

## МИНЕРАЛОГИЯ Cu, Pb, Bi В ЗОНЕ ОКИСЛЕНИЯ СВЕРДЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА (ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ)

© 2015 г. С. В. Прибавкин, Д. А. Замятин

Окисленные руды месторождений характеризуются разнообразным минеральным составом и по числу минералов обычно заметно превосходят первичные рудные ассоциации. Причины такой диспропорции между количеством первичных и вторичных минералов скрыты в особенностях физико-химической обстановки в зонах окисления рудных месторождений, которую отличают разнообразие кислородсодержащих анионов в гипергенных водах, активность гидратационных процессов, переменная роль окислительных и восстановительных факторов [4]. В данной работе рассматривается разнообразие вторичных минералов, возникающее при окислении золото-тетрадимит-айкинитовых руд на примере Свердловского месторождения золота, рудные тела которого вскоре могут быть окончательно потеряны для исследователей. Кроме того, описание минералов зоны окисления данного месторождения приводится впервые.

Свердловское месторождение золота расположено в городской черте Екатеринбурга. В настоящее время площадь месторождения частично занята городской инфраструктурой и жилыми кварталами. Тем не менее старые выработки, представленные канавами и оплывшими шурфами, остаются доступными для наблюдения, располагаясь на территории юго-западного городского лесопарка.

Площадь месторождения в геологическом отношении изучена крайне слабо. Это обусловлено тем, что поиски золота велись бессистемно, старательским способом до Второй мировой войны. Во время и после войны была проведена ревизия месторождения, показавшая его бесперспективность, несмотря на среднее содержание золота в отдельных отработываемых жилах 10–20 г/т [2].

Месторождение приурочено к южному контакту Свердловского гранитного массива с габбро и представляет собой серии золотоносных сульфидно-кварцевых жил. Особенностью в распространении жил является расположение их как в гранитах, так и в габбро сериями или кустами по 2 по 3 или по 5–6 жил и более. Наряду с нахождением жил в виде серий на территории месторождения, а также за его пределами встречаются и одиночные жилы, нередко обладающие значительным протяжением и большой мощностью. Всего

на месторождении выявлено свыше 50 кварцевых жил. Наибольшим распространением пользуются широтные с крутым падением жилы. Эти жилы обычно обладают небольшой длиной по простиранию (от 10–20 до 100 м), а их мощность крайне непостоянная: мощные раздувы в них внезапно сменяются пережимами. Максимальная мощность не превышает 1 м. В среднем мощность равна 0.4–0.5 м. Жилы постоянно сопровождаются сетью отходящих от них апофиз, а на концах расщепляются на отдельные прожилки. Метасоматические изменения околожилных пород слабо выражены и отнесены к образованиям березит-лиственитовой формации [2].

По вещественному составу среди жил месторождения выделены: кварцевые жилы с эпидотом (безрудные) и кварцевые жилы с сульфидами (рудные). Среди последних встречаются: 1) приуроченные к контакту гранитов с габбро продуктивные золотоносные жилы с повышенным содержанием и разнообразным набором сульфидов (пирит, халькопирит, галенит, блеклая руда, айкинит); 2) слабозолотоносные кварц-карбонатные жилы, почти не минерализованные сульфидами, приуроченные к габбро; 3) залегающие в габбро слабозолотоносные кварц-сульфидные жилы с крупными скоплениями халькопирита и редким пиритом (галенит, айкинит, блеклые руды не установлены); 4) наиболее распространенные кварцевые жилы слабоминерализованные сульфидами, главным образом пиритом, залегающие в гранитах.

Зона окисления руд месторождения, согласно геолого-поисковым работам П.И. Кутюхина (1942), имеет небольшую глубину – 1–2 м. На глубине 7–10 м сульфиды лишь в слабой степени затронуты процессами окисления. Из вторичных минералов, связанных своим происхождением с экзогенными процессами, установлены: ковелин, халькозин, борнит, марказит, гетит, лимонит, малахит, азурит, церуссит, хризокolla, массикот, висмутовая охра.

