 13 | 1 | 1 | 0 |
| 2.28* ** | 16 | 2.28 | 19 | 1 | 1 | 3 |
| 2.09*** | 6 | 2.09 | 15 | 2 | 0 | 2 |
| 1.92 | 4 | 1.92 | 6 | 0 | 2 | 4 |
| 1.91* | 19 | 1.90 | 19 | 0 | 1 | 8 |
| 1.87* | 15 | 1.87 | 20 | 1 | 1 | 6 |
| 1.62* | 4 | 1.63 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| 1.60* ** | 9 | 1.60 | 9 | 1 | 2 | 2 |

Примечание. * пик совпадает с отражением кварца, ** пик совпадает с отражением браунита, *** пик совпадает с отражением амфибола.

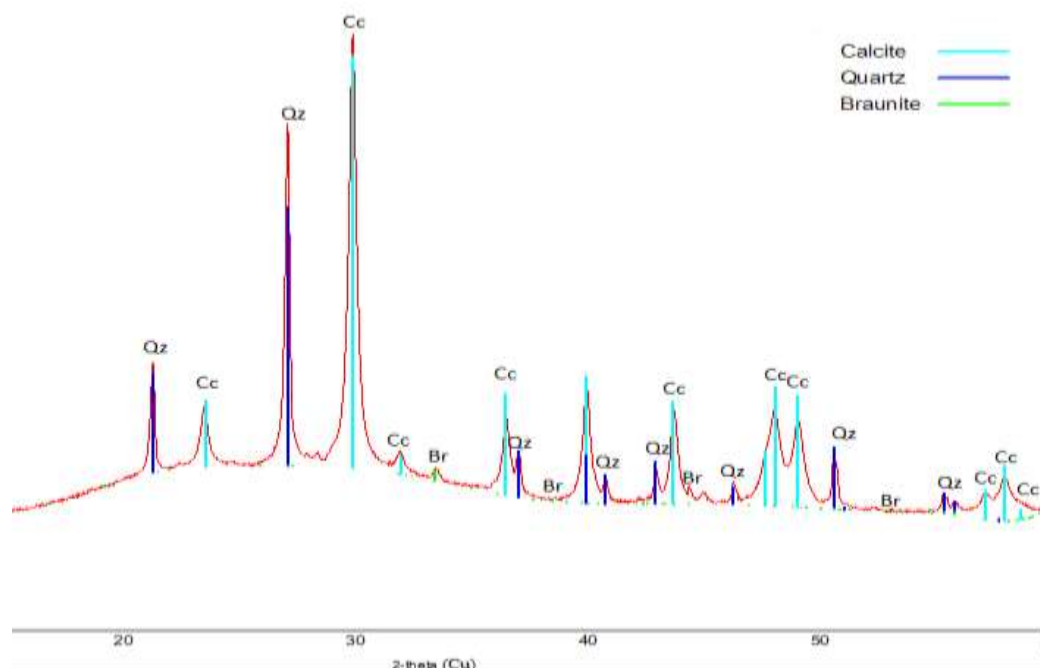
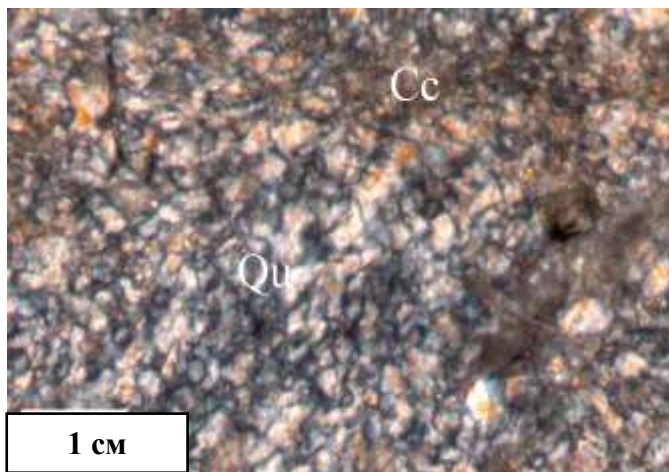
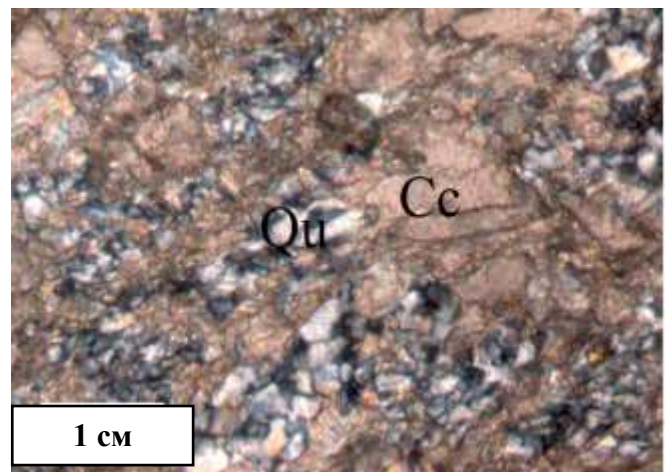


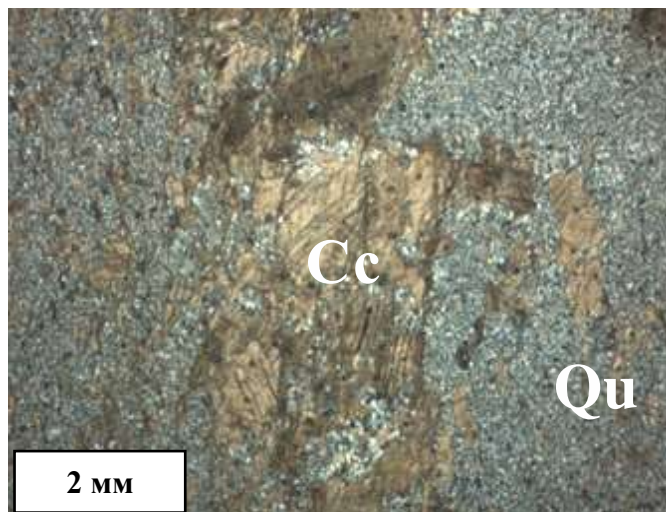
Рис. 12. Рентгенограмма образца ЖМ-2.



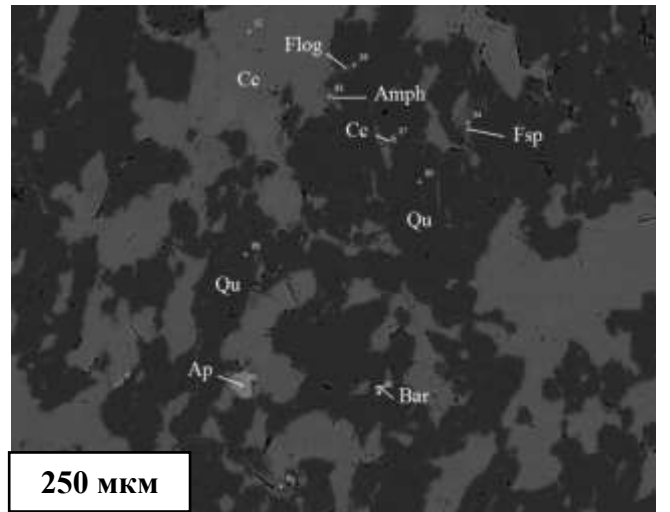
a



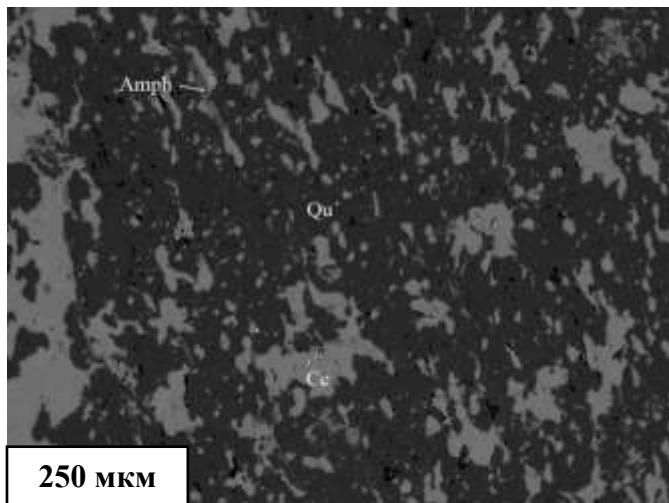
б



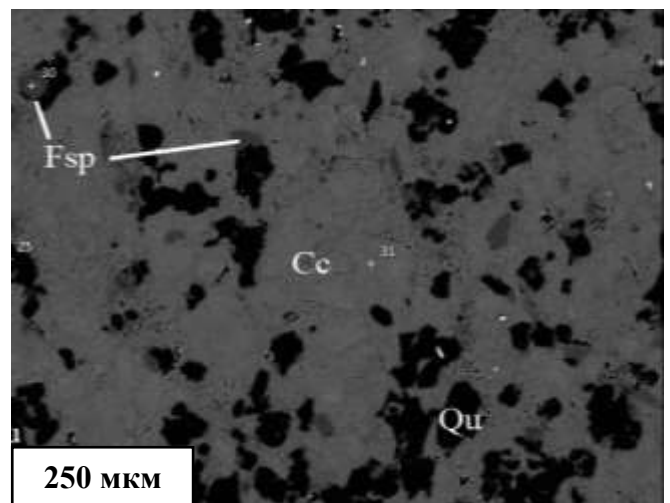
в



г



д



е

Рис.13. Морфология выделений кварца и кальцита. Фотографии шлифов: а,б, в - изображения в проходящем свете в скрещенных николях, г,д,е - изображения в обратно-рассеянных электронах.

3.1.2. Второстепенные минералы

Магнезиорибекит-экерманит $(\text{Na}_2)(\text{Mg}_3\text{Fe}^{3+}_2)(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$ - $\text{NaNa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$.

Минералы группы амфибола в изученных породах представлены изоморфным рядом магнезиорибекит-экерманит.

Амфибол является характерным второстепенным минералом обогащенных кальцитом участков браунитовых руд.

Он представлен волокнистыми сростаниями. Минералы образуют игольчатые, удлиненно-призматические, веретеновидные кристаллы размером 30–70 мкм по удлинению.

В параллельных николях амфибол слагает линзы рыжего цвета в карбонатной массе. В шлифе сильно плеохроирует от бело-желтого или серого до густо-синего или голубого (рис. 15, а). Рельеф резкий.

К главным минералообразующим элементам относятся Si, Mg и Na, к ним добавляются железо и алюминий. Величина $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ в данном амфиболе больше 0,25. Посчитав более 30 формул, полученных микрозондовым анализом и нанеся их на диаграмму состава, изученные минералы группы амфиболов можно отнести к изоморфному ряду магнезиорибекит-экерманит (рис. 14).

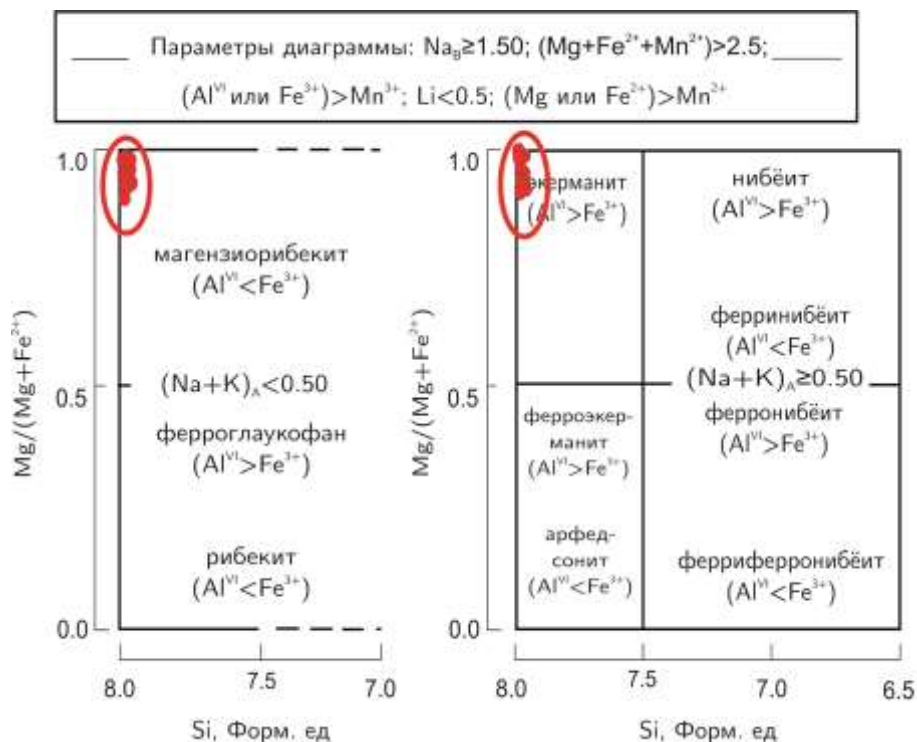


Рис. 14. Диаграмма состава натриевых амфиболов по Номенклатуре амфиболов
Химический состав амфибола представлен в таблице 8.

