

Золотоносные жилы и прожилки, образовавшиеся на второй стадии, выполняют четыре системы сопряженных трещин: 1) северо-западные левые сдвиги (аз. пд.  $60^\circ \angle 80^\circ$ ), 2) близширотные правые сдвиги (аз. пд.  $0^\circ \angle 50^\circ$ ), 3) северо-западные отрывы (аз. пд.  $36^\circ \angle 60^\circ$ ) и 4) пологие сколы неустановленного кинематического типа (диаграмма в на рис.). С использованием метода М. В. Гзовского [1975] по ним реконструировано сбросо-сдвиговое поле палеонапряжений. Вероятно, формирование жил и прожилков происходило после прекращения активного стресса в период релаксации. Активным на дайковой и рудной стадиях, по-видимому, был западный граничный сдвиг, т. к. дайки и рудные тела концентрируются вблизи его восточного крыла.

### Литература

- Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.  
Знаменский С. Е., Косарев А. М., Знаменская Н. М., Тимофеев С. П., Шафигуллина Г. Т. Структурный контроль и геохимия рудоносных даек золото-порфирового месторождения Большой Каран (Южный Урал) // Геология. Известия Отделение наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2017. № 24. С. 39–46.  
Николаев П. Н. Методика статистического анализа трещин и реконструкции полей палеонапряжений // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1977. № 12. С 103–115.  
Sylvester G. Strike-slip faults // GSA Bulletin. 1988. Vol. 1000. № 11. P. 1666–1703.

**Е. Н. Кайгородова, П. М. Карташов, В. А. Петров**  
Институт геологии рудных месторождений,  
минералогии, петрографии и геохимии РАН, г. Москва  
katmsu@mail.ru

### Минералы надгруппы алуниита из зоны окисления золото-сульфидного месторождения Радужное (Кабардино-Балкария)

В зоне окисления золото-сульфидного месторождения Радужное в ходе полевых работ выявлены сульфаты надгруппы алуниита. Ключевое значение для членов надгруппы алуниита при диагностике до минерального вида имеет химический состав, что и определило задачу данной статьи – представить первые данные по составу минералов надгруппы алуниита из зоны окисления золото-сульфидного месторождения Радужное, которые отнесены к членам сложной системы твердых растворов бедантит-плюмбоярозит и кинторейт-плюмбоярозит. Химический состав минералов определен П. М. Карташовым на СЭМ JSM-5610LV (Япония), оснащенным рентгеновским энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) INCA-450 (Великобритания) в лаборатории кристаллохимии ИГЕМ РАН. Исследованный материал отобран в ходе полевых работ 2013–2015 гг. из обнажения выветрелых флюидно-эксплозивных брекчий в центральной части месторождения, состоящих из обломков вмещающих аргиллитов и окварцованных риолитов в кварцевом цементе.

Месторождение Радужное находится на высоте 1400–2500 м в горной части Республики Кабардино-Балкария на территории Черекского района, севернее с. Безенги на левом борту р. Черек Безенгийский. Месторождение расположено в пределах Северной Юрской депрессии в зоне раннеальпийской (киммерийской) тектономагматической активизации. Район месторождения сложен разновозрастными и пестрыми по составу комплексами пород, которые объединяются в два структурных этажа. Нижний этаж представлен кристаллическими сланцами, гнейсами, гранито-гнейсами и амфиболитами Гондарайского комплекса нижнего-среднего палеозоя, прорванными гранитоидами средне-позднепалеозойского возраста. Верхний этаж сложен осадочными образованиями нижней и средней юры, залегающими с резким угловым и стратиграфическим несогласием на породах фундамента и вмещающими вулканы хуламского комплекса. Рудная минерализация на месторождении пространственно связана с субвулканическими телами юрских калиевых риолитов и трахитов. Минерализация представлена вкрапленными сульфидными рудами в полигенных брекчиях, линзообразными телами массивных и густовкрапленных сульфидных руд, жилообразными, штокообразными и гнездообразными телами explosивно-гидротермальных брекчий и зонами кремнистых брекчий.

Мощность зоны окисления на месторождении составляет первые метры. Ранее указывалось присутствие в зоне окисления второстепенного ярозита [Коптюх и др., 1985], который, как показывают наши данные, является плумбоярозитом.

