

УДК 553.43.071 (571.56)

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ FE-ОКСИДНЫХ-CU-AU (IOCG) РУД В БАЗАЛЬТАХ ХРЕБТА СЕТТЕ-ДАБАН (ВОСТОЧНАЯ ЯКУТИЯ)**Костин А.В.***ФГБУН «Институт геологии алмаза и благородных металлов» Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН), Якутск, e-mail: kostin@diamond.yzn.ru*

Проявления с Fe-оксидными-Cu-Au ± REE рудами – новое направление в рудной геологии Северо-Востока России. Одна из неизученных генетических разновидностей Fe-оксидных-Cu-Au (IOCG) руд, связанная с покровами базальтов, была обнаружена во время полевых работ 2013–2015 гг. в горном хребте Сетте-Дабан. Минеральный состав руд проявлений Джалкан, Росомаха и Хурат отличается простотой. В то же время для района в целом установлена закономерность, выраженная в увеличении степени сульфидности руд с запада на восток – самородная медь (Джалкан) → борнит (Росомаха) → халькопирит (Хурат). Руды содержат Fe > 20% и Cu от 0,02 до 18,2%. Важнейшей минералогической характеристикой руд проявлений Джалкан, Росомаха и Хурат являются разновидности самородного золота. Это позволило обосновать новый для Cu-базальтов хребта Сетте-Дабан Fe-оксидный-Cu-Au тип руд, известный в мире как Iron Oxide Copper Gold (IOCG).

Ключевые слова: Fe-оксидный-Cu-Au (IOCG), базальты, месторождения меди, золото, серебро, Восточная Якутия**MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF IRON-OXIDE-COPPER-GOLD (IOCG) ORES IN THE BASALTS OF THE SETTE-DABAN RIDGE (EASTERN YAKUTIA)****Kostin A.V.***Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (DPMGI SB RAS), Yakutsk, e-mail: kostin@diamond.yzn.ru*

Manifestations with Fe-oxide-Cu-Au ± REE ores is a new direction in ore geology at the Russian Northeast. During fieldwork of 2013-2015 in the Sette-Daban ridge, was detected one of the unexplored genetic varieties of Fe-oxide-Cu-Au (IOCG) ore, associated with the covers of basalts. The mineral composition of ore manifestations Jalcan, Rosomakha and Hurat is simple. At the same time, for the region as a whole was established a pattern, expressed in the increase of sulfides amount in ores from West to East, native copper (Jalcan) → bornite (Rosomakha) → chalcopyrite (Hurat). Ores contain Fe > 20%, Cu from 0,02 to 18,2%. The most important mineralogical characteristic of ores at Galkan, Wolverine and Hurt manifestations is varieties of native gold. This has allowed establishing a new for Cu-basalts of the Sette-Daban ridge Fe-oxide-Cu-Au ore type, also known as Iron Oxide Copper Gold (IOCG).

Keywords: Iron-oxide-copper-gold (IOCG), basalt, copper deposits, gold, silver, Eastern Yakutia

В статье рассматривается возможность открытия нового для Северо-Востока России геолого-промышленного типа месторождений, для которых принято название **Iron Oxide Copper Gold (IOCG) deposits** (Fe-оксидные-Cu-Au месторождения), ассоциирующих с проявлениями меденосных базальтов. Проявления меди широко распространены в Менкюленской минералогической зоне в девонских базальтах северного замыкания хребта Сетте-Дабан (Восточная Якутия). Ранее они рассматривались исключительно как медные с вкрапленной и прожилково-вкрапленной халькозин-борнитовой, реже с халькопиритом минерализацией, а основные перспективы зоны связывались только с медистыми песчаниками курпанджинского типа при подчиненном значении остальных генетических типов [3].

Fe-оксидные-Cu-Au (IOCG) руды являются комплексными и экономически привлекательными [7, 8], при этом не имеют

определенной связи с конкретными рудными формациями или типом продуктивного магматизма [5, 6, 9]. Это послужило поводом для исследования медных руд в базальтах хребта Сетте-Дабан и поиска новых ассоциирующих минеральных типов руд. Были установлены новые минеральные парагенезисы, содержащие кроме минералов меди значительное количество оксидов железа, самородные золото и серебро, показано, что в пределах покрова базальтов могут присутствовать участки, обогащенные как Fe-оксидной-Cu-Au, так и чисто медной минерализацией. В большинстве случаев Fe-оксидные руды связаны с лавами известково-щелочной серии, для толеитовой серии больше характерны сульфидные руды [2]. Целью данного исследования является выявление минералогических особенностей и типов комплексных Fe-оксидных-Cu-Au руд проявлений Джалкан, Росомаха и Хурат (рис. 1), локализованных в покровах девонских базальтов хребта Сетте-Дабан.