Таблица 8

Химический состав минералов группы амфибола (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 59,90 | 59,54 | 58,88 | 59,91 | 59,51 | 60,26 | 59,54 | 59,20 | 59,89 |
| TiO ₂ | 0,39 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,61 | 0,00 | 1,90 | 1,16 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 0,39 | 0,00 | 0,00 | 1,03 | 0,57 | 0,45 | 0,36 | 0,23 |
| FeO ^{общ} | 11,57 | 12,54 | 11,41 | 7,49 | 13,18 | 11,07 | 10,66 | 12,42 | 11,99 |
| MgO | 18,08 | 16,93 | 17,41 | 20,35 | 15,36 | 17,58 | 17,50 | 16,73 | 17,47 |
| MnO | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,28 | 0,00 |
| CaO | 1,71 | 1,66 | 2,94 | 3,14 | 0,88 | 1,48 | 1,62 | 2,05 | 2,09 |
| Na ₂ O | 7,63 | 8,00 | 8,27 | 7,35 | 7,61 | 7,94 | 7,53 | 7,34 | 7,55 |
| K ₂ O | 0,72 | 0,65 | 1,09 | 1,76 | 0,82 | 1,10 | 0,80 | 0,46 | 0,78 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | | | |
| Si | 8,04 | 8,06 | 8,11 | 8,07 | 8,07 | 8,13 | 8,02 | 8,01 | 8,09 |
| Сумма | 8,04 | 8,06 | 8,11 | 8,07 | 8,07 | 8,13 | 8,02 | 8,01 | 8,09 |
| Fe ²⁺ | 0,07 | 0,27 | 0,79 | 0,10 | 0,17 | 0,29 | 0,24 | 0,12 | 0,28 |
| Mg | 3,62 | 3,42 | 3,58 | 4,09 | 3,11 | 3,53 | 3,51 | 3,38 | 3,52 |
| Mn | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 |
| Al | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,09 | 0,07 | 0,06 | 0,04 |
| Fe ³⁺ | 1,23 | 1,15 | 0,52 | 0,74 | 1,32 | 0,96 | 1,29 | 1,29 | 1,07 |
| Ti | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,00 | 0,19 | 0,12 | 0,00 |
| Zn | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 4,96 | 4,93 | 4,89 | 4,93 | 4,92 | 4,87 | 5,30 | 5,00 | 4,91 |
| Ca | 0,25 | 0,24 | 0,43 | 0,45 | 0,13 | 0,21 | 0,23 | 0,30 | 0,60 |
| Na | 1,75 | 1,76 | 1,57 | 1,55 | 1,87 | 1,79 | 1,77 | 1,70 | 1,40 |
| Сумма | 2,24 | 2,34 | 2,64 | 2,37 | 2,13 | 2,29 | 2,20 | 2,23 | 2,58 |
| Na | 0,24 | 0,34 | 0,64 | 0,37 | 0,13 | 0,29 | 0,20 | 0,23 | 0,58 |
| K | 0,12 | 0,11 | 0,19 | 0,30 | 0,14 | 0,19 | 0,14 | 0,08 | 0,13 |
| Сумма | 0,36 | 0,45 | 0,83 | 0,67 | 0,27 | 0,48 | 0,34 | 0,31 | 0,71 |

Примечание. В таблице анализы нормализованы к 100%.

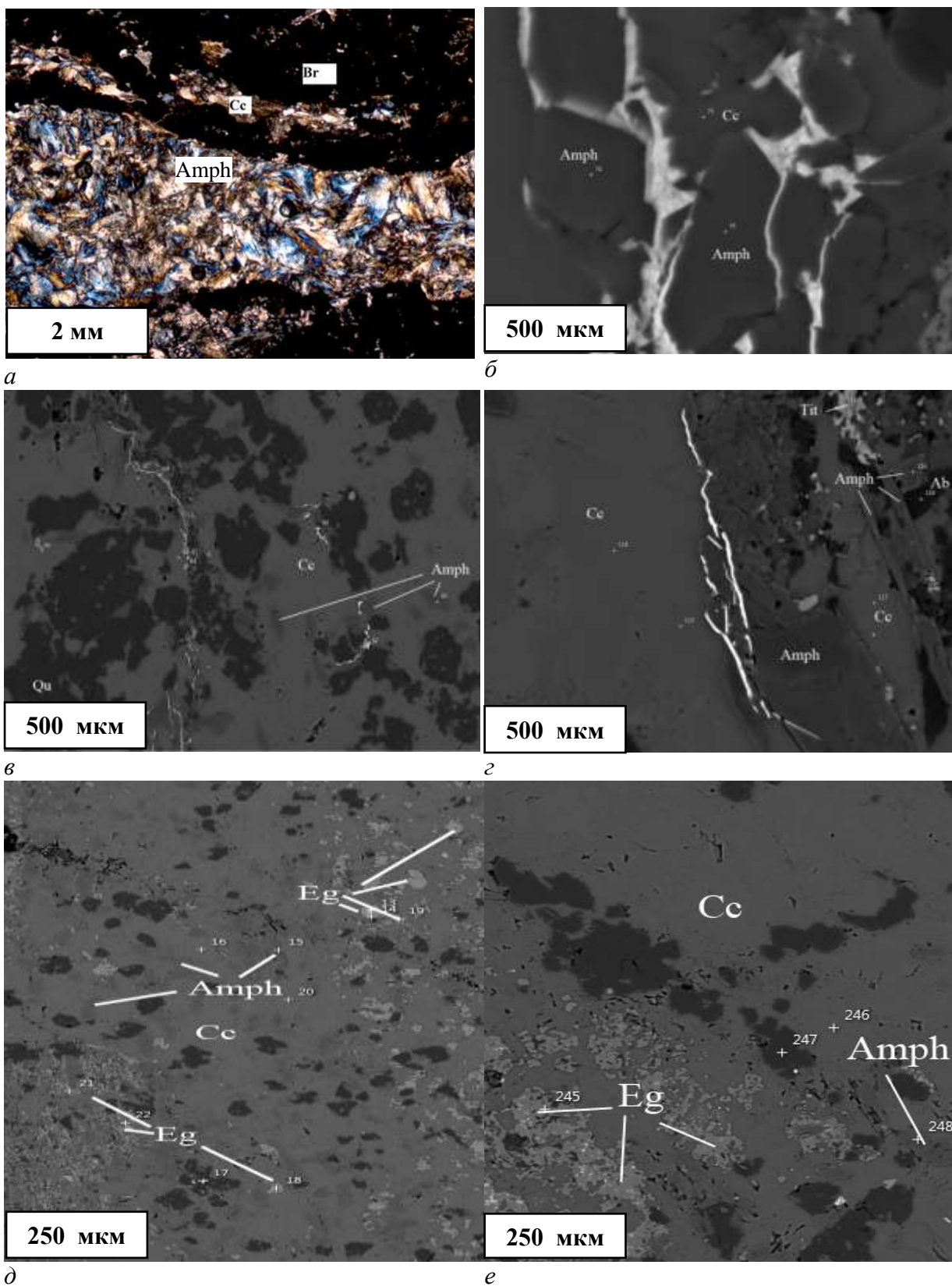


Рис.15. Второстепенные минералы браунитовых руд. а - взаимоотношения амфибола с браунитом и кальцитом; б, в - зерна амфибола в кальците, г - зерна альбита с амфиболом и, д, е – эгирин и амфибол в кальците. Фотографии шлифов: а - изображение в проходящем свете в скрещенных николях, б, в, г, д, е - изображения в обратно-рассеянных электронах

Эгириин $\text{NaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$

Эгириин относится к группе Na-пироксенов и является типичным второстепенными минералом браунитовых руд.

В образцах эгириин представлен либо мелкими зернами в кальцитовой массе размером 50-200 мкм (рис. 15, д), кроме того, он может образовывать мелкозернистые массы во вмещающей породе (рис. 15, е). Часто в породе ассоциирует с амфиболом и альбитом.

Типичными элементами примесями для эгирина браунитовых руд являются Ti, Al, Mg, Mn, Ca, химический анализ титанита из марганцевых пород представлен в таблице 9.

Таблица 9

Химический состав эгирина (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO_2 | 53,25 | 54,18 | 55,76 | 57,95 | 53,54 |
| TiO_2 | 0,75 | 0,80 | 0,55 | 1,09 | 0,49 |
| Al_2O_3 | 0,41 | 0,23 | 3,13 | 0,43 | 0,32 |
| $\text{FeO}^{\text{общ}}$ | 28,69 | 30,04 | 26,81 | 26,83 | 30,39 |
| MgO | 1,12 | 0,47 | 0,40 | 0,68 | 0,53 |
| MnO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,69 |
| CaO | 2,83 | 1,04 | 1,43 | 0,72 | 0,84 |
| Na_2O | 12,95 | 13,24 | 11,92 | 12,30 | 13,20 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | |
| Si | 1,97 | 2,01 | 1,95 | 2,00 | 2,00 |
| Al | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 1,99 | 2,01 | 2,00 | 2,00 | 2,00 |
| Ti | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| Fe^{3+} | 0,89 | 0,90 | 0,82 | 0,89 | 0,90 |
| Al | 0,00 | 0,01 | 0,10 | 0,02 | 0,01 |
| Fe^{2+} | 0,00 | 0,03 | 0,07 | 0,02 | 0,04 |
| Mg | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,03 |
| Mn | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| Сумма | 0,97 | 0,99 | 1,03 | 1,00 | 1,01 |
| Ca | 0,11 | 0,04 | 0,06 | 0,03 | 0,03 |
| Na | 0,93 | 0,95 | 0,91 | 0,97 | 0,96 |
| Сумма | 1,04 | 0,99 | 0,97 | 1,00 | 0,99 |

Примечание. В таблице микрозондовые анализы нормализованы к 100%.

Альбит $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$

Альбит является распространенным второстепенным минералом браунитовых руд.

Минерал приурочен к обогащенным натрием прослоям и линзам, сложенным, помимо главных фаз Na-пироксеном – эгирином и афиболом - магнезиорибекит-экерманитом.

Альбит слагает отдельные идиоморфные зерна размером до 0,2 мм (рис.15, г).

Химический состав альбита соответствует конечному натриевому члену $\text{Na}(\text{Si}_3\text{AlO}_8)$ изоморфного ряда полевых шпатов, примеси кальция и калия суммарно не превышают 0,1 к.ф. Типичный химический анализ альбита из марганцевых пород представлен в таблице 10.

Таблица 10

Химический состав альбита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| SiO_2 | 69.27 | 68.79 | 67.58 |
| Al_2O_3 | 19.14 | 19.46 | 19.13 |
| CaO | 0.00 | 0.37 | 0.00 |
| K_2O | 0.00 | 0.00 | 2.21 |
| Na_2O | 11.59 | 11.38 | 11.08 |
| сумма | 100.00 | 100.00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | |
| Si | 3.02 | 3.00 | 2.99 |
| Al | 0.98 | 1.00 | 1.00 |
| Сумма | 4.00 | 4.00 | 3.99 |
| Ca | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| K | 0.00 | 0.00 | 0.10 |
| Na | 1.00 | 0.98 | 0.91 |
| Сумма | 1.00 | 1.00 | 1.01 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Титанит CaTiSiO_5

Минерал в изученных образцах встречается редко, он представлен вытянутыми клиновидными зёрнами размером до 50 мк в кварцевой и карбонатной массе. Соседствует с такими минералами как магнезиорибекит-экерманит, калиевый полевой шпат.

Типичными элементами-примесями в титаните браунитовых руд являются Fe, K и Na, реже Al, Mg, Pb. Общее содержание элементов примесей не превышает 0,08 к.ф.

Типичный химический анализ титанита из марганцевых пород представлен в таблице 11.

Таблица 11

Химический состав титанита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO_2 | 30,75 | 28,55 | 30,68 | 31,17 | 30,95 | 31,91 | 31,73 |
| TiO_2 | 41,37 | 45,51 | 40,77 | 41,55 | 42,12 | 40,38 | 37,90 |
| Al_2O_3 | 0,00 | 0,51 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,86 | 0,98 |
| FeO | 0,53 | 1,03 | 0,00 | 0,00 | 0,64 | 1,27 | 1,53 |
| MgO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,27 |
| PbO | 0,00 | 1,13 | 0,00 | 0,00 | 1,31 | 0,00 | 0,00 |
| CaO | 27,01 | 22,91 | 28,21 | 27,28 | 23,17 | 25,21 | 27,20 |
| K_2O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,24 | 0,37 | 0,39 |
| Na_2O | 0,34 | 0,36 | 0,34 | 0,00 | 0,57 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | |
| Si | 1,01 | 0,96 | 1,00 | 1,02 | 1,03 | 1,04 | 1,01 |
| Al | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 1,01 | 0,98 | 1,00 | 1,02 | 1,03 | 1,04 | 1,01 |
| Ti | 1,01 | 1,14 | 1,00 | 1,02 | 1,05 | 0,99 | 0,93 |
| Сумма | 1,01 | 1,14 | 1,00 | 1,02 | 1,05 | 0,99 | 0,93 |
| Al | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,03 | 0,04 |
| Fe | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,04 |
| Mg | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| Pb | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| Ca | 0,95 | 0,82 | 0,99 | 0,96 | 0,82 | 0,89 | 0,95 |
| K | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Na | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 0,99 | 0,88 | 1,00 | 0,96 | 0,92 | 0,97 | 1,06 |
| O | 5,03 | 5,05 | 5,00 | 5,04 | 5,11 | 5,03 | 5,00 |

Примечание. В таблице микрозондовые анализы нормализованы к 100%.

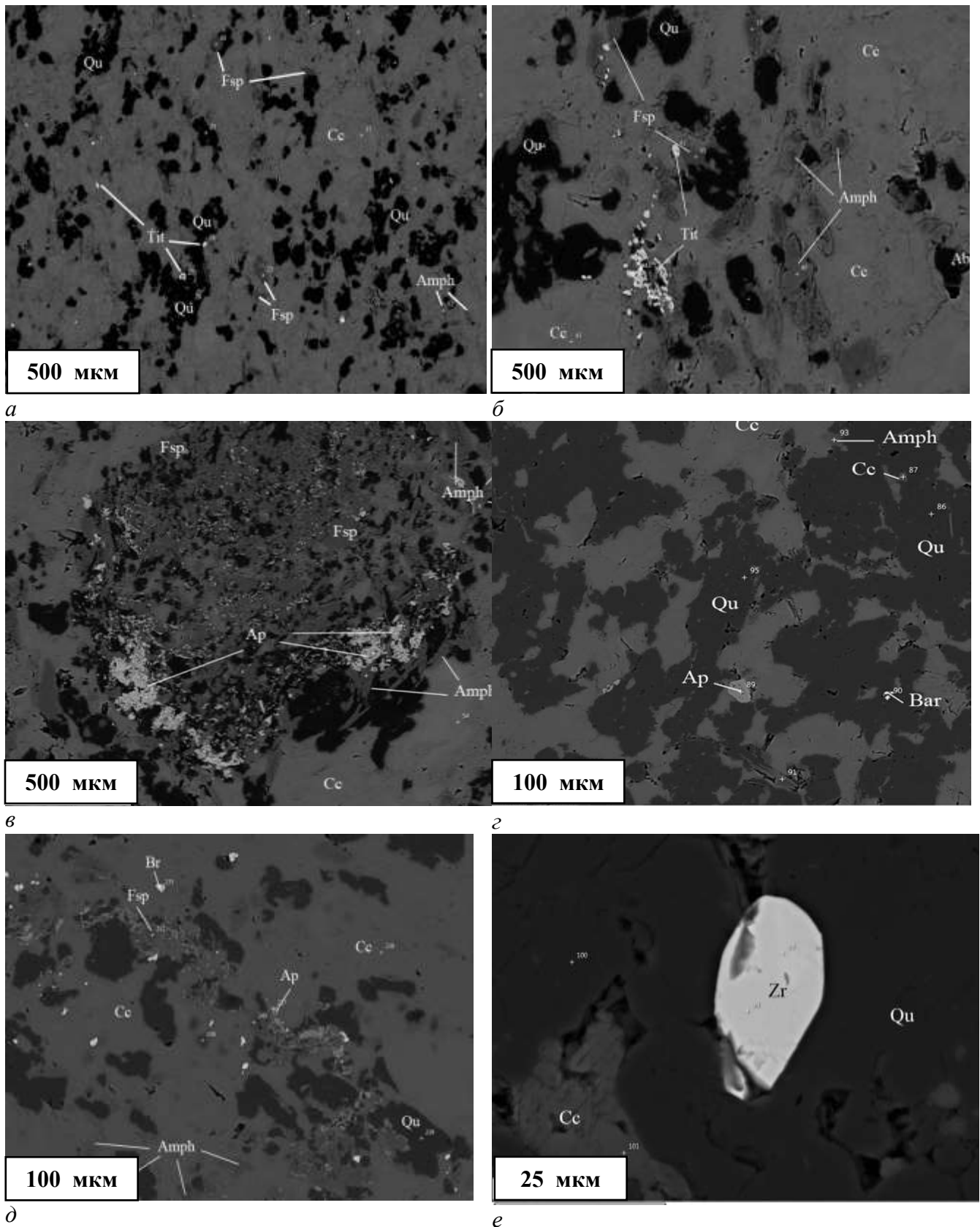


Рис.16. Второстепенные минералы браунитовых руд а, б - выделения титанита, калиевого полевого шпата, кальцита и, в - калиевый полевой шпат с апатитом в карбонатной массе в обратно-рассеянных электронах, г,д - кристаллы апатита в кальците в обратно-рассеянных электронах, е - зерно циркона в кварце в обратно-рассеянных электронах. Фотографии шлифов в обратно-рассеянных электронах.