Минералы надгруппы алуниита являются характерным продуктом выветривания в зонах окисления некоторых гидротермальных полиметаллических и мышьяковых месторождений. Как правило, они встречаются в условиях аридного и семиаридного климата, например, на месторождениях Урала (Березовское), Казахстана (Кара-Оба, Гульшад, Джангабул), Чехии (Крупка). Надгруппа алуниита объединяет тригональные сульфаты, фосфаты и арсенаты с идеализированной общей формулой  $DG_3(ТO_4)_2X_6$ , где D –  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Pb^{2+}$ ; G –  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ; T –  $(SO_4)^{2-}$ ,  $(AsO_4)^{3-}$ ,  $(PO_4)^{3-}$ ,  $(SiO_4)^{4-}$ ; X –  $(OH)^-$  [Sejkora et al., 2009].

В зонах окисления образование сульфатов происходит за счет иона  $SO_4^{2-}$ , возникающего в результате окисления серы сульфидов [Белогуб и др., 2007]. Источником катионов, входящих в состав сульфатов, могут служить как сами окисляющиеся сульфиды, так и минералы вмещающих пород, подвергнутых воздействию сернокислотных вод. Вовлечение пирита в окисление способствует значительному росту кислотности и массовому выходу в раствор железа. Ярозит обычно занимает строго определенную позицию между подзоной выщелачивания и «железной шляпой», образуя собственный горизонт на месторождениях, преобразованных в аридных-семиаридных климатических условиях. Свинцовсодержащие минералы надгруппы алуниита-ярозита обнаруживаются в аналогичной геологической позиции на полиметаллических месторождениях, а также на колчеданных месторождениях, находящихся на начальном этапе окисления.

Обычно ярозит образуется при  $pH < 2.5$ . Обзор природных минералообразующих систем на испарительном барьере, из которых кристаллизуется ярозит, расширяет диапазон кислотности до значений  $pH 2.60–4.25$  [Long et al., 1992]. Столь низкие значения  $pH$  достигаются в непосредственной близости к окисляющемуся рудному телу в застойных гидродинамических условиях или при высокой скорости испарения.

Плюмбоярозит описан нами в зоне окисления выходящих на дневную поверхность сульфидных рудных тел. Минералы ряда плюмбоярозит-кинторейт образуют корочки и кристаллические массы, заполняющие полости растворения сульфидов в кварцевом цементе флюидно-эксплозивных брекчий. Минералы ряда плюмбоярозит-бедантит образуют плотные кристаллически-зернистые агрегаты в сростании с лимонитом, реже сростки ромбоэдрических кристаллов (рис. 1).

Изученные нами минералы содержат 14.84–33.46 мас. % PbO, 0.13–2.27 мас. % CuO, 0.0–7.68 мас. % As<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, до 4.47 мас. % K<sub>2</sub>O, до 23.9 мас. % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (кинторейт-плюмбоярозит). На рисунке 2 представлены соотношения главных катионов в позициях G и T, показывающие, что подавляющее большинство изученных образцов может быть отнесено к ряду плюмбоярозит-бедантит. Лишь два образца относятся к ряду плюмбоярозит-кинторейт.

Высокогорные условия в сочетании с аридным климатом и непосредственным выходом сульфидных рудных тел на поверхность способствовали высокой скорости испарения и понижению рН, что привело к образованию минералов надгруппы алунита в относительно маломощной зоне окисления сульфидных руд.

Существенные примеси Cu, Pb и As в минералах надгруппы алунита в зоне окисления сульфидных руд месторождения Радужное говорят о том, что эти минералы возникли при окислении сульфидных руд, а не синхронны рудоотложению. В этом случае высокая активность S<sup>2-</sup> и относительно низкая кислорода препятствовали бы вхождению халькофильных элементов в сульфаты [Пеков и др., 2012]. В пользу гипергенной природы алунита и ярозита свидетельствует и отсутствие этих минералов в экзоконтактной зоне неокисленных частей рудных тел месторождения.