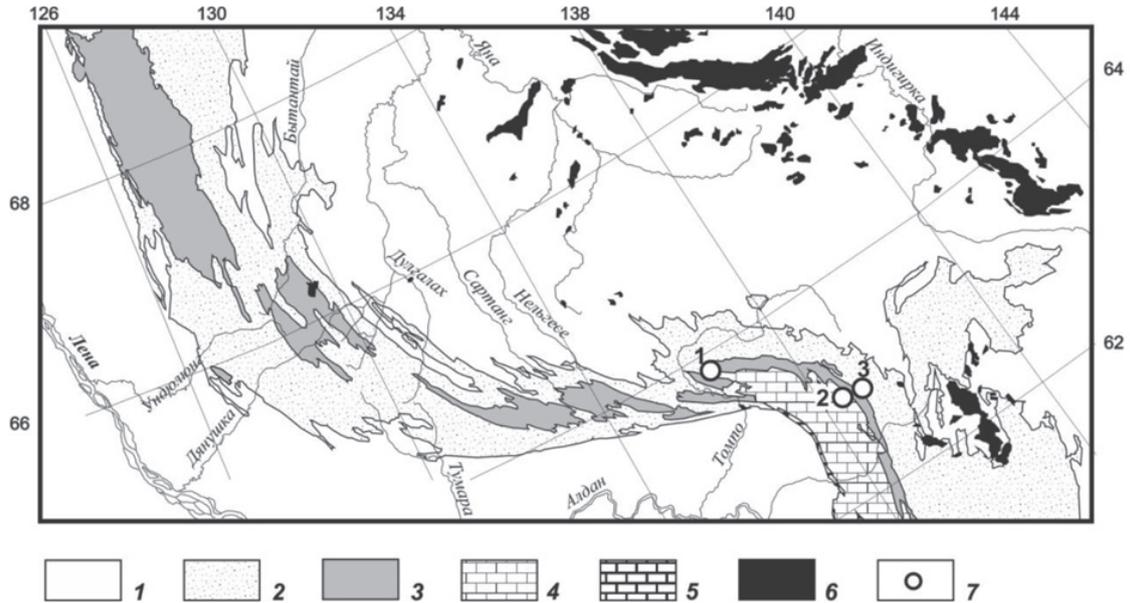


Рис. 1. Геологическая позиция проявлений Fe-оксидного-Cu-Au (IOCG) типа в базальтах: 1 – Триас-юра; 2 – Пермь; 3 – Карбон; 4 – Кембрий-девон; 5 – Протерозой; 6 – Интрузивы; 7 – Fe-оксидные-Cu-Au проявления в покровах базальтов (1 – Джалкан, 2 – Росомаха, 3 – Хурат)

Материалы и методы исследования

В северной части Сетте-Дабанского горст-антиклинория развиты вулканогенно-осадочные породы среднего-верхнего девона, которые залегают с несогласием на различных горизонтах силура и по В.А. Ян-жин-шину [4] включают до четырех вулканогенных пачек, в которых выделяется до семи покровов базальтов. В 2013 г. в покровах базальтов проявления Хурат был обнаружен новый для Менкюленской минерагенической зоны Fe-оксидный-Cu-Au тип руд [2], что позволило пересмотреть перспективы медных проявлений хребта Сетте-Дабан. В период с 2014 по 2016 г. на проявлениях Джалкан, Росомаха и Хурат были проведены полевые работы, собраны и систематизированы минеральные типы руд. Исследования руд проводились в отделе физико-химических методов анализа ФГБУН ИГАБМ СО РАН. Содержания Fe и Cu определялись количественным химическим анализом и заверялись атомно-эмиссионным – на PGS-2 с МАЭС. Содержания золота определялись атомно-абсорбционным анализом на спектрофотометре iCE 3000 Series AAS (табл. 1). Минераграфические исследования руд показали, что золото в рудах крайне мелкое и трудно диагностируемое, поэтому его поиск и изучение химического состава проводились на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480 LV.