Нами изучена минералогия кварцевой жилы, располагающейся в гранитах около контакта с габброидами. Простирание жилы широтное. Мощность менее 20 см. Околожилные метасоматические изменения гранитов выражены в мусковитизации при сохранении решетчатого микрокли-

на, что указывает на высокую активность калия в гидротермальной системе. По-видимому, данный тип метасоматитов сопоставим с фацией фенгитовых гумбеитов, широко развитой в соседнем Шарташском массиве [3]. Первичный минеральный состав кварцевой жилы, судя по отпечаткам в кварце, характерным псевдоморфозам и реликтам, а также ранее приведенным данным по месторождению, включает редкий карбонат, пирит, айкинит, тетрадимит ( $\text{Bi}_{1.99}\text{Te}_{2.02}\text{S}_{0.99}$ ), самородное золото, гематит. Выделения золота нами наблюдались в тесной связи с сульфидами, главным образом айкинитом (псевдоморфно-замещенным бисмутитом). Проба золота 860–920. Основная примесь – серебро; ртуть не обнаружена. Количество сульфидов не превышает процента, что определяет жилы как малосульфидные. Развитие мелкозернистого гематита по трещинам кварца и вмещающих рудное тело гранитов является характерной особенностью данной жилы, отличающей ее от большинства жил месторождения. По данным П.И. Кутюхина (1942 г.), развитие гематита отмечалось в слабоминерализованных сульфидами жилах четвертого типа.

При изучении образцов жильного кварца, отобранных из отвалов разведочных выработок, выявлен уникальный набор минералов развитой зоны окисления, представленный закономерно сменяющимися друг друга соединениями Bi, Pb, Cu. Диагностика минералов проведена на основании кристалломорфологических, химических и спектроскопических методов с использованием бинокля, сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой INCA Energy 450 X-Max 80, Раман-спектрометра Horiba LabRAM Evolution HR (съемка в диапазоне от 50 до 4000  $\text{cm}^{-1}$  на лазере 633нм) в ИГГ УрО РАН. Для определения последовательности отложения минералов использован парагенетический анализ и данные по стабильности комплексных соединений в координатах Eh–pH [6].