Калиевый полевой шпат $K(AlSi_3O_8)$

Калиевый полевой шпат является распространенным второстепенным минералом браунитовых руд.

Минерал чаще всего встречается в ассоциации с кварцем и карбонатом.

Калиевый полевой шпат, аналогично альбиту, слагает отдельные идиоморфные зерна размером до 0,3 мм (рис.15, а, б, в, д).

Химический состав калиевого полевого шпата практически соответствует его идеальной формуле, примеси кальция и натрия суммарно не превышают 0,05 к.ф. Типичный химический анализ альбита из марганцевых пород представлен в таблице 12.

Таблица 12

Химический состав калиевого полевого шпата (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 64,70 | 64,42 | 64,77 | 65,67 | 65,09 | 64,68 | 64,28 | 64,80 |
| Al ₂ O ₃ | 18,51 | 18,53 | 18,47 | 17,9 | 18,45 | 18,41 | 18,39 | 18,42 |
| CaO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,93 | 0,00 |
| K ₂ O | 16,70 | 16,80 | 16,76 | 16,09 | 16,46 | 16,59 | 16,21 | 16,56 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,34 | 0,00 | 0,32 | 0,19 | 0,24 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | | |
| Si | 2,99 | 2,99 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| Al | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 0,97 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Сумма | 4,00 | 4,00 | 4,01 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |
| Ca | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 |
| K | 1,00 | 0,98 | 0,99 | 0,96 | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 0,98 |
| Na | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| Сумма | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Апатит $Ca_5(PO_4)_3(OH,F)$

Апатит является довольно распространенным второстепенным минералом браунитовых руд.

Он встречается в виде отдельных зерен округлой формы (размером около 0.1 мм) в зернистой массе кварца, кальцита или калиевого полевого шпата (рис.16, в, г, д).

По весовому химическому составу — содержание: оксид кальция (CaO): 54—58%; P₂O₅: 39-43 %; фтор (F): до 5,2 % (фторапатит). Апатит также содержит примеси марганца, железа, стронция, мышьяка, титанита и бария. Суммарное содержание элементов-примесей не превышает 0,1 к.ф. Проанализировав полученные данные о химическом составе апатита, можно

сказать, что в образцах присутствует как фторапатит (таблица 13, анализы 1, 4-8), так и гидроксоapatит (таблица 13, анализы 2, 3).

Таблица 13

Химический состав апатита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P ₂ O ₅ | 41,32 | 42,4 | 39,32 | 39,09 | 41,89 | 41,12 | 39,68 | 40,78 |
| As ₂ O ₅ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,67 | 0,00 | 0,00 |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,48 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SO ₂ | 0,00 | 0,00 | 3,36 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| FeO | 0,00 | 0,47 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,73 | 0,00 |
| CaO | 54,86 | 56,65 | 51,79 | 57,94 | 53,99 | 54,73 | 54,86 | 54,2 |
| MnO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,40 | 0,00 |
| BaO | 0,00 | 0,00 | 5,53 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| F | 3,82 | 0,00 | 0,00 | 2,97 | 4,14 | 3,48 | 3,33 | 5,02 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | | |
| P | 2,98 | 2,95 | 2,83 | 2,77 | 3,04 | 2,97 | 2,89 | 3,00 |
| As | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 2,98 | 2,95 | 2,83 | 2,77 | 3,04 | 2,99 | 2,89 | 3,00 |
| Ti | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| S | 0,00 | 0,00 | 0,27 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Fe | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 |
| Ca | 5,02 | 4,99 | 4,72 | 5,23 | 4,96 | 5,01 | 5,06 | 5,00 |
| Mn | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,00 |
| Ba | 0,00 | 0,00 | 0,18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 5,02 | 5,05 | 5,17 | 5,23 | 4,96 | 5,01 | 5,21 | 5,00 |
| F | 1,03 | 0,00 | 0,00 | 0,79 | 1,12 | 0,94 | 0,90 | 1,00 |
| ОН | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,21 | 0,00 | 0,06 | 0,10 | 0,00 |
| Сумма | 1,03 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,12 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Циркон $Zr(SiO_4)$

В изученных образцах было найдено одно зерно циркона в кварце. Циркон представлен неправильным по форме зерном (см. фото 16, е), вероятнее всего, поступившим в рудоносный осадок в составе обломочного терригенного материала. Размер зерна в поперечнике 20 мкм, в длину 30 мкм.

Химический состав циркона приведен в таблице 16. Из элементов-примесей в цирконе присутствует лишь гафний (1,02 масс. %).

Таблица 14
Химический состав циркона
(масс. %)

| | |
|------------------------|--------|
| Компонент | 1 |
| SiO ₂ | 32,50 |
| ZrO ₂ | 66,48 |
| HfO ₂ | 1,02 |
| Сумма | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | |
| Si | 1,00 |
| Сумма | 1,00 |
| Zr | 0,99 |
| Hf | 0,01 |
| Сумма | 1,00 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Кентролит $Pb_2Mn^{3+}_2(Si_2O_7)O_2$

Кентролит является очень редким минералом метаморфизованных месторождений марганцевых руд.

В браунитовых рудах он заполняет трещинки, прожилки между зерен амфибола и на границе с зернами кальцита (рис. 17, а).

В кентролите довольно много элементов-примесей. Основными примесями кентролита браунитовых руд являются алюминий, железо и натрий, а так же, в меньшей мере, титан, марганец, барий, кальций, калий. Суммарно они достигают до 15 масс. %. Химический анализ кентролита из марганцевых пород представлен в таблице 15.

Таблица 15

Химический состав кентролита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 |
|--------------------------------|--------|--------|
| SiO ₂ | 32,13 | 25,80 |
| TiO ₂ | 1,19 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 2,63 | 1,25 |
| FeO | 3,27 | 3,36 |
| MnO ^{общ} | 39,17 | 41,66 |
| MgO | 0,00 | 8,50 |
| PbO | 16,36 | 10,41 |
| BaO | 5,25 | 2,73 |
| CaO | 0,00 | 2,56 |
| Na ₂ O | 0,00 | 3,35 |
| K ₂ O | 0,00 | 0,38 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | |
| Si | 2,46 | 1,98 |
| Al | 0,24 | 0,11 |
| Сумма | 2,70 | 2,09 |
| Ti | 0,07 | 0,00 |
| Mn ³⁺ | 0,66 | 0,99 |
| Сумма | 0,73 | 0,99 |
| Mn ²⁺ | 1,88 | 1,72 |
| Fe ²⁺ | 0,21 | 0,22 |
| Mg | 0,00 | 0,97 |
| Pb | 0,34 | 0,22 |
| Ba | 0,16 | 0,08 |
| Ca | 0,00 | 0,21 |
| Na | 0,00 | 0,50 |
| K | 0,00 | 0,04 |
| Сумма | 2,59 | 3,96 |

Примечание. В таблице микрозондовые анализы нормализованы к 100%.

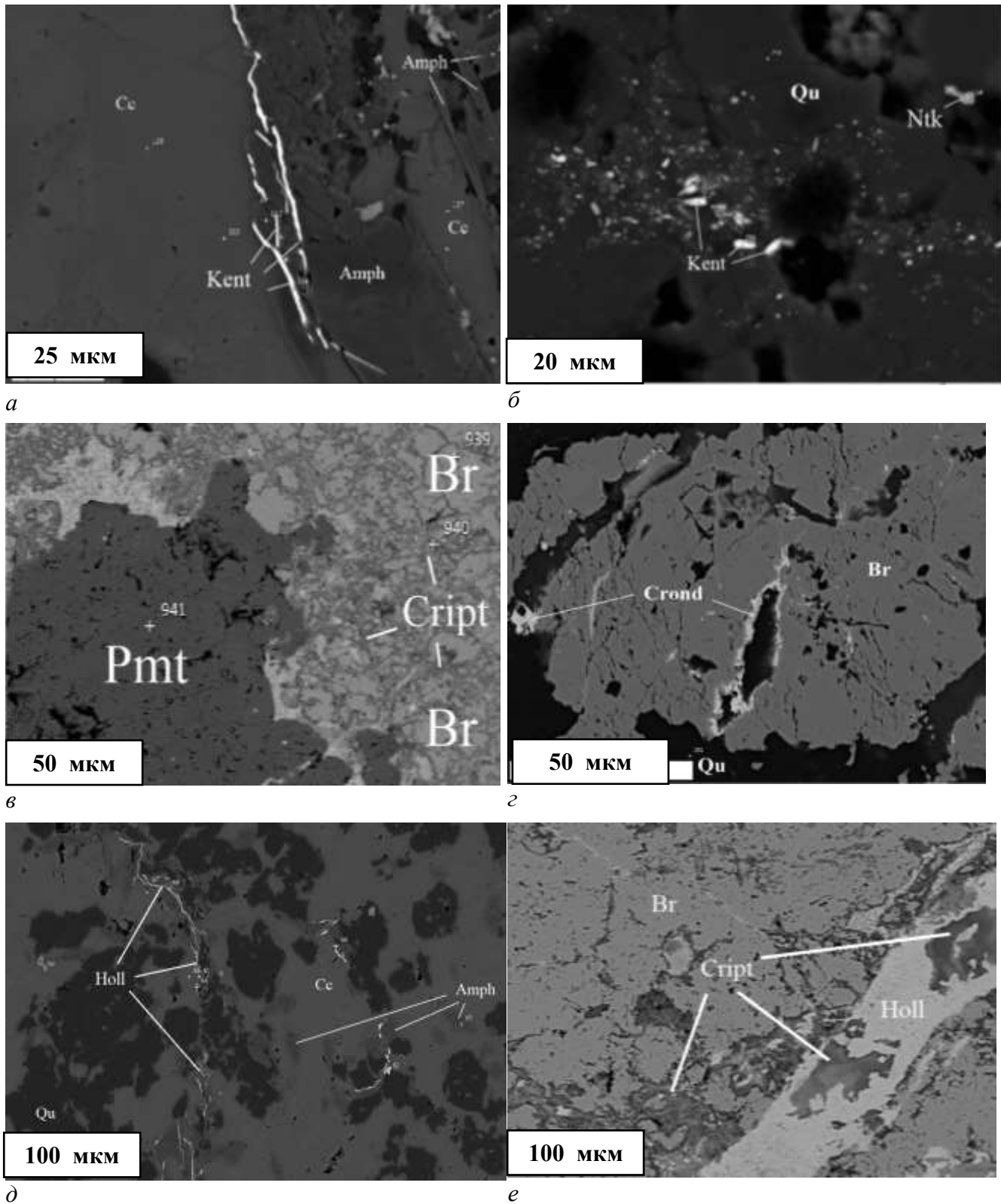


Рис.17. Поздние минералы браунитовых руд. а – кентролит в трещинах, секущих амфибол, б - выделения кентролита и неотокита в кварце, в – пьомонит с браунитом и крипломеланом, г – кронандит с браунитом, д – голландит в, е – прожилок в брауните, выполненный голландитом и криptomеланом. а - изображение в проходящем свете. Фотографии шлифов в обратно-рассеянных электронах.

Неонокит $\text{Mn}(\text{SiO}_3) \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Неонокит - рентгеноаморфный силикат марганца с приблизительной формулой $\text{Mn}(\text{SiO}_3) \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Изучение неонокита методом просвечивающей электронной микроскопии выявило присутствие в его строении разориентированных пакетов слоистой структуры (Брусницын, 2013).

Неонокит типичен для марганцевых руд разного происхождения, однако в изученных образцах было обнаружено лишь одно зерно неонокита в кварце около 10 мкм в поперечнике (рис. 17, б).

Химический состав неонокита приведен в таблице 16. Элементами-примесями в неоноките являются алюминий, железо, кальций, натрий, калий.

Таблица 16

Химический состав неонокита (масс. %)

| | |
|-------------------------|--------|
| Компонент | 1 |
| SiO_2 | 54,45 |
| Al_2O_3 | 1,22 |
| FeO | 2,15 |
| MnO | 40,66 |
| CaO | 0,56 |
| Na_2O | 0,85 |
| K_2O | 0,11 |
| Сумма | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | |
| Si | 1,14 |
| Сумма | 1,14 |
| Al | 0,03 |
| Fe^{2+} | 0,04 |
| Mn^{2+} | 0,74 |
| Ca | 0,01 |
| Na | 0,04 |
| Сумма | 0,86 |
| O | 3,19 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Пьемонтит $\text{Ca}_2\text{Mn}^{3+}\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$

Пьемонтит является марганцевым минералом из группы эпидота. Обычно минералы этой группы присутствуют в качестве второстепенных или аксессуарных фаз, но в породах, обогащенных вулканомиктовым веществом, их количество резко возрастает (Брусницын, 2013).