Результаты исследования и их обсуждение

Минеральный состав руд проявлений Джалкан, Росомаха и Хурат отличается простотой. В то же время для района в целом

установлена закономерность, выраженная в увеличении степени сульфидности руд с запада на восток – самородная медь (Джалкан) → борнит (Росомаха) → халькопирит (Хурат). Самородное серебро – постоянный спутник всех типов медных руд, но важнейшей минералогической характеристикой руд проявлений Джалкан, Росомаха и Хурат являются разновидности самородного золота. Это позволило обосновать новый для Cu-базальтов хребта Сетте-Дабан Fe-оксидный-Cu-Au тип руд, известный в мире как Iron Oxide Copper Gold (IOCG) deposits.

Fe-оксидный + самородномедный тип руд (рис. 2) обнаружен в разных участках многостадийных покровов миндалекаменных базальтов проявления Джалкан. Миндалекаменные и гидротермально измененные прикровельные части базальтовых покровов несут богатую медную минерализацию, сопровождаемую гематитизацией, эпидотизацией, карбонатизацией и хлоритизацией с относительно равномерной вкрапленностью самородной меди. В центральных частях покровов встречаются вытянутые миндалины, заполненные сульфидами меди. Миндалины в базальтах мелкие и в основном округлой формы. Это свидетельствует об отсутствии движения

лавы при ее высокой подвижности, что возможно при заполнении лавой понижений в рельефе. Общая протяженность покрова порядка 15 км, мощность – около 200 м и включает до 9 потоков мощностью от 10–40 м. Прикровельная часть каждого из них сложена миндалекаменными породами, благоприятными для локализации меднорудной минерализации. Такое строение покрова дает основание предполагать наличие нескольких рудоносных горизонтов. Видимый вертикальный размах оруденения в бассейне руч. Джалкан более 500 м. Самородная медь образует как мелкую вкрапленность, так и крупные вкраплен-

ники, и прожилки. В период работ Аллах-Юньской геологоразведочной экспедиции в аллювии р. Джалкан были обнаружены самородки меди массой до 15 кг, в рудах отмечались примеси серебра и золота [М.Н. Засимов, 1984, фонды].

Главные рудные минералы: медь самородная, куприт; **второстепенные** – гетит, гематит, джерит, борнит, халькопирит, ковеллин; **редкие**: золото самородное, евгенит. Самородная медь – основной рудный минерал. Рассеянная вкрапленность меди встречается в измененных гетитизированных базальтах, в эпидотовых и кварцевых прожилках.