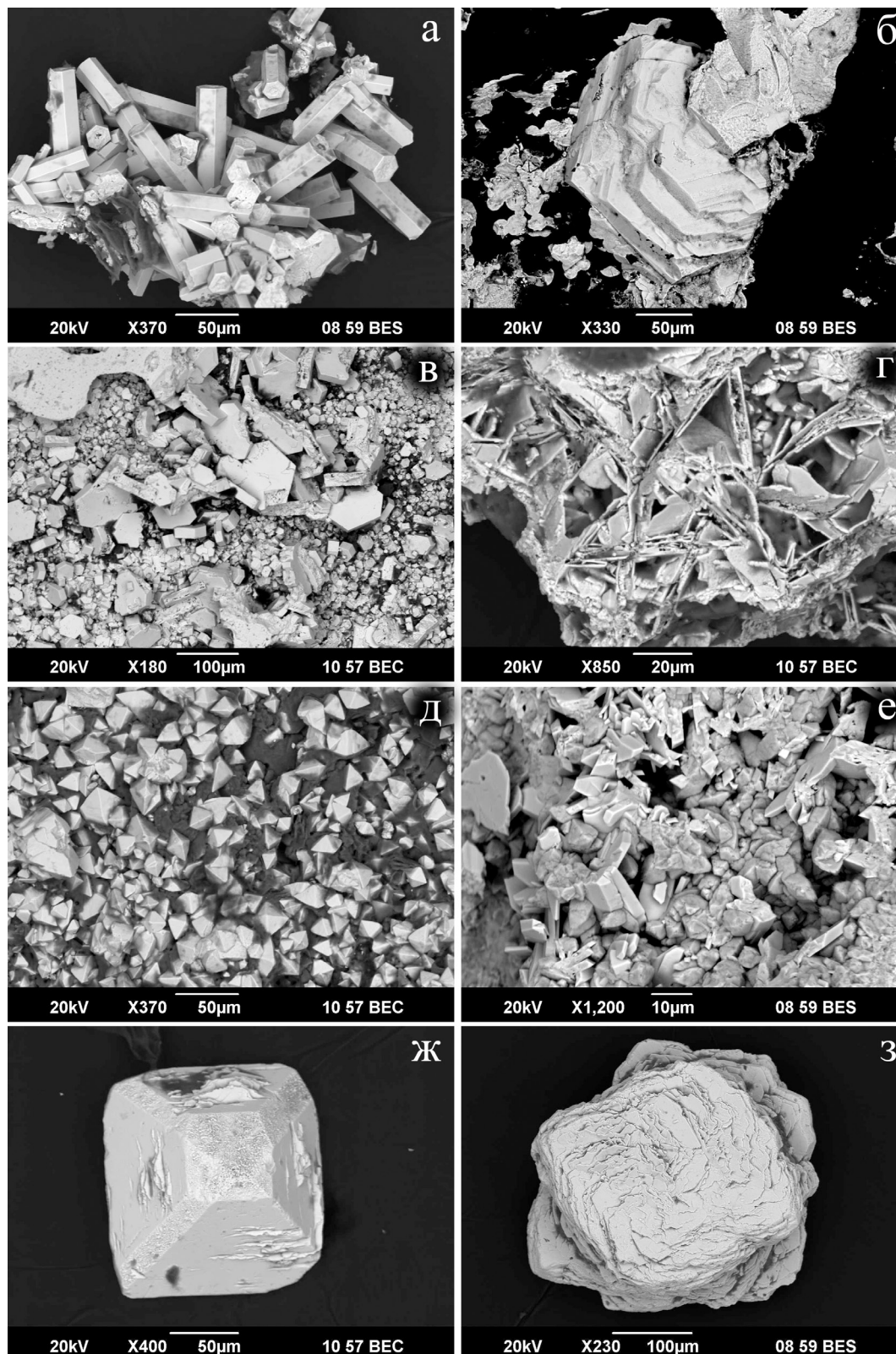
Наиболее ранним минералом зоны окисления (в нашей выборке), фиксирующим начальную стадию формирования окисленных руд в кислой или нейтральной среде, является карбонат Bi – *бисмутит*, замещающий айкинит в виде светло-желтых охр и концентрических агрегатов, что связано со слабой миграцией Bi, а также с легкостью гидролиза формирующихся в растворе его комплексных катионов. Бисмутит предшествует или сингенетичен фосфатам и теллуриатам Pb, Bi, среди которых доминирует *пироморфит* – его бесцветная или молочно-окраски кальциевая разность (рис. 1а). *Фосфат висмута*, близкий по составу петитжеаниту, установлен в виде реликтов в более позднем ванадате висмута и, по-видимому, является переходной фазой от оксикарбоната к ванадату висмута. Теллуросодержащие соли Bi образуют псевдо-

морфозы темно-зеленого цвета по тетрадимиту (рис. 1б) в ассоциации с кальцийсодержащим пироморфитом и бисмутитом. По составу они близки *монтаниту*. Однако их диагностика требует дополнительных исследований.

Появление комплексных соединений Cu, Pb с фосфором, ванадием и хромом связано с ощелачиванием растворов и поступлением в зону окисления ионов  $\text{V}^{5+}$  и  $\text{Cr}^{6+}$ , источником которых выступает кора выветривания габбро. На этой стадии отлагаются двойные соли Pb, Cu, Al, представленные зеленовато-черными пластинчатыми, клиновидными кристаллами *вокеленита* и замещающими их желтым *бушмакинитом*(?) (рис. 1г). Ранее бушмакинит был открыт на расположенном поблизости Березовском месторождении золота [1] и подтвержден в районе городка Кастельно-де-Брассак, Франция [5]. **Бушмакинит является чрезвычайно редким минералом зон окисления рудных месторождений.**