Минерал представлен однородной тонкозернистой массой (рис.17, в)

Пьемонтит имеет насыщенную малиновую окраску и специфические цвета плеохроизма: от яркого кроваво-малинового, через фиолетовый до лимонно-желтого из-за наличия трехвалентного марганца. По таким чрезвычайно броским оптическим характеристикам марганцевые минералы группы эпидота легко узнаются в образцах и шлифах, даже если присутствуют в них в виде мелких зерен.

Химический состав данного минерала характеризуется значительными колебаниями содержаний марганца и кальция, при существенно меньших вариациях концентраций алюминия и железа (табл. 17).

В браунитовых рудах присутствует пьемонтит, сильно обогащенный марганцем: общее содержание этого элемента ($\text{Mn}^{2+} + \text{Mn}^{3+}$) составляет от 2,30 до 2,68 к.ф.

Таблица 17

Химический состав пьемонтита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 35,52 | 35,54 | 36,07 | 35,51 | 35,23 | 35,65 | 35,06 |
| Al ₂ O ₃ | 19,36 | 19,88 | 19,85 | 19,51 | 19,76 | 20,13 | 20,64 |
| FeO ^{общ} | 1,28 | 0,63 | 1,11 | 1,41 | 1,12 | 0,96 | 0,00 |
| MnO ^{общ} | 36,32 | 37,58 | 37,42 | 39,12 | 37,64 | 36,29 | 38,35 |
| CaO | 7,52 | 6,37 | 5,55 | 4,45 | 6,25 | 6,97 | 5,95 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | |
| Si | 2,86 | 2,88 | 2,92 | 2,88 | 2,85 | 2,88 | 2,86 |
| Al | 0,14 | 0,12 | 0,08 | 0,12 | 0,15 | 0,12 | 0,14 |
| Сумма | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| Al | 1,70 | 1,78 | 1,81 | 1,74 | 1,73 | 1,79 | 1,98 |
| Fe ³⁺ | 0,17 | 0,09 | 0,15 | 0,19 | 0,15 | 0,13 | 0,00 |
| Mn ³⁺ | 1,27 | 1,25 | 1,12 | 1,19 | 1,27 | 1,20 | 1,16 |
| Сумма | 3,14 | 3,12 | 3,08 | 3,12 | 3,15 | 3,12 | 3,14 |
| Mn ²⁺ | 1,21 | 1,33 | 1,44 | 1,49 | 1,31 | 1,28 | 1,34 |
| Ca | 0,65 | 0,55 | 0,48 | 0,39 | 0,54 | 0,60 | 0,52 |
| Сумма | 1,86 | 1,88 | 1,92 | 1,88 | 1,85 | 1,88 | 1,86 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Барит BaSO₄

Барит в небольшом количестве присутствует почти во всех ассоциациях.

В большинстве случаев минерал представлен мелкими зернами, диагностируемыми только с помощью электронной микроскопии, размером до 0.05 мкм.

Типичными примесями барита из браунитовых руд являются кремний, алюминий, марганец, стронций и кальций. Суммарно они достигают не больше 0,3 к.ф. Химический анализ барита из марганцевых пород представлен в таблице 18.

Таблица 18

Химический состав барита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SO ₃ | 32,87 | 30,51 | 32,53 | 30,94 | 32,87 |
| SiO ₂ | 0,65 | 2,51 | 1,10 | 1,44 | 0,65 |
| Al ₂ O ₃ | 0,48 | 2,03 | 0,50 | 0,53 | 0,48 |
| MnO | 2,47 | 3,93 | 2,64 | 4,27 | 2,47 |
| BaO | 60,59 | 58,87 | 60,02 | 60,69 | 60,59 |
| SrO | 2,94 | 1,41 | 2,83 | 1,64 | 2,94 |
| CaO | 0,00 | 0,74 | 0,38 | 0,49 | 0,00 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | |
| S | 0,86 | 0,83 | 0,91 | 0,87 | 0,93 |
| Si | 0,02 | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0,02 |
| Al | 0,22 | 0,09 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Сумма | 1,10 | 1,00 | 0,97 | 0,94 | 0,97 |
| Mn | 0,05 | 0,11 | 0,08 | 0,12 | 0,08 |
| Ba | 0,83 | 0,84 | 0,88 | 0,89 | 0,89 |
| Sr | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,03 | 0,06 |
| Ca | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,00 |
| Сумма | 0,91 | 1,00 | 1,03 | 1,06 | 1,03 |
| O | 3,86 | 3,83 | 3,87 | 3,82 | 3,86 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Аксессуарные минералы

Другие оксиды

Так же, помимо кварца, в образце представлены оксиды марганца, бария, свинца и калия: коронадит $Pb(Mn_6^{4+}Mn_2^{3+})O_{16}$, голландит $Ba(Mn_6^{4+}Mn_2^{3+})O_{16}$, криптомелан $K(Mn_6^{4+}Mn_2^{3+})O_{16}$, которые образуют друг с другом изоморфный ряд.

Эти минералы являются представителями прожилковой ассоциации браунитовых руд. Они заполняют трещины, пустоты, прожилки в вышеперечисленных минералах.

Рассмотрим подробнее каждый из этих минералов.

Коронандит образует примазки, каемки на других минералах марганца (рис. 17, г).

В породе встречается довольно редко.

В коронандите довольно много элементов-примесей. Основными примесями являются железо, барий, кальций, натрий, калий. Суммарно они достигают до 3 масс. %. Химический анализ коронандита из марганцевых пород представлен в таблице 15.

Таблица 19

Химический состав коронандита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| FeO | 2,63 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| PbO | 14,27 | 32,99 | 32,56 | 33,50 | 34,42 | 34,15 | 36,25 |
| MnO ^{общ} | 79,16 | 66,70 | 66,21 | 65,23 | 65,58 | 65,50 | 63,44 |
| BaO | 2,56 | 0,00 | 0,00 | 0,58 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| CaO | 0,88 | 0,31 | 0,63 | 0,69 | 0,00 | 0,35 | 0,31 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,60 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| K ₂ O | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | |
| Pb | 0,46 | 1,22 | 1,18 | 1,24 | 1,29 | 1,27 | 1,38 |
| Ba | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ca | 0,11 | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,00 | 0,05 | 0,05 |
| Na | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| K | 0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Fe ²⁺ | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 1,03 | 1,27 | 1,43 | 1,37 | 1,29 | 1,32 | 1,43 |
| Mn ³⁺ | 1,86 | 1,50 | 0,98 | 1,22 | 1,42 | 1,36 | 1,18 |
| Сумма | 1,86 | 1,50 | 0,98 | 1,22 | 1,42 | 1,36 | 1,18 |
| Mn ⁴⁺ | 6,11 | 6,24 | 6,59 | 6,40 | 6,29 | 6,32 | 6,40 |
| Сумма | 6,11 | 6,24 | 6,59 | 6,40 | 6,29 | 6,32 | 6,40 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Голландит встречается в виде неоднородной скрытокристаллической массы, заполняющей прожилки и трещины в породе. Является самым распространенным из этих трех минералов.

Голландит имеет большое количество примесей. Основными элементами-примесями являются кремний, алюминий, железо, марганец, стронций, цинк, кальций, натрий, калий. Суммарно они достигают до 8 масс. %. Химический состав голландита браунитовых руд представлен в таблице 20.

Таблица 20
Химический состав голландита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 0,50 | 0,43 | 0,41 | 0,00 | 0,55 | 0,37 | 0,45 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 0,46 | 0,34 | 0,00 | 0,00 | 0,65 | 0,39 | 0,53 | 1,09 |
| FeO | 1,10 | 0,00 | 0,00 | 0,90 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,95 |
| MnO ^{общ} | 80,16 | 81,45 | 80,41 | 82,33 | 78,87 | 81,38 | 79,10 | 77,67 |
| MgO | 0,21 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,44 | 0,00 | 0,00 |
| SrO | 0,83 | 1,08 | 0,51 | 0,68 | 0,26 | 0,73 | 0,66 | 0,52 |
| BaO | 13,92 | 13,83 | 17,62 | 14,14 | 18,89 | 15,31 | 18,31 | 18,91 |
| ZnO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| CaO | 0,00 | 0,64 | 0,00 | 0,36 | 0,39 | 0,47 | 0,45 | 0,39 |
| Na ₂ O | 0,61 | 0,74 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,00 |
| K ₂ O | 2,21 | 1,49 | 1,05 | 1,59 | 0,39 | 0,66 | 0,50 | 0,47 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | | |
| Si | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 0,06 | 0,04 | 0,05 | 0,00 |
| Mn ⁴⁺ | 6,54 | 6,45 | 6,11 | 6,18 | 6,00 | 6,10 | 6,06 | 6,10 |
| Сумма | 6,60 | 6,50 | 6,16 | 6,18 | 6,06 | 6,14 | 6,11 | 6,10 |
| Al | 0,06 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,05 | 0,08 | 0,15 |
| Fe ²⁺ | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,09 |
| Mn ³⁺ | 1,09 | 1,32 | 1,84 | 1,78 | 1,85 | 1,79 | 1,79 | 1,63 |
| Mg | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 1,29 | 1,37 | 1,84 | 1,87 | 1,94 | 1,92 | 1,87 | 1,87 |
| Sr | 0,05 | 0,07 | 0,03 | 0,05 | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,04 |
| Ba | 0,61 | 0,61 | 0,81 | 0,63 | 0,87 | 0,69 | 0,84 | 0,87 |
| Zn | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ca | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,05 |
| Na | 0,13 | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,00 |
| K | 0,32 | 0,21 | 0,16 | 0,23 | 0,06 | 0,10 | 0,07 | 0,07 |
| Сумма | 1,11 | 1,13 | 1,00 | 0,95 | 1,00 | 0,96 | 1,01 | 1,03 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Криптомелан является калиевым членом изоморфного ряда этих оксидов. Он заполняет трещины и пустоты не только в первичных рудах – брауните, но и в своем бариевом аналоге – голландите.

Криптомелан так же имеет много изоморфных примесей, таких как кремний, алюминий, железо, марганец, стронций, барий, кальций и натрий. Суммарно они достигают до 7 масс. %. Химический состав голландита браунитовых руд представлен в таблице 21.

Таблица 21

Химический состав криптомелана (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,46 | 0,49 | 0,16 | 0,48 | 0,30 |
| Al ₂ O ₃ | 0,61 | 0,31 | 0,51 | 0,60 | 0,40 | 0,00 | 0,34 |
| FeO ^{общ} | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,35 |
| MnO ^{общ} | 89,24 | 85,02 | 85,25 | 84,67 | 85,33 | 86,93 | 85,23 |
| MgO | 0,00 | 0,00 | 0,71 | 5,34 | 2,32 | 3,06 | 2,48 |
| SrO | 0,00 | 0,27 | 1,25 | 0,89 | 1,08 | 0,97 | 0,72 |
| BaO | 3,24 | 10,31 | 6,49 | 4,31 | 5,89 | 4,86 | 4,66 |
| CaO | 0,00 | 0,00 | 0,87 | 0,76 | 0,91 | 0,79 | 0,58 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,65 | 0,00 | 0,64 |
| K ₂ O | 6,91 | 4,09 | 3,69 | 2,94 | 3,26 | 2,91 | 3,70 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | |
| Si | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,05 | 0,03 |
| Mn ⁴⁺ | 7,00 | 6,60 | 6,83 | 6,88 | 6,89 | 6,56 | 6,91 |
| Сумма | 7,00 | 6,60 | 6,88 | 6,93 | 6,91 | 6,61 | 6,94 |
| Al | 0,07 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,05 | 0,00 | 0,04 |
| Fe ³⁺ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,12 |
| Mn ³⁺ | 0,88 | 1,33 | 0,84 | 0,48 | 0,70 | 1,17 | 0,60 |
| Mg | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,82 | 0,36 | 0,48 | 0,38 |
| Сумма | 0,95 | 1,37 | 1,01 | 1,37 | 1,11 | 1,65 | 1,14 |
| Sr | 0,00 | 0,02 | 0,08 | 0,05 | 0,07 | 0,06 | 0,04 |
| Ba | 0,13 | 0,44 | 0,27 | 0,17 | 0,24 | 0,20 | 0,19 |
| Ca | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,09 | 0,10 | 0,09 | 0,06 |
| Na | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,00 | 0,13 | 0,00 | 0,13 |
| K | 0,92 | 0,57 | 0,50 | 0,39 | 0,44 | 0,39 | 0,49 |
| Сумма | 1,05 | 1,03 | 1,11 | 0,70 | 0,98 | 0,74 | 0,91 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Следует отметить, что минералы этого изоморфного ряда на данном месторождении обнаружены не были.

3.2. Минералы гаусманитовых руд

3.2.1. Породообразующие минералы

Гаусманит $Mn^{2+}Mn_2^{3+}O_4$

Рудные минералы представлены в гаусманитовых руд представлены, собственно, гаусманитом. Гаусманит обычно находится в тесных взаимоотношениях с родонитом, тефроитом. Вместе эти минералы слагают линзовидные или неправильные по форме микрозернистые обособления во вмещающей породе. Иногда в породах проявлено замещение гаусманита фриделитом, тефроитом. Характер нахождения рудного вещества в породе согласный (рис. 19).

Окраска гаусманита в образцах темная красновато-коричневая до черной, блеск металлический. В шлифах минерал непрозрачный, в тонких сколах просвечивает бордовым цветом.

В гаусманите можно выделить 2 генерации. Гаусманит-I является первичным и слагает мелкозернистые массы. Гаусманит-II является переотложенным и заполняет совместно с фриделитом секущие прожилки (рис. 19, г). Примечательной особенностью Гаусманита-II является наличие в составе цинка (табл.22, анализы 5-8).

Таблица 22

Химический состав гаусманита (масс. %)

| Компонент | Гаусманит-I | | | | Гаусманит-II | | | |
|------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| FeO ^{общ} | 4,97 | 4,53 | 4,34 | 5,29 | 4,06 | 4,30 | 2,22 | 4,10 |
| MnO ^{общ} | 95,03 | 95,47 | 95,66 | 94,71 | 95,37 | 95,22 | 96,54 | 95,22 |
| ZnO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,57 | 0,48 | 1,24 | 0,68 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | | |
| Fe ³⁺ | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 0,30 | 0,23 | 0,24 | 0,13 | 0,23 |
| Mn ³⁺ | 1,72 | 1,74 | 1,75 | 1,70 | 1,79 | 1,78 | 1,87 | 1,77 |
| Сумма | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,02 | 2,02 | 2,00 | 2,00 |
| Mn ²⁺ | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,98 |
| Zn | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 |
| Сумма | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,97 | 0,98 | 1,00 | 1,00 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

По данным микронзондового анализа гаусманита месторождения Жомарт, наиболее распространенный элемент, замещающий марганец – железо (до 0,6 масс.%) и цинк (до 0,03 масс.%).