Основным минералом сульфидных руд месторождения является пирит при подчиненном значении сфалерита, галенита и халькопирита. Арсенопирит является крайне редким. Таким образом, нахождение Pb-содержащих ярозитов в зоне окисления

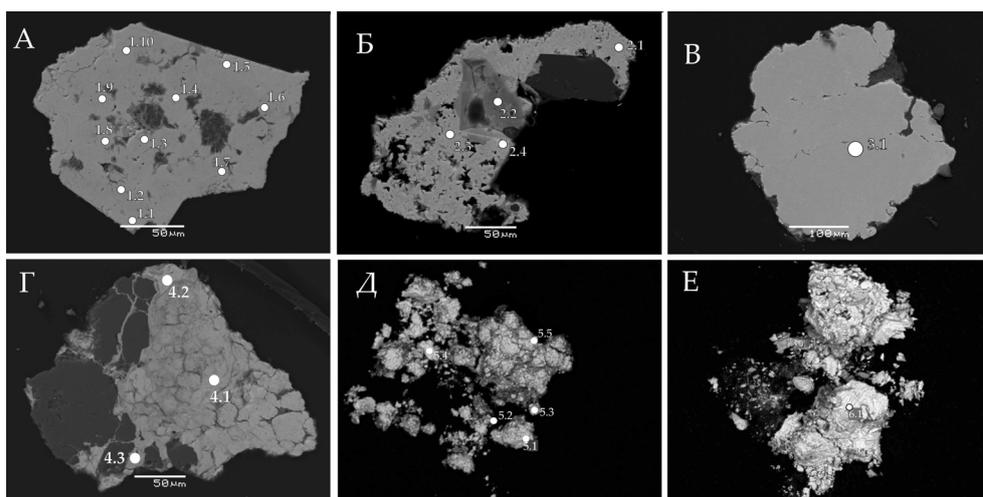


Рис. 1. Бедантит-плюмбоярозит (А, Б, В, Г), кинторейт-плюмбоярозит (Д, Е) из рудной брекчии окварцованных алевролитов на кварцевом цементе с сульфидами.

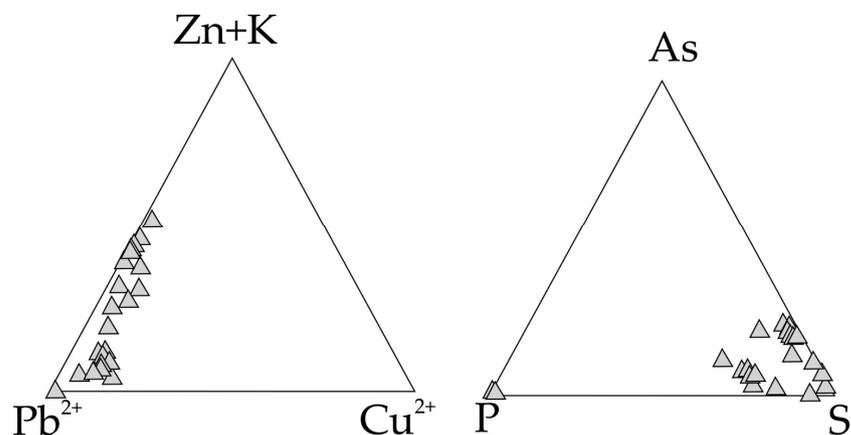


Рис. 2. Соотношения главных катионов, занимающих позицию G и T в минералах надгруппы алуниита месторождения Радужное.

месторождения Радужное может свидетельствовать, что поставщиком As являлся нестехиометрический пирит.

*Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.48П «Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения».*

### Литература

- Белогуб Е. В., Щербакова Е. П., Никандрова Н. К. Сульфаты Урала: распространенность, кристаллохимия, генезис. М.: Наука, 2007. 160 с.
- Коптюх Ю. М., Семенюк Н. П. и др. Отчет по хоздоговору № 3/82 «Изучение вулканизма и связи с ним процессов метасоматоза и оруденения в зонах активизации Кабардино-Балкарии». Киев, 1985.
- Пеков И. В., Лыкова И. С., Чуканов Н. В., Кабалов Ю. К., Зырянова Л. А. Минералы надгруппы алуниита из зоны окисления полиметаллических месторождений Рубцовского рудного района (Северо-Западный Алтай, Россия) // Записки РМО. 2012. № 3.
- Long D. T., Fegan N. E., McKee J. D. et al. Formation of alunite, jarosite and hydrous iron oxides in a hypersaline system: Lake Tyrell, Victoria, Australia // Chemical Geology. 1992. Vol. 96. P. 183–202.
- Sejkora J., Škovíra J., Čejka J., Plášil J. Cu-rich members of the beudantite-seginitite series from the Krupka ore district, the Krušné hory Mountains Czech Republic // Journal of Geosciences. 2009. № 54. P. 355–371.