**ФОСФИДНО-СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД ТРАНСИОРДАНСКОГО ПЛАТО**

**Хмельницкая М. О.1, Верещагин О. С.1, Власенко Н.С.1, Шиловских В.В.1, Мурашко М.Н.1, Бритвин С.Н.1**

***1Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург***

Минералы группы фосфидов характерны для железных и железокаменных метеоритов [4], однако лишь недавно были обнаружены в породах заведомо земного происхождения [2]. Детальные минералогические исследования пирометаморфических пород формации Хатрурим позволили открыть серию новых фосфидов [2,3] и фосфатов [1]. Целью настоящей работы является получение новой информации о фосфидно-сульфидной минеральной ассоциации диопсидовых пород формации Хатрурим Трансиорданского плато и установление возможных условий их формирования.

Исследуемые диопсидовые породы обнаружены в ходе полевых работ 2012-2016 на контакте с породами формации Хатрурим. Контакт прослеживается по тонкой зоне высокотемпературных спурритовых брекчированных пород и продуктов их низкотемпературного изменения. Диопсидовые породы образуют вытянутое тело размером 200-300 на 20-30 м и сильно изменчивы в разрезе. В верхней часть разреза породы содержат значительное количество стекла и газовых пузырей и по облику напоминают вулканические шлаки. Ниже по склону облик пород существенно меняется: постепенно исчезает стекло и газовые пузыри, порода становится явно кристаллической, тонкозернистой. В нижней части склона исследуемые породы вскрыты небольшим карьером, который разрабатывался при добыче фосфоритов формации Хатрурим. В одной из стенок карьера найдены тонкие апофизы диопсидовых пород. В эндо- и экзоконтакте фиксируются крупные (размером до 0.5 см) скопления фосфидов.

Объектом исследования послужила коллекция из 12 образцов диопсидовых пород Трансиорданское плато, в которых хорошо визуально выделяются основная масса породы и жилы, рассекающие ее (Рис. 1, А). Минеральный состав основной массы породы и жил изучен с помощью порошкового дифрактометра Rigaku «Miniflex II» CoKα (2-theta: 5-85 град, скорость: 3 град/мин, шаг: 0.02 градуса). Химический состав акцессорных минералов изучен в напыленных углеродом плоско-полированных шлифах и шайбах с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-Max 2. Для идентификации отдельных зерен использованы картины дифракции отраженных электронов, полученные с помощью приставки AzTec HKL Channel 5 Advanced.

Установлено, что главными породообразующими минералами основной массы (Рис. 1, А) являются диопсид CaMg(Si2O6), тридимит SiO2 и кальцит CaCO3, которые формируют сплошную мелкозернистую массу. Жилы, секущие основную массу (Рис. 1, А) сложены крупными (размером до 1 см) кристаллами диопсида, растущими от краев к центру. Пространство между идиоморфными кристаллами диопсида преимущественно заполнено кальцитом и фосфато-силикатами.

Фосфиды встречаются как в краевой части жил (в сплошной массе), так и внутри кристаллов диопсида (Рис. 1, Б, Г). Были обнаружены следующие минералы класса фосфидов: баррингерит Fe2P, трансиорданит Ni2P, мурашкоит FeP, зуктамрурит FeP2 и халамишит Ni5P4. Также был обнаружен фосфидный аналог ((Ni,Fe)PS) минерала герсдорфит (NiAsS).

Баррингерит образует кристаллы размером от 2 до 250 мкм, встречается как в жилах, так и в основной массе породы. Образует сростки с мурашкоитом, добреелитом, сульфидами хрома и ванадия, апатитом и фосфатами кальция и железа. В качестве примеси присутствуют такие элементы, как хром (до 0.09 к.ф.), ванадий (до 0.03 к.ф.), молибден (до 0.03 к.ф.), кобальт (до 0.02 к.ф.) и сера (до 0.09 к.ф.). Образует полный изоморный ряд с трансиорданитом.

Трансиорданит образует кристаллы размером от 7 до 80 мкм. Встречается на границе жил и основной массы. Встречается в ассоциации с мурашкоитом, миллеритом и фосфатами кальция и железа. Примесными элементами являются кобальт (до 0.08 к.ф.) и сера (до 0.11 к.ф.).

В изоморфном ряду баррингерит-трансиорданит были обнаружены фосфиды с высоким содержанием молибдена (до 0.34 к.ф.). Возможно, это орищинит – минерал со структурным типом аллабогданита, в котором молибденит является стабилизатором структуры.

Мурашкоит формирует кристаллы размером от 3 до 150 мкм, которые встречаются в кристаллах диопсида и на границе жил и основной массы. Образует сростки с баррингеритом, зуктамруритом, трансиорданитом, троилитом/пирротином, добреелитом и фосфатами кальция и железа. В качестве примесей присутствуют никель (до 0.21 к.ф.), молибден (до 0.06 к.ф.), хром (до 0.05 к.ф.), ванадий (до 0.02 к.ф.), кобальт (до 0.02 к.ф.), титан (до 0.01 к.ф.), сера (до 0.23 к.ф.). Также из всех фосфидов только в мурашкоите наблюдается примесь мышьяка, и впервые в формации Хатрурим был обнаружен изоморфный ряд фосфидов-арсенидов.