Порошковые рентгенограммы гаусманита месторождения Жомарт близки к эталонным данным для этого минерала (эталон 01-080-0382) и представлены в таблице 23. Главные линии рентгенограммы жомартского гаусманита показаны на рис.18.

Таблица 23

Результаты расчета рентгенофазового анализа гаусманита

| Образец | | Эталон 01-080-0382 | | | | |
|---------|-----|--------------------|-----|---|---|---|
| d | I | d | I | h | k | l |
| 4.9285 | 21 | 4.920350 | 24 | 1 | 0 | 1 |
| 3.0827 | 33 | 3.085410 | 36 | 1 | 1 | 2 |
| 2.8858 | 8 | 2.882500 | 16 | 2 | 0 | 0 |
| 2.7521 | 61 | 2.762470 | 76 | 1 | 0 | 3 |
| 2.4886 | 100 | 2.487130 | 100 | 2 | 1 | 1 |
| 2.3485 | 12 | 2.360500 | 18 | 0 | 0 | 4 |
| 2.0393 | 21 | 2.038240 | 21 | 2 | 2 | 0 |
| 1.8224 | 6 | 1.826280 | 6 | 2 | 0 | 4 |
| 1.7868 | 20 | 1.794580 | 22 | 1 | 0 | 5 |
| 1.7016 | 6 | 1.700660 | 9 | 3 | 1 | 2 |
| 1.6394 | 5 | 1.640120 | 7 | 3 | 0 | 3 |
| 1.5808 | 25 | 1.576480 | 28 | 3 | 2 | 1 |
| 1.54218 | 47 | 1.542710 | 50 | 2 | 2 | 4 |
| 1.44343 | 21 | 1.441250 | 18 | 3 | 1 | 4 |

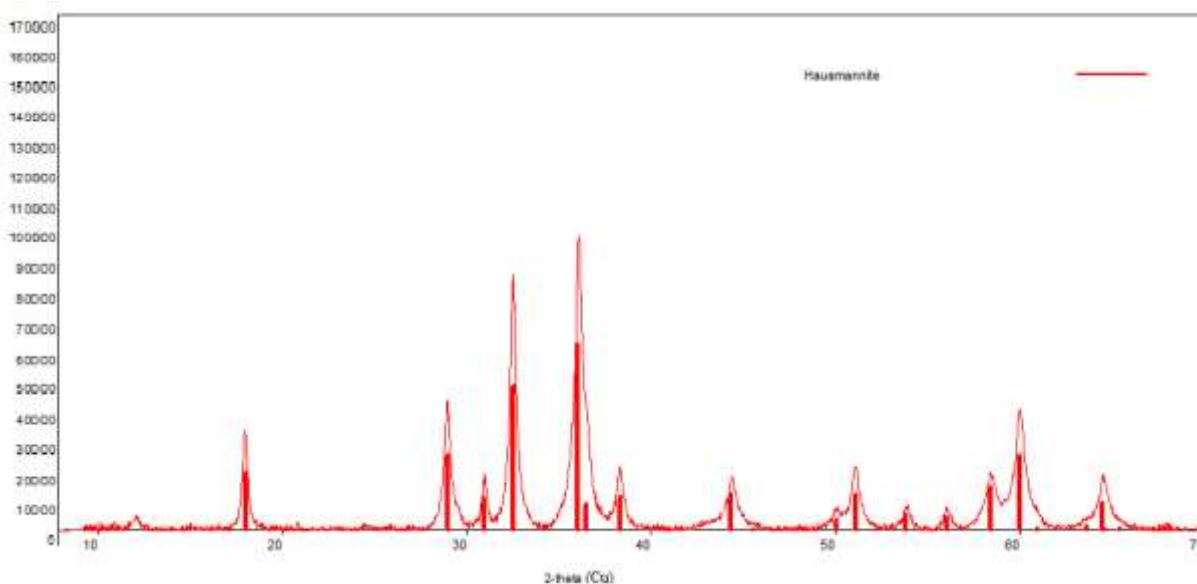


Рис.18. Рентгенограмма гаусманита.

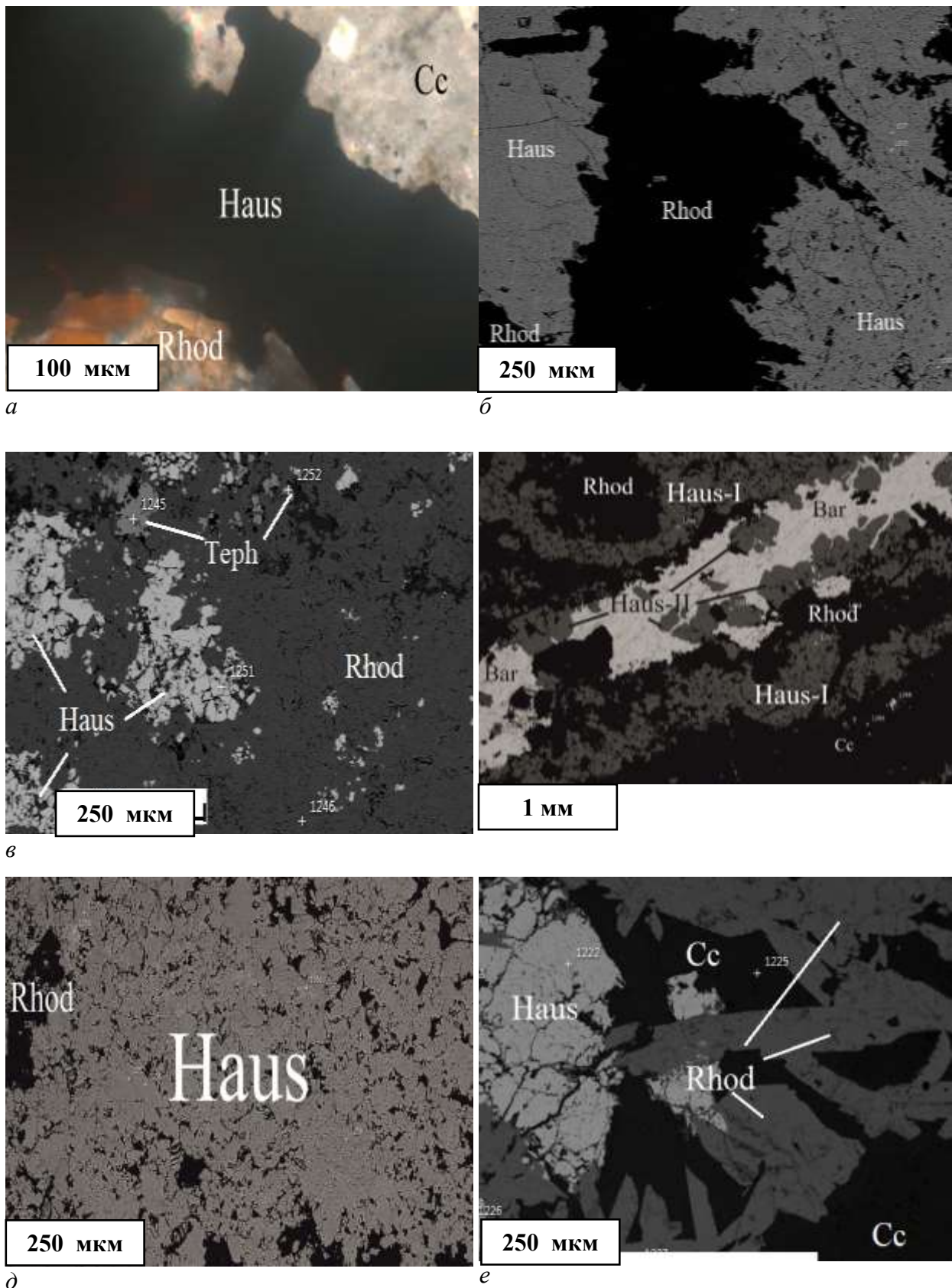


Рис.19. Морфология зерен гаусманита. Фотографии шлифов: а - изображение в проходящем свете в скрещенных николях, б, в, г, д, е - изображения в обратно-рассеянных электронах.

Родонит $\text{CaMn}_4(\text{Si}_5\text{O}_{15})$

Родонит – самый распространенный силикат гаусманитовых руд в изученных образцах. При прочих равных условиях родонит кристаллизуется в породах с относительно высокими концентрациями кальция (Брусницын, 2014).

В основном объеме породы родонит формирует агрегаты двух морфологических типов. В первом минерал представлен мелкими (до 0.5 мм) очень плохо окристаллизованными индивидами удлиненной или реже изометричной формы. Такие зерна имеют неровные очертания, мозаичное, микроблочное строение, местами с изотропными участками, содержат большое число включений более ранних кальцита и кварца (рис. 20, е и рис. 21, б). Изолированные кристаллы родонита наблюдаются редко, как правило, они собраны в радиально-лучистые, крестообразные и бесформенные (комковатые) агрегаты.

В агрегатах второго типа степень кристалличности родонита существенно выше. Минерал здесь чаще всего образует таблитчатые гипидиоморфные зерна с небольшим количеством включений и других дефектов, хорошо выраженными оптическими свойствами. Встречаются как отдельные таблички родонита, так и их скопления с мозаичной или радиально-лучистой структурой (рис. 19, е и рис. 20, д). По-видимому, в большинстве случаев таблитчатый родонит является более поздним и появляется путем собирательной перекристаллизации микроблочного родонита.

Макроскопически родонит имеет розовую, бежевую окраски различных оттенков (рис.5).

В проходящем свете родонит бесцветен, не плеохроирует. В скрещенных николях преимущественно желтого, оранжевого бежевого цветов. Погасание косое, угол погасания 40-45 градусов. $n_m \approx 1.75$, $n_g \approx n_r \approx 0.009-0.012$.

У таблитчатых зерен всегда хорошо видны трещины спайности, пересекающиеся под углом около 90° (рис. 21, а). Родонит в шлифе тесно соседствует с карбонатом. Размер зерен средне и мелкозернистый 1-0.1 мм.

Химически родонита гаусманитовых руд практически чистый. Из элементов-примесей в нем присутствуют лишь небольшие примеси Mg до 0,22 к.ф. Типичные химические анализы браунита изученных месторождений приведены в табл. 24.

Таблица 24

Химический состав родонита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 46,56 | 46,19 | 46,29 | 46,56 | 45,83 | 46,58 | 46,58 | 46,13 |
| MnO | 44,42 | 44,60 | 44,97 | 44,75 | 46,09 | 44,58 | 44,31 | 44,98 |
| MgO | 0,95 | 0,91 | 1,18 | 1,37 | 0,00 | 1,05 | 0,75 | 1,18 |
| CaO | 8,07 | 8,30 | 7,56 | 7,32 | 8,08 | 7,79 | 8,36 | 7,71 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | | |
| Si | 4,94 | 4,91 | 4,91 | 4,93 | 4,90 | 4,94 | 4,95 | 4,89 |
| Сумма | 4,94 | 4,91 | 4,91 | 4,93 | 4,90 | 4,94 | 4,95 | 4,89 |
| Mn | 3,99 | 4,01 | 4,04 | 4,02 | 4,17 | 4,00 | 3,98 | 4,04 |
| Сумма | 3,99 | 4,01 | 4,04 | 4,02 | 4,17 | 4,00 | 3,98 | 4,04 |
| Mg | 0,15 | 0,14 | 0,19 | 0,22 | 0,00 | 0,17 | 0,12 | 0,19 |
| Ca | 0,92 | 0,94 | 0,86 | 0,83 | 0,93 | 0,89 | 0,95 | 0,88 |
| Сумма | 1,07 | 1,08 | 1,05 | 1,05 | 0,93 | 1,06 | 1,07 | 1,07 |
| O | 14,94 | 14,89 | 14,91 | 14,93 | 14,90 | 14,95 | 14,95 | 14,89 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Порошковые рентгенограммы родонита месторождения Жомарт близки к эталонным данным для этого минерала (эталон 00-005-0614) и представлены в таблице 25.

| Таблица №25 | | | | | | |
|--|-----|--------------------|------|----|----|----|
| Результаты расчета рентгенофазового анализа родонита | | | | | | |
| Образец | | Эталон 00-005-0614 | | | | |
| d | I | d | I | h | k | l |
| 3.5428 | 29 | 3.547360 | 16 | 2 | 2 | 0 |
| 3.322 | 60 | 3.331120 | 183m | 2 | 0 | 2 |
| 3.1189 | 23 | 3.126750 | 39 | 2 | -2 | -1 |
| 2.9596 | 83 | 2.971790 | 26 | 1 | -3 | 2 |
| 2.9164 | 78 | 2.927680 | 80 | 2 | -2 | 2 |
| 2.7502 | 100 | 2.755580 | 100 | -2 | -2 | 4 |
| 2.642 | 72 | 2.649180 | 28 | 0 | 2 | 3 |
| 2.5085 | 47 | 2.532660 | 40 | 3 | 3 | -2 |
| 2.449 | 30 | 2.479280 | 7m | 1 | -3 | -2 |
| 2.2118 | 15 | 2.218180 | 24 | 4 | 0 | 3 |
| 2.1690 | 10 | 2.170910 | 31 | 2 | -4 | 1 |
| 2.0994 | 9 | 2.124980 | 19 | 2 | -4 | 2 |
| 1.877 | 9 | 1.931560 | 25 | 2 | -2 | 5 |
| 1.721 | 41 | 1.741990 | m | 2 | -4 | -3 |
| 1.6940 | 67 | 1.701360 | 18 | 2 | 6 | -3 |
| 1.636 | 9 | 1.636450 | 9 | -3 | 0 | 5 |

Рентгенограмма родонита из основной массы породы обладает широкими диффузными рефлексами без ясно выраженных вершин. Отражения с близкими межплоскостными

расстояниями на рентгенограмме не разделяются, а сливаются в единые, как правило, асимметричные пики (рис. 20) .