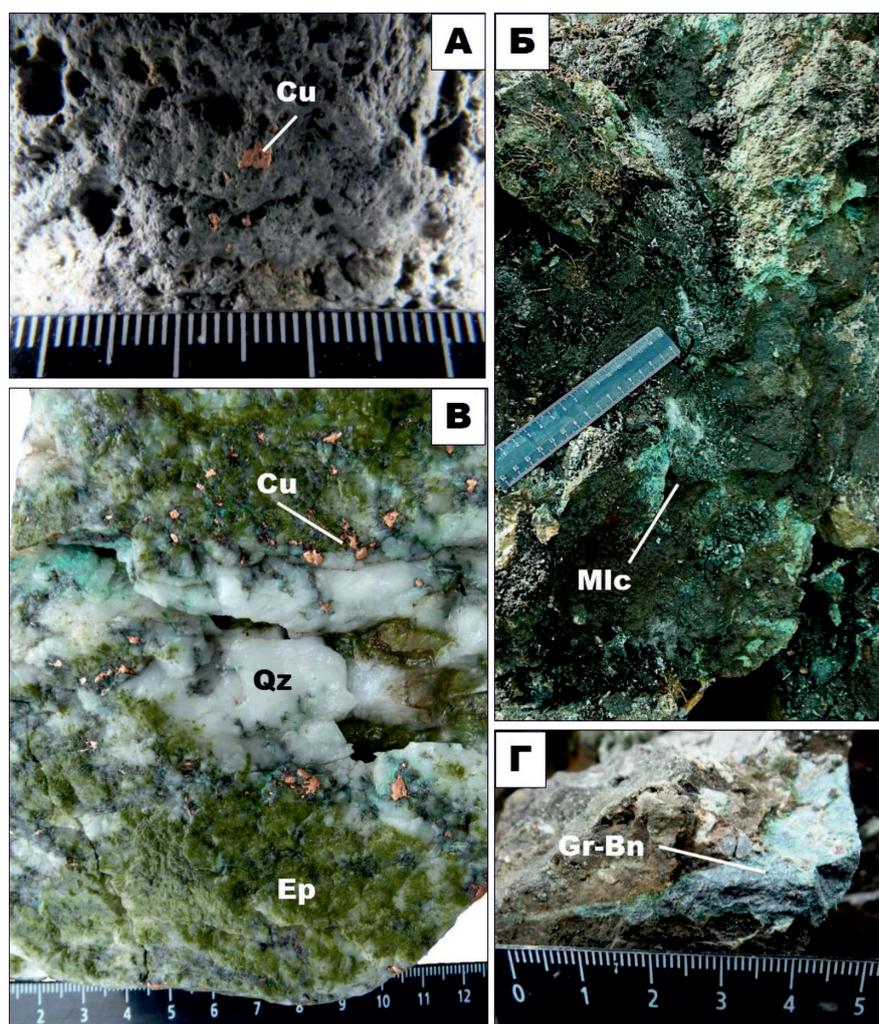


Рис. 2. Типы Fe-оксидных-самородномедных руд проявления Джалкан: А – гематитизированный базальт с самородной медью; Б – фрагмент коренного обнажения в правом борту р. Джалкан с пятнами малахита на базальтах с вкрапленной самородной медью; В – кварц-эпидот-самородномедная минерализация в базальтах; Г – вытянутая миндалины в центральной части покрова базальтов, заполненная сростками джерита и борнита. (Cu – медь самородная, Qz – кварц, Ep – эпидот, Mlc – малахит, Gr – джерит, Bn – борнит)

Таблица 1

Характеристика руд проявлений Джалкан, Росомаха и Хурат

Проявление	Джалкан	Росомаха	Хурат
Минеральный тип руд	Fe-оксидный + самородномедный	Fe-оксидный + борнитовый	Fe-оксидный-Cu-Au
Минеральный состав руд	<i>Гетит, гематит, медь самородная</i> , джерит, борнит, халькопирит, ковеллин, евгенит, самородное золото	<i>Гетит, борнит</i> , халькопирит, самородные медь, золото и серебро	<i>Гематит, гетит, халькопирит</i> , барит, самородное золото
Качество руд	Fe – 9,95–20,16%; Cu – 0,011–3,98%; Ag – 1,9–14,2 г/т	Fe – 8,37–11,09%; Cu – 8,09–18,24%; Ag – 9,29–34,8 г/т.	Fe – 15,11–43,29%; Cu – 0,023–0,083%; Au – 0,1–17,5 г/т; Ag – 5,9–43,3 г/т.

Примечание. Содержания Fe и Cu определены количественным химическим анализом в лаборатории ИГАБМ СО РАН. В работах Э.И. Кутырева и др. [3] приводятся содержания меди в рудах проявления Росомаха от 0,5 до 2,5%. Из-за невысоких содержаний меди в рудах проявление считалось неперспективным. Анализы выполнены в лаборатории физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН. Fe и Cu определены химическим количественным анализом (аналитик Л.Т. Галенчикова); Au и Ag – атомно-абсорбционным анализом на спектрофотометре iCE 3000 Series AAS (аналитики Е.И. Михайлов, А.Е. Санникова).

Fe-оксидный + борнитовый минеральный тип руд (рис. 3) установлен в базальтах и андезитобазальтах *D_{3fm}* проявления Росомаха. Проявление приурочено к лавовому покрову мощностью 35–120 м [1], в котором встречаются участки с крупными уплощенными миндалинами, газовыми трубами и пустотами, выполненными медной рудой и имеющими внутри концентрически-зональное строение. Миндалины и пустоты в лавах имеют удлиненную уплощенную и трубчатую формы, характерные для захвата лавой растительных остатков при их пиролизе и выгорании. Лавовый поток при этом должен был перемещаться медленно, что обусловило их достаточно крупные размеры – до 1 и более м. Поверхностный слой в пустотах выполнения сложен окремелой яшмовидной лавой, далее к центру – происходит чередование слоев, в разной степени обогащенных борнитом. С этими рудами пространственно ассоциируют зоны развития Fe-оксидной минерализации. Общая протяженность рудных тел достигает 250 м и более.

Главный рудный минерал – борнит; **второстепенные** – халькозин, джерит, ковеллин и халькопирит – встречаются в виде игольчатых выделений в борните (структуры распада твердого раствора); **редкие**: самородные медь, золото и серебро. Самородная медь встречается вне миндалин в виде тонкой вкрапленности в игольчатых алюмосиликатах или образует каемки вокруг них. Значительное количество самородной меди в ассоциации с кальцитом цементирует тонкие разноориентированные трещинки в андезитобазальтах. Серебро присутствует как

в андезитобазальтах, так и в миндалинах, заполненных борнитом. В андезитобазальтах серебро химически чистое, в миндалинах содержит примесь Cu > 9%. Размеры выделений серебра до 5–7 мкм, форма вытянутая.