Со щелочной стадией связано отложение ванадатов, среди которых широко распространен *ванадинит*, кристаллизующийся в виде соломенно-желтых и оранжевых призматических кристаллов по трещинам в кварце или обрастающих и замещающих пироморфит. Повышение щелочности растворов приводит к смене ванадинита *моттрамитом*. Этот минерал образует тонкие пленки и кристаллические корочки, сложенные черными или темно-коричневыми ромбо-дипирамидальными кристаллами, нарастающими на ванадинит. Совместно с моттрамитом установлены желтовато-коричневые уплощенные кристаллы недиагностированного *Pb-содержащего ванадата Bi* (рис. 1е). Подчеркнем, что развитие ванадатов Bi является отличительной чертой описываемой зоны окисления. Так, воздействие ванадат-ионов на бисмутит приводит к образованию еще одного *ванадата Pb и Bi*, формирующего оранжевые или темно-красные бипирамидальные кристаллы (рис. 1ж) на незначительном удалении от частично растворенного оксикарбоната висмута. При низких концентрациях ионов  $\text{Pb}^{2+}$  или их отсутствии кристаллизуется другой ванадат Bi – *клинобисванит*, надежно диагностируемый данными рамановской спектроскопии. Его расщепленные таблитчатые кристаллы имеют коричневатокрасный цвет и локализируются в полостях выщелачивания бисмутита (рис. 1з). Для всех ванадатов поздней щелочной стадии: моттрамита, ванадатов Pb и Bi, клинобисванита, – характерны примеси хрома до 1.5 мас. %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , свидетельствующие о мобильности ионов  $\text{Cr}^{6+}$  в щелочных условиях и их едином источнике в зоне окисления с  $\text{V}^{5+}$ .

Помимо описанных фосфатов и ванадатов со щелочной стадией связано формирование *малахита*, редкость которого обусловлена низкими концентрациями ионов меди в зоне окисления. Так же



**Рис. 1.** Микрофотографии минералов в обратнорассеянных электронах (BSE).

а – друза кристаллов кальцийсодержащего пироморфита; б – псевдоморфоза монтанита(?) по тетрадимиту; в – ванадинит; г – псевдоморфозы бушмакинита(?) по пластинчатым кристаллам вокеленита; д – ромбодипирамидальные кристаллы моттрамита; е – моттрамит и таблитчатые кристаллы Pb-содержащего ванадата Bi; ж – кристалл ванадата Pb и Bi; з – клинобисмутит – расщепленный кристалл.

редко встречается силикат висмута – *бисмутоферрит(?)*, образующий чешуйчатые выделения, зафиксированные в качестве включений в некоторых кристаллах клинобисванита.

Предварительное исследование минералогии зоны окисления Свердловского золоторудного месторождения показало, что, несмотря на простой набор первичных рудных минералов (айкинит, тетрадимит, пирит), продукты их окисления представлены широким спектром минералов меди, свинца и висмута, относимых к классу карбонатов, фосфатов, теллуриатов, хроматов, силикатов, ванадатов. Минералы Bi представлены сменяющимися друг друга фазами: бисмутит – фосфат Bi – ванадаты Pb и Bi – клинобисванит, а минералы Pb и Cu рядами: пироморфит – ванадинит – моттрамит; вокеленит – бушмакинит. Интересна находка теллуриата висмута, образование которого требует высокого окислительного потенциала в зоне гипергенеза месторождения. Зона окисления интересна также тем, что в ней были достигнуты условия, при которых стало возможным образование редких минералов, определение которых требует дополнительных исследований.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-05-00576 и программы УрО РАН (проект № 15-18-5-24).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пеков И.В., Клейменов Д.А., Чуканов Н.В. и др.* Бушмакинит  $Pb_2Al(PO_4)(VO_4)(OH)$  – новый минерал группы бракебушита из зоны окисления Березовского золоторудного месторождения, Средний Урал // Записки ВМО, 2002. Т. 131, № 2. С. 62–71.
2. *Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Поленов Ю.А. и др.* Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона. Екатеринбург: УГГГА, 1997. 226 с.
3. *Спиридонов Э.М., Бакшеев И.А., Середкин М.В. и др.* Гумбеитовая формация Урала. М.: МГУ, 1997. 100 с.
4. *Яхонтова Л.К., Грудев А.П.* Минералогия окисленных руд: Справочное пособие. М.: Недра, 1987. 198 с.
5. *Lheur C., Meisser N.* Découverte de minéraux rares à Castelnau-de-Brassac (Tarn) // Le Règne Minéral. 2010. V. 91. P. 46.
6. *Takeno N.* Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases / Geol. Surv. Japan. 2005. Open File Report. No. 419. 285 p.