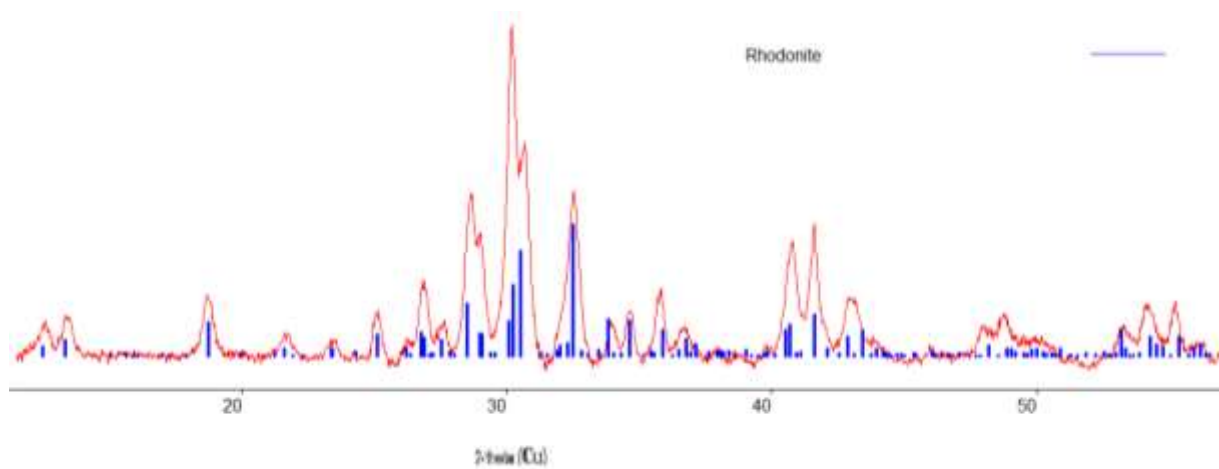


Рис. 20. Рентгенограмма родонита.

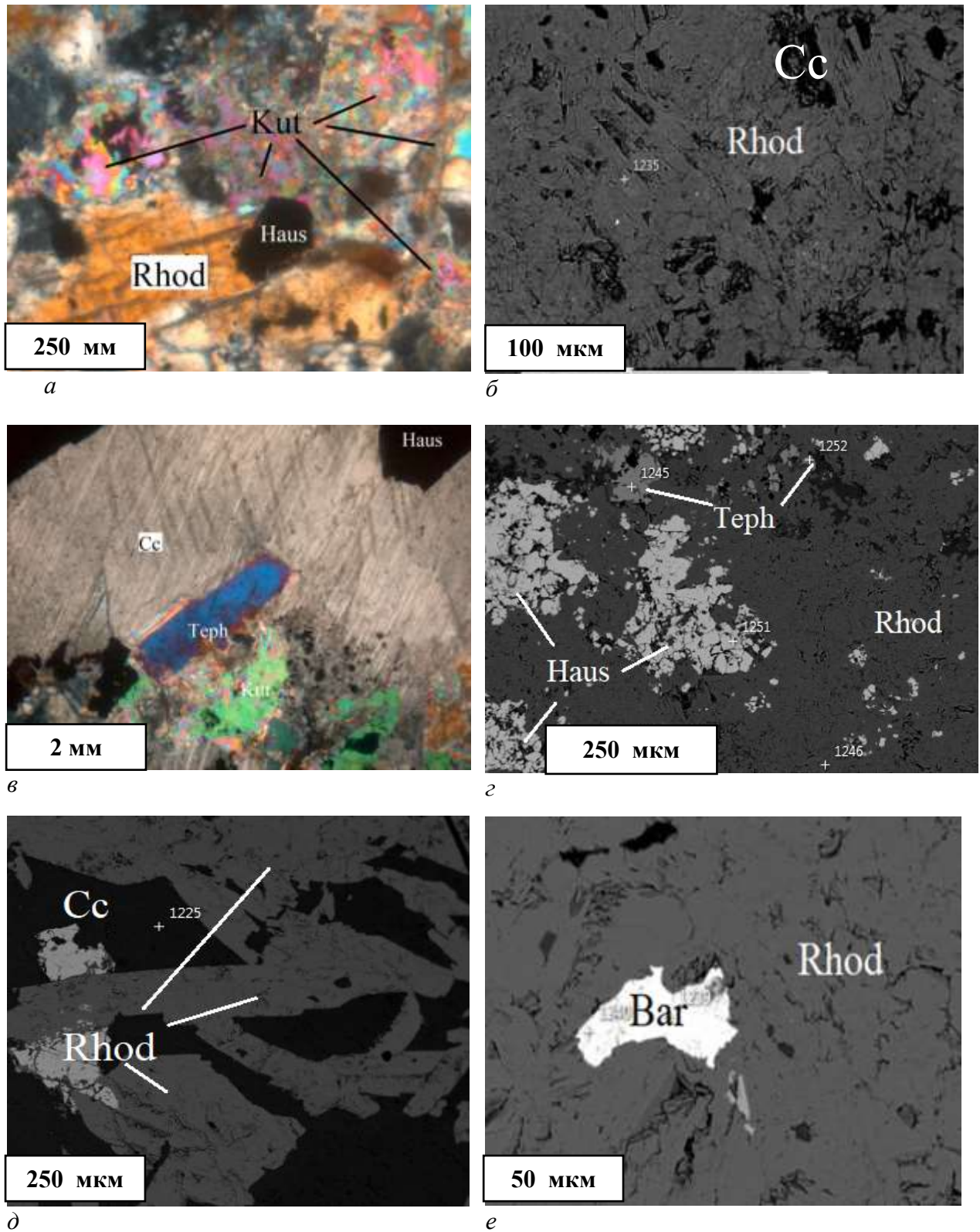


Рис. 21. Главные нерудные минералы гаусманитовых руд: а - выделения родонита, кутнагорита и гаусманита, б - морфология выделений, в - кальцит с кутнагоритом и гаусманитом, г - морфология выделений тефроита, д - кальцит с родонитом, е – барит в родоните. Фотографии шлифов: а, в - изображения в проходящем свете в скрещенных николях, б, г, д, е - изображения в обратно-рассеянных электронах.

Кальцит CaCO_3

Кальцит один из главных породообразующих минералов гаусманитовых руд.

Он распространен в породе практически повсеместно. Кальцит слагает мелкозернистые массы с родонитом, кариопилитом, пьемонитом, гематитом, кварцем и другими минералами (ри. 21, б, в, д). Зерна по размеру средне- и мелкозернистые 1-0.2 мм, по форме квадратные, прямоугольные. Морфологически кальцит гаусманитовых руд идентичен кальциту браунитовых руд.

По весьма характерному набору физических свойств в образцах и шлифах карбонаты легко отличаются от других минералов, но практически неотличимы друг от друга. В химическом составе карбонатов месторождения Жомарт установлены широкие вариации содержания кальция и марганца, при низких концентрациях магния и стронция. На рисунке 22 нанесены составы всех карбонатов обоих типов руд. Мы видим, что кальцит гаусманитовых руд в большей мере насыщен марганцем, а кальцит браунитовых руд – магнием и железом. Кроме кальцита, на диаграмме нанесены анализы другого карбоната гаусманитовых руд - кутнагорита, описание которого дано ниже.

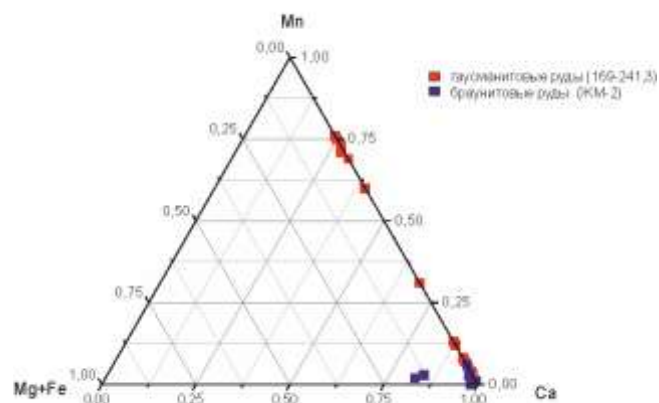


Рис. 22. Вариации химического состава карбонатов браунитовых и гаусманитовых руд.

Типичные химические анализы кальцита гаусманитовых руд приведены в табл. 26.

Таблица 26

Химический состав кальцита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MnO | 9,63 | 4,89 | 6,14 | 14,84 | 15,45 | 8,27 | 9,73 |
| CaO | 90,37 | 94,82 | 93,06 | 85,16 | 84,02 | 91,73 | 89,72 |
| SrO | 0,00 | 0,29 | 0,80 | 0,00 | 0,53 | 0,00 | 0,55 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Миналы, % | | | | | | | |
| MnCO ₃ | 8 | 4 | 5 | 12 | 13 | 7 | 8 |
| CaCO ₃ | 92 | 96 | 95 | 88 | 87 | 93 | 92 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Тефроит $Mn^{2+}_2SiO_4$

Тефроит является главным минералом гаусманитовых руд месторождения Жомарт. Совместно с гаусманитом, родонитом и карбонатами он составляет основную массу обогащенных марганцем руд.

Тефроит встречается в виде мелких (0.1–5 мм) зерен изометричной или удлиненной формы, которые изолированы друг от друга (рис. 21, в, г). Индивиды тефроита, как правило, чрезвычайно дефектны, разбиты сериями тончайших трещин.

В образцах тефроит имеет светлую пепельно-серую окраску; в шлифах бесцветен, легко узнается по отсутствию спайности, типичным для минералов группы оливина «базарным» цветам интерференции ($n_g - n_p = 0.035 - 0.040$) и высокому рельефу ($n_m \approx 1.80$).

Характерной чертой жомартского тефроита (табл. 27) служит очень низкое содержание примесей (Mg и Ca).

Таблица 27

Химический состав тефроита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 |
|------------------------|--------|--------|
| SiO ₂ | 29,67 | 29,55 |
| MnO | 69,56 | 69,45 |
| MgO | 0,61 | 0,69 |
| CaO | 0,16 | 0,31 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | |
| Si | 0,99 | 0,99 |
| Сумма | 0,99 | 0,99 |
| Mn | 1,97 | 1,97 |
| Mg | 0,03 | 0,03 |
| Ca | 0,01 | 0,01 |
| Сумма | 2,01 | 2,01 |

Примечание. В таблице микрозондовые анализы нормализованы к 100%.

Барит BaSO₄

Барит гаусманитовых руд аналогичен бариту браунитовых руд. В большинстве случаев минерал представлен мелкими зернами, диагностируемыми только с помощью электронной микроскопии, размером до 80 мкм (рис. 21, е).

Типичной примесью барита из гаусманитовых руд является лишь стронций, это его отличает от барита браунитовых руд, где элементами-примесями являются кремний, алюминий, марганец, стронций и кальций. Примесь стронция достигает не больше 0,05 к.ф. Химический анализ барита из гаусманитовых руд представлен в таблице 28.

Таблица 28

Химический состав барита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SO ₃ | 34,21 | 34,26 | 33,88 | 33,51 | 33,42 |
| BaO | 63,99 | 63,40 | 64,11 | 65,15 | 64,56 |
| SrO | 1,80 | 2,34 | 2,01 | 1,34 | 2,02 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | |
| S | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,97 |
| Сумма | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,97 |
| Ba | 0,97 | 0,96 | 0,97 | 0,99 | 0,98 |
| Sr | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,03 | 0,05 |
| Сумма | 1,01 | 1,01 | 1,02 | 1,02 | 1,03 |
| O | 3,94 | 3,98 | 3,96 | 3,96 | 3,94 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

3.2.2. Второстепенные минералы

Фриделит $Mn_8Si_6O_{15}(OH,Cl)_{10}$

Одним из характерных второстепенных минералов гаусманитовых руд является фриделит. На практике различить фриделит и такой силикат марганца, как кариопилит, достаточно трудно. Сделать это удастся по распределению в минералах хлора, который почти всегда содержится в составе фриделита, но не характерен для кариопилита (*Брусницын, 2013*).

Фриделит часто заполняет прожилки в родонитовой массе (рис.23, г). Встречается в ассоциации с гаусманитом, родонитом, кальцитом, браунитом.

Химический состав фриделита показан в таблице 32. В составе фриделита присутствуют примеси магния и кальция. Суммарно они достигают до 2 масс. %.

Таблица 32

Химический состав фриделита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 37,91 | 38,59 | 38,19 | 38,70 | 38,76 | 38,41 | 38,51 |
| MnO | 57,84 | 57,78 | 57,88 | 57,70 | 57,82 | 58,09 | 57,93 |
| MgO | 1,33 | 1,15 | 1,16 | 1,01 | 0,96 | 1,18 | 1,36 |
| CaO | 0,23 | 0,34 | 0,25 | 0,45 | 0,56 | 0,55 | 0,37 |
| Cl | 2,79 | 2,24 | 2,52 | 2,14 | 1,90 | 1,77 | 1,83 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | |
| Si | 5,98 | 6,02 | 6,00 | 6,04 | 6,05 | 5,99 | 6,00 |
| Сумма | 5,98 | 6,02 | 6,00 | 6,04 | 6,05 | 5,99 | 6,00 |
| Mn | 7,72 | 7,65 | 7,69 | 7,64 | 7,65 | 7,67 | 7,65 |
| Mg | 0,26 | 0,27 | 0,27 | 0,24 | 0,22 | 0,27 | 0,29 |
| Ca | 0,04 | 0,06 | 0,04 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,06 |
| Сумма | 8,02 | 7,98 | 8,00 | 7,96 | 7,95 | 8,01 | 8,00 |
| Cl | 0,75 | 0,53 | 0,64 | 0,55 | 0,50 | 0,47 | 0,48 |
| OH | 10,71 | 10,62 | 10,61 | 10,67 | 10,58 | 10,45 | 10,58 |
| Сумма | 11,46 | 11,16 | 11,26 | 11,22 | 11,08 | 10,92 | 11,08 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