Зуктамрурит формирует кристаллы размером от 5 до 40 мкм, встречается на границе жил и основной массы в ассоциации с мурашкоитом, халамишитом, троилитом/пирротином, фосфидным аналогом герсдорфита и силикато-фосфатами кальция и железа. В качестве примесных элементов присутствуют никель (от 0.02 до 0.06 к.ф.), кобальт (до 0.01 к.ф.) и сера (от 0.01 до 0.28 к.ф.).

Халамишит был обнаружен в единственном зерне размером 2 мкм. Располагается на границе жилы и основной массы. Находится в сростке с зуктамруритом в окружении силикато-фосфатов кальция и железа. В качестве примесей присутствуют железо (0.35 к.ф.) и кобальт (0.01 к.ф.). Халамишит был впервые обнаружен в породах Трансиорданского плато.

Фосфидный аналог герсдорфита образует кристаллы размером от 1 до 10 мкм. Располагается в краевой части жил в сростках с зуктамруритом, мурашкоитом и троилитом/пирротином. В качестве примесей редко встречаются хром, ванадий и кобальт, содержание каждого из которых не превышает 0.01 к.ф.

Сульфиды преимущественно встречаются внутри кристаллов диопсида (Рис. 1, Б, В). При рассечении кристалла диопсида более поздними жилами происходит замещение баррингерита мурашкоитом и, видимо, растворение/замещение сульфидов. В кристаллах диопсида идентифицированы пирротин / троилит, ольдгамит CaS и добреелит FeCr2S4. Помимо этого, в кристаллах диопсида были обнаружены разнообразные сульфиды ванадия, хрома, титана и меди, составы которых ранее не были описаны в природе. В мелкозернистых вмещающих породах обнаружен миллерит NiS.

Миллерит обнаружен в единственном зерне размером 5 мкм. Располагается в краевой части жилы в ассоциации с трансиорданитом и фосфатами кальция и железа. Примесными элементами являются железо (0.03 к.ф.) и медь (0.03 к.ф.).

Ольдгамит формирует кристаллы размером от 2 до 4 мкм. Образуют включения в кристаллах диопсида и находятся в сростках с троилитом/пирротином и флюоритом. Во всех зернах присутствуют примеси железа (до 0.03 к.ф.) и стронция (0.01 к.ф.).

Добреелит образует зерна размером 3-5 мкм и трещиноватые агрегаты. Зерна располагаются в кристаллах диопсида и ассоциируют с баррингеритом, троилитом/пирротином, сульфидами хрома и ванадия. Трещиноватые агрегаты расположены в жилах между крупными зернами баррингерита. В качестве примесей встречаются ванадий (до 0.30 к.ф.), титан (до 0.19 к.ф.), медь (до 0.19 к.ф.), цинк (до 0.09 к.ф.) и никель (до 0.01 к.ф.).

Сульфиды хрома, ванадия, титана и меди образуют зерна размером 1-10 мкм. Они образуют включения в кристаллах диопсида и находятся в ассоциации с баррингеритом, мурашкоитом, добреелитом и пирротином/троилитом.

*Работы выполнены на базе РЦ СПбГУ «Геомодель», «Центр микроскопии и микроанализа», «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Оптические и лазерные методы исследования вещества». Работа поддержана грантом РНФ 18-17-00079.*

**Литература**

1. Britvin S. N., Murashko, M. N., Vapnik, Y., Vlasenko, N. S., Krzhizhanovskaya, M. G., Vereshchagin, O. S., Bocharov, V. N., Lozhkin, M. S. Cyclophosphates, a new class of native phosphorus compounds, and some insights into prebiotic phosphorylation on early Earth // Geology. – 2021. – Т. 49. – №. 4. – С. 382-386.
2. Britvin S. N., Murashko M. N., Vapnik E., Polekhovsky Yu. S., Krivovichev S. V. Earth's Phosphides in Levant and insights into the source of Archean prebiotic phosphorus // Scientific reports. – 2015. – Т. 5. – №. 1. – С. 1-5.
3. Britvin S. N., Vereshchagin O. S., Shilovskikh V. V., Krzhizhanovskaya M. G., Gorelova L. A., Vlasenko N. S., Pakhomova A. S., Zaitsev A. N., Zolotarev A. A., Bykov M., Lozhkin M. S., Nestola F. Discovery of terrestrial allabogdanite (Fe,Ni)2P, and the effect of Ni and Mo substitution on the barringerite-allabogdanite high-pressure transition //American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials. – 2021. – Т. 106. – №. 6. – С. 944-952.
4. Papike, J. J., Ed. Planetary Materials (Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, WA, 1998), vol. 36.

**Подписи к рисункам**

Рисунок 1. Общий вид и минеральные ассоциации породы. А – схема зональности породы. Б – сросток сульфида хрома и титана с мурашкоитом в кристалле диопсида. В – включение ольдгамита, флюорита, троилита/пирротина и сульфида меди и бария в кристалле диопсида. Г – халамишит в сростке с зуктамруритом в фосфатно-силикатной массе на границе жилы и основной массы породы.

Примечание: Br – баррингерит, Di – диопсид, Mr – мурашкоит, Po – пирротин, Old – ольдгамит, Zk – зуктамрурит, Hal – халамишит, Hem – гематит, Fl – флюорит, Cr-Fe-Cu-Ba-S – сульфиды хрома, железа, меди и бария, Ca-P-Si-O – силикато-фосфат кальция, Ca-Fe-P-O-1,2 – фосфаты кальция и железа.