Fe-оксидный-Cu-Au минеральный тип руд проявления Хурат представлен брекчией с гематитовым цементом (рис. 4) и редкой вкрапленной сульфидной минерализацией в подошве покрова миндалекаменных базальтов на контакте с доломитами сегеняхской свиты (*D_{3sg}*). Обломки брекчий размером от долей см до 1,5 м сложены светло-коричневым доломитом. Часто обломки пропитаны тонкой вкрапленностью гематита, от чего приобретают красноватый оттенок. В кровле потока обнаружены пиллоу-лавы, сцементированные кремнистыми осадками, насыщенными гематитом, установленная золотоносность которых – на уровне долей г/т, видимых сульфидов не наблюдается. Миндалины в базальтах на контакте с доломитом и гематитовыми брекчиями имеют клиновидную форму, что свидетельствует об относительной подвижности лавового потока. Выполнение миндалин разное – эпидотовое, эпидот-кальцитовое и хлоритовое. Из рудных минералов в миндалинах преобладают халькопирит и пирит. Средняя мощность гематитовых брекчий – 1,5 м, протяженность не менее 3 км. Содержания в гематитовых брекчиях составляют: Fe – 15,11–43,29%; Cu – 0,023–0,083%; Au – 0,1–17,5 г/т. Минеральный состав руд проявления Хурат отличается простотой: **главные** – ильменит, гематит; **второстепенные** – халькопирит, пирит; **редкие** – серебро и золото самородные, барит, монацит-Се.

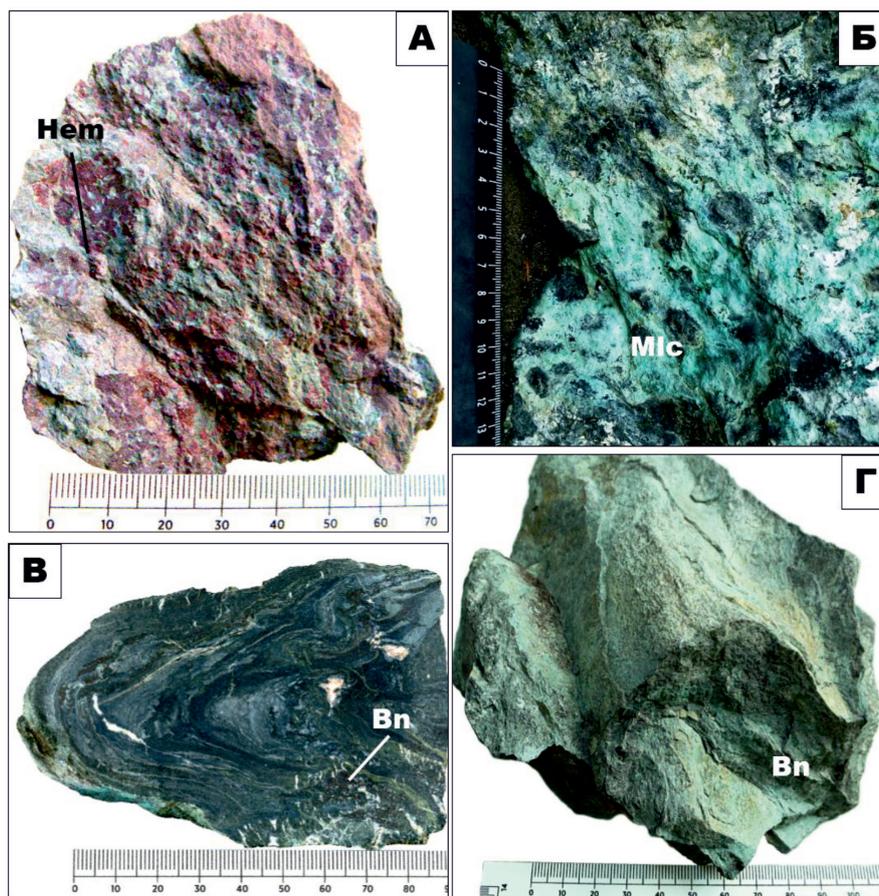


Рис. 3. Типы Fe-оксидных-Cu-Au руд проявления Росомаха: А – гематитизированный базальт; Б – фрагмент коренного обнажения в правом борту р. Сегенях с корками малахита и азурита на богатых борнитовых рудах; В – концентрически-зональная минерализованная миндалина в андезитобазальте