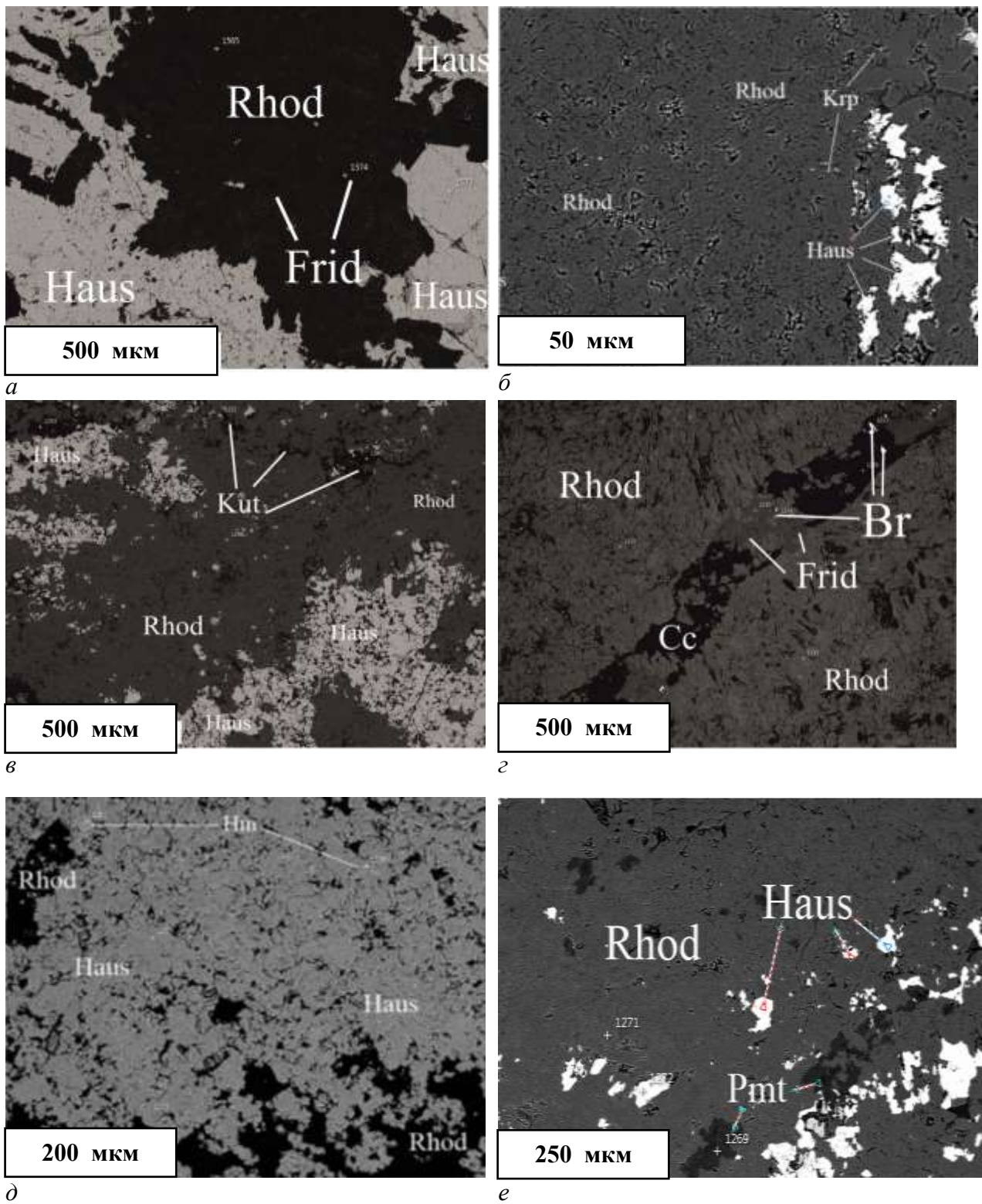


Рис. 23. Второстепенные минералы гаусманитовых руд. а - фриделит в родоните, б - морфология выделений кариопилита в родоните, в – кутнагорит с гаусманитом и родонитом, г - зерна браунита во фриделите, д - зерна гематита в гаусманите, е - морфология выделений пьемонтита. Фотографии шлифов в обратно-рассеянных электронах.

Кариопилит $Mn_5(Si_4O_{10})(OH)_6$

Кариопилит – водосодержащий силикат марганца слоистой структуры. Часть исследователей на основании данных порошковой дифрактометрии и электронографии относят кариопилит к группе серпентина и рассматривают его как марганцевый аналог антигорита. Более детальные анализы с использованием комплекса методов, в том числе высокоразрешающей трансмиссионной электронной микроскопии, показали, что его кристаллическая структура имеет много общего со структурой серпентинитов, но тем не менее она характеризуется и яркими индивидуальными особенностями, кариопилит не является полным аналогом антигорита (Брусницын, 2014).

Наличие у кариопилита серпентиноподобной структуры нашло свое отражение и в написании идеальной кристаллохимической формулы минерала. Первоначально кариопилиту приписывалась формула $Mn_3(Si_2O_5)(OH)_4$. Однако сразу подчеркивалось, что в реальных составах устанавливаются избыток атомов кремния и дефицит октаэдрических катионов (Mn, Fe и Mg) до 0.20 и 0.35 к.ф. соответственно. Это обстоятельство, так же как и в случае с антигоритом, объясняется несоразмерностью октаэдрических слоев, заполненных крупными катионами Mn^{2+} и кремнекислородных сеток, в результате чего двуслойные пакеты волнообразно изгибаются, тетраэдры периодически меняют свою ориентировку, а в точках инверсии в октаэдрическом слое появляются вакансии. С учетом этого позднее были предложены другие варианты теоретической формулы кариопилита: $Mn_8(Si_6O_{15})(OH)_{10}$ (Peacor, Essen, 1980), $Mn_4(Si_5O_{11})(OH)_6$ (Abrecht, 1989), $Mn_{5.2}(Si_{4.4}O_{10})(OH)_8$ (Huebner e. a., 1992) и $Mn_5(Si_4O_{10})(OH)_6$ (Брусницын, 2014).

Полученные материалы и их сопоставление с литературными данными показывают, что последний вариант наиболее приемлемый.

Кариопилит в гаусманитовых рудах встречается довольно редко. Самостоятельно или совместно с тефроитом он слагает тонкие (до 50 мкм мощностью) прослои, линзы или обособления с неправильными очертаниями (рис. 22, г).

Химический состав кариопилита представлен в табл. 31. Все анализы удовлетворительно пересчитываются на предложенную выше кристаллохимическую формулу минерала – $Mn_5(Si_4O_{10})(OH)_6$ - при условии, что в составе минерала марганец и железо находятся в двухвалентной форме. В составе кариопилита, как правило, устанавливаются примеси алюминия, магния, кальция железа, бария.

Таблица 31

Химический состав карнопилита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 39,51 | 40,61 | 39,65 | 41,16 |
| Al ₂ O ₃ | 0,95 | 0,57 | 1,37 | 0,28 |
| MnO | 56,64 | 55,68 | 56,22 | 56,82 |
| MgO | 0,78 | 1,40 | 1,10 | 1,11 |
| FeO | 1,39 | 0,77 | 1,17 | 0,00 |
| CaO | 0,73 | 0,00 | 0,49 | 0,63 |
| BaO | 0,00 | 0,97 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | |
| Si | 3,88 | 3,99 | 3,88 | 4,03 |
| Al | 0,11 | 0,06 | 0,15 | 0,03 |
| Сумма | 3,99 | 4,05 | 4,03 | 4,06 |
| Mn ²⁺ | 4,71 | 4,64 | 4,66 | 4,71 |
| Mg | 0,11 | 0,21 | 0,16 | 0,16 |
| Fe ²⁺ | 0,11 | 0,06 | 0,10 | 0,00 |
| Ca | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0,07 |
| Ba | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 5,01 | 4,95 | 4,97 | 4,94 |
| ОН | 8,93 | 9,03 | 8,97 | 9,04 |

Примечание. В таблице микрозондовые анализы нормализованы к 100%.

Кутнагорит (Ca,Mn)(CO₃)

Кутнагорит широко развит в породе. В отличие от кальцита, кутнагорит не образует зернистых масс, а слагает поздние прожилки в гаусманитовых рудах (рис. 23, а). Ширина прожилков, сложенных кутнагоритом достигает 0.1 мм.

Кутнагорит, как и другие карбонаты, в проходящем свете бесцветен. При совмещении Ng с Р появляется резкая шагрень, создающая впечатление серого цвета. Зерна имеют очень сильное двупреломление – до перламутровых цветов интерференции.

В химическом составе кутнагорита установлены широкие вариации содержания кальция и марганца (табл. 29). Примеси магния, стронция и других элементов ниже предела обнаружения микрозондовым методом.

Таблица 29

Химический состав кутнагорита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MnO | 73,99 | 79,23 | 77,79 | 76,46 | 79,79 | 65,77 | 63,96 |
| CaO | 26,01 | 20,77 | 22,21 | 23,54 | 20,21 | 34,23 | 36,04 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Миналы, % | | | | | | | |
| MnCO ₃ | 69 | 66 | 73 | 72 | 75 | 61 | 69 |
| CaCO ₃ | 31 | 34 | 27 | 28 | 25 | 39 | 31 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Браунит $Mn^{2+}Mn^{3+}_6(SiO_4)O_8$

Браунит - в гаусманитовых рудах представлен локально. Он образует мелкие зерна во фрелелите, который в свою очередь заполняет трещины в породе. (рис. 21, б).

Химический состав браунита представлен в табл. 30. Элементами примесями в брауните гаусманитовых руд являются алюминий, железо и кальций.

Таблица 30

Химический состав браунита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 |
|--------------------------------|--------|--------|
| SiO ₂ | 10,53 | 10,46 |
| Al ₂ O ₃ | 0,33 | 0,33 |
| MnO | 84,06 | 87,06 |
| FeO | 3,60 | 1,36 |
| CaO | 1,48 | 0,79 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | |
| Si | 0,97 | 0,96 |
| Al | 0,03 | 0,04 |
| Сумма | 1,00 | 1,00 |
| Mn ³⁺ | 5,92 | 5,96 |
| Mn ²⁺ | 0,65 | 0,84 |
| Fe | 0,28 | 0,11 |
| Ca | 0,15 | 0,09 |
| Сумма | 7,00 | 7,00 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Гематит Fe₂O₃

Гематит относится к редким для месторождения Жомарт минералам.

В породе он ассоциирует либо с родонитом и гаусманитом. Минерал обычно представлены мелкими (в среднем 0.01–0.02 мм в поперечнике) изометричными, образующими небольшие скопления в гаусманите (рис.23, д).

Микрозондовые анализы и рассчитанные на их основе коэффициенты в кристаллохимических формулах (к.ф.) минералов представлены в табл. 33.

Таблица 33

Химический состав гематита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 |
|--------------------------------|--------|--------|
| SiO ₂ | 0,38 | 0,35 |
| TiO ₂ | 0,31 | 0,38 |
| Sb ₂ O ₃ | 0,42 | 0,46 |
| FeO ^{общ} | 83,14 | 95,14 |
| MnO | 15,75 | 3,36 |
| SrO | 0,00 | 0,31 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | |
| Si | 0,00 | 0,00 |
| Ti | 0,00 | 0,00 |
| Sb | 0,00 | 0,00 |
| Fe ³⁺ | 1,83 | 1,97 |
| Mn | 0,17 | 0,03 |
| Sr | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 2,00 | 2,00 |
| O | 2,73 | 2,93 |

Примечание. В таблице микрозондовые анализы нормализованы к 100%.

Пьемонтит Ca₂Mn³⁺Al₂(SiO₄)(Si₂O₇)O(OH)

Данный марганцевым минералом из группы эпидота в гаусманитовых рудах имеет аналогичные морфологические признаки, как и в гаусманитовых рудах.

Минерал представлен однородной тонкозернистой массой (рис.23, е) в ассоциации с родонитом и гаусманитом.

Пьемонтит имеет насыщенную малиновую окраску и специфические цвета плеохроизма: от яркого кроваво-малинового, через фиолетовый до лимонно-желтого из-за

наличия трехвалентного марганца. По таким чрезвычайно броским оптическим характеристикам марганцевые минералы группы эпидота легко узнаются в образцах и шлифах, даже если присутствуют в них в виде мелких зерен.

Химический состав пьомонтита из гаусманитовых руд немного иной, чем в браунитовых. В нем присутствуют такие редкие элементы-примеси, как титан и хлор (табл. 34).

Таблица 34

Химический состав пьомонтита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 36,49 | 36,63 | 36,16 | 36,35 | 36,51 | 36,20 | 36,72 | 37,04 |
| TiO ₂ | 0,00 | 1,02 | 0,40 | 0,35 | 0,00 | 0,46 | 0,33 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 16,45 | 7,27 | 17,26 | 17,16 | 19,57 | 18,05 | 19,16 | 19,57 |
| FeO ^{общ} | 5,33 | 16,78 | 4,10 | 3,97 | 1,74 | 3,33 | 2,32 | 1,69 |
| MnO ^{общ} | 31,44 | 10,92 | 32,89 | 32,63 | 30,04 | 33,90 | 26,80 | 27,89 |
| MgO | 0,19 | 0,24 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| CaO | 10,10 | 27,14 | 9,19 | 9,54 | 11,72 | 8,06 | 14,67 | 13,81 |
| Cl | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,42 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | | | | | |
| Si | 2,85 | 2,60 | 2,85 | 2,87 | 2,91 | 2,87 | 2,88 | 2,92 |
| Al | 0,15 | 0,40 | 0,15 | 0,13 | 0,09 | 0,13 | 0,12 | 0,08 |
| Сумма | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| Ti | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,00 |
| Al | 1,36 | 0,21 | 1,46 | 1,47 | 1,75 | 1,56 | 1,65 | 1,74 |
| Fe ³⁺ | 0,70 | 1,99 | 0,54 | 0,52 | 0,23 | 0,44 | 0,30 | 0,22 |
| Mn ³⁺ | 1,09 | 0,66 | 1,11 | 1,10 | 1,11 | 1,07 | 1,17 | 1,14 |
| Сумма | 3,15 | 2,91 | 3,13 | 3,11 | 3,09 | 3,10 | 3,14 | 3,10 |
| Mn ²⁺ | 0,99 | 0,00 | 1,09 | 1,08 | 0,91 | 1,21 | 0,63 | 0,72 |
| Mg | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ca | 0,84 | 2,06 | 0,78 | 0,81 | 1,00 | 0,69 | 1,23 | 1,18 |
| Сумма | 1,85 | 2,09 | 1,87 | 1,89 | 1,91 | 1,90 | 1,86 | 1,90 |
| Cl | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ОН | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,94 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Сумма | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

3.2.3. Акцессорные минералы

Саркинит $Mn_2(AsO_4)(OH)$

Саркинит является единственным представителем класса арсенатов на месторождении Жомарт.

Он представлен скрытокристаллической массой, заполняющей трещины, пустоты в гаусманите и родоните (рис 24, а, б). В шлифе даже при маленьком увеличении его можно обнаружить благодаря его жёлтому цвету на фоне изотропных гаусманитовых руд.

Типичными примесями саркинита гаусманитовых руд являются кремний и кальций. Содержание элементов-примесей не больше 2 масс. %. Химический анализ саркинита из гаусманитовых представлен в таблице 35.

Таблица 35

Химический состав саркинита (масс. %)

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| As ₂ O ₅ | 44,38 | 43,64 | 40,51 | 46,00 |
| SiO ₂ | 0,87 | 0,53 | 0,55 | 0,00 |
| MnO | 53,61 | 54,86 | 58,38 | 53,27 |
| CaO | 1,14 | 0,97 | 0,56 | 0,73 |
| Сумма | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | | | | |
| As | 1,08 | 1,07 | 0,98 | 1,14 |
| Si | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,00 |
| Сумма | 1,12 | 1,09 | 1,00 | 1,12 |
| Mn | 1,83 | 1,87 | 1,98 | 1,83 |
| Ca | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 0,03 |
| Сумма | 1,88 | 1,91 | 2,00 | 1,83 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

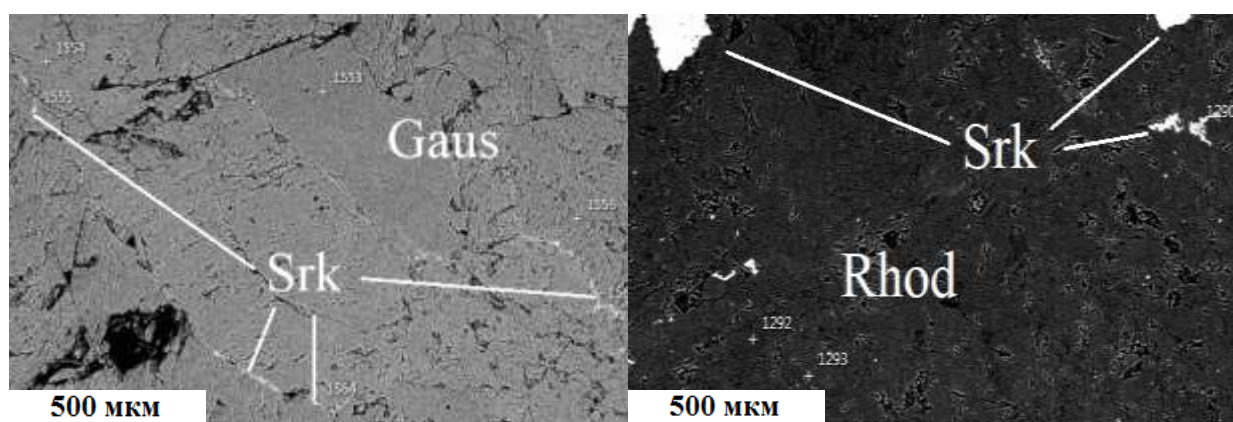


Рис. 24. Морфология саркинита: а – выполнение саркинитом трещинок в гаусманите, б – саркинит в родоните. Фотографии шлифов в обратно-рассеянных электронах.

Пиробелонит $PbMn(VO_4)(OH)$

Пиробелонит является единственным представителем семейства ванадатов на месторождении Жомарт. Часто зерна настолько маленькие, что определить чистый состав этого минерала сложно.

Пиробелонит является поздним минералом и заполняет трещины, пустоты в гаусманите (рис. 25).

Следует отметить, что пиробелонит на месторождении Жомарт раньше не был обнаружен.

Примесным элементом в пиробелоните является лишь кальций. Химический анализ коронандита из марганцевых пород представлен в таблице 36.

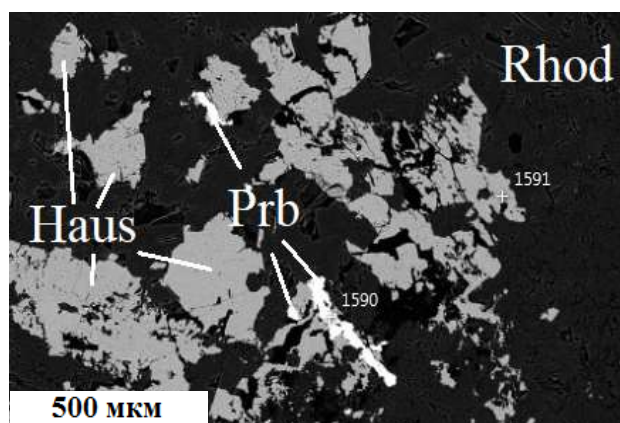


Рис. 25. Пиробелонит с гаусманитом и родонитом. Фотография шлифа в обратно-рассеянных электронах.

Таблица 36

Химический состав пиробелонита
(масс. %)

| | |
|------------------------|--------|
| Компонент | 1 |
| V_2O_5 | 22,32 |
| As_2O_5 | 1,26 |
| MnO | 19,50 |
| CaO | 0,23 |
| PbO | 56,69 |
| Сумма | 100,00 |
| Коэффициенты в формуле | |
| V | 0,93 |
| As | 0,05 |
| Сумма | 0,98 |
| Mn | 1,04 |
| Ca | 0,02 |
| Pb | 0,96 |
| Сумма | 2,02 |
| O | 4,47 |

Примечание. В таблице микронзондовые анализы нормализованы к 100%.

Глава 4. Последовательность минералообразования

В последовательности процесса минералообразования на месторождении Жомарт можно выделить три стадии минерализации, в течение которых сформировались выделенные минеральные ассоциации для каждого типа руд.

Всего в рудах диагностировано более 25 минералов. На первой стадии происходило отложение рудных минералов в ассоциации карбонатами; на второй стадии формировались силикаты марганца. Минералы III стадии заполняют трещины пустоты, каверны в породе. Рассмотрим подробно эти стадии отдельно для браунитовых и гаусманитовых руд.

В течение I стадии браунитовых руд были сформированы две взаимосвязанные минеральные ассоциации: рудная и вмещающих пород. Типоморфным минералом ранней, а именно рудной, ассоциации для браунитовых руд является, собственно браунит. Данная ассоциация, несомненно, является самой ранней и развита повсеместно. Вторая ассоциация - ассоциация вмещающих пород по распространенности и количеству является ведущей для ранней стадии, развита она также повсеместно. Для браунитовых руд она представлена кварцем, кальцитом и калиевым полевым шпатом (рис.26, а).

Во II стадию сформировались минералы, являющиеся вторичными минералами по основным породам, происходит замещение минералов, образовавшихся в I стадии силикатами. Ее типоморфными минералами для браунитовых руд являются минералы группы амфибола, альбит, пьомонтит, эгирин, кентролит.

В III стадию происходит заполнение трещин, прожилков минералами последней ассоциации. Эти минералы представлены для браунитовых руд марганцевыми оксидами калия, свинца и бария: криптомелан, коронадит, голландит, соответственно, они заполняют трещины, прожилки, пустоты в ранее образовавшихся минералах (рис.26, а, б).

I стадия гаусманитовых руд представлена главным породообразующим минералом – гаусманитом первой генерации. Характер нахождения рудного вещества в породе согласный

В ходе II стадии были сформированы такие минералы, как родонит, тефроит. Гаусманит обычно находится в тесных взаимоотношениях с этими минералами (рис. 26, г). Вместе эти минералы слагают линзовидные или неправильные по форме микрозернистые обособления во вмещающей породе. Иногда в породах заметно замещение гаусманита фриделитом (рис. 26, д).

В III стадию происходило заполнение трещин, прожилков минералами последней ассоциации. Для гаусманитовых руд минералами этой стадии являются такие минералы как кутнагорит, фриделит, саркинит, пиробелонит, барит, гаусманит-II, браунит (рис. 26, е).

Выделения трех стадий основано на взаимоотношениях минералов в породе в каждом отдельном типе руд и не значит, что минералы одной стадии, но из разных руд образовывались одновременно.

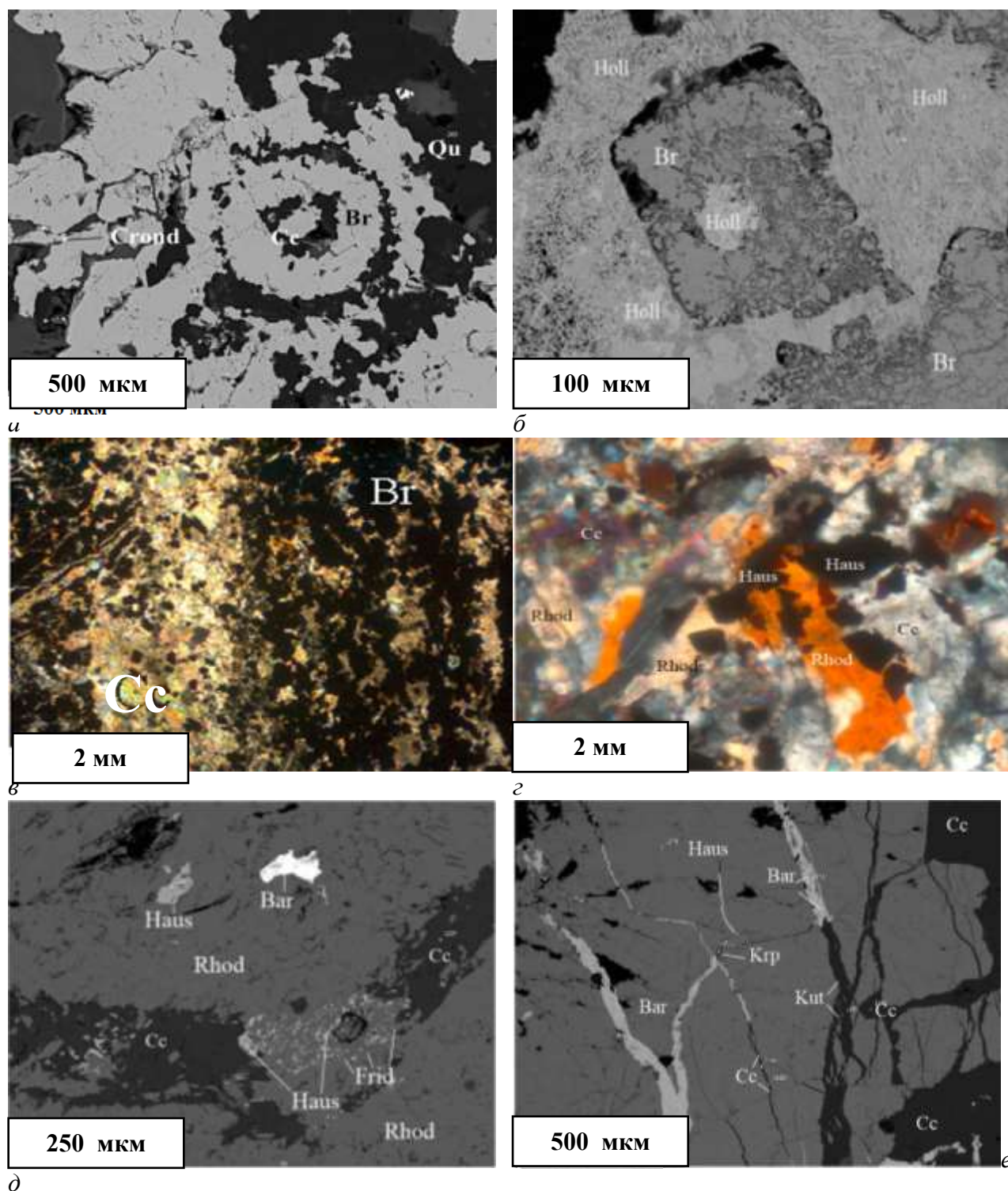


Рис. 26. а - взаимоотношения кальцита с браунитом; б – замещение голландитом браунита, в - взаимоотношения кальцита с браунитом; г - взаимоотношения родонита и гаусманита; д - взаимоотношения минералов разных генераций гаусманитовых руд; е – наполнение трещин в гаусманите. Фотографии шлифов: в, г - изображения в проходящем свете в скрещенных николях, а, б, д, е - изображения в обратно-рассеянных электронах.

Заключение

В ходе проведенного исследования, было диагностировано более 25 минералов, многие из которых впервые обнаружены на данном месторождении, были диагностированы главные и второстепенные минералы. Для браунитовых руд главными минералами являются браунит, кварц, кальцит, второстепенными - амфибол, эгирин, альбит, барит, акцессорные минералы в браунитовых рудах представлены криптомеланом, коронадитом и голландитом. Для гаусманитовых руд главными минералами являются гаусманит, родонит, тефроит, второстепенные минералы представлены фриделитом, баритом, гаусманитом-II. Саркинит и пиробелонит являются акцессорными минералами для гаусманитовых руд.

Так же были изучены вариации химического состава карбонатов и определена последовательность минералообразования.

Породы месторождения Жомарт, изученные ранее в 70-х годах XX века, описаны кратко. Сейчас, благодаря современным методам исследования вещества, уточнены минеральные виды некоторых силикатов, описан новый тип пород, диагностированы новые минералы.

Сейчас на месторождении добыча марганцевых руд не идет и подробное изучение пород месторождения Жомарт позволит подобрать правильную технологию обогащения для этих руд. Особого внимания заслуживают акцессорные минералы, так как они важны для выбора технологии обогащения руд, потому что они растворяются хуже, чем породобразующие карбонаты. Всего акцессорные минералы составляют около 10% от объема породы.

Литература

Монографии:

1. Брусницын А. И. Минералогия марганцевоносных метаосадков Южного Урала. СПб.: С.-Петербург. гос. ун-т, 2013, 160 с.
2. Каюпова М.М. Минералогия железных и марганцевых руд западного Атасу. Астана, 1974, 229 с.
3. Каюпова М.М., Митряева Н.М. К минералогии Атасуйских месторождений// Изв. АН КазССР, 1968, сер.геол., №1, стр. 47-57.
4. Кривовичев В.Г. Минералогический словарь. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2008, 556 с.
5. Кривовичев В.Г., Чарыкова М.В. Классификация минеральных систем. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2013, 196 с.

Статьи в сборниках:

1. Брусницын А. И., Перова Е.Н., Верещагин О.С., Летникова Е.Ф., Школьник С.И., Иванов А.В. Стратиформные свинцово-цинковые, баритовые и железо-марганцевые руды Жайремского рудного узла (Центральный Казахстан): условия залегания, состав, генезис // Металлогения древних и современных океанов - 2017. Миасс: ИМин УрО РАН, 2017. С.90-93.

Ресурсы сети Интернет:

1. <https://www.mindat.org/>
2. <http://www.mindat.ru/>
3. <http://www.minsoc.ru/>
4. <https://www.mineralienatlas.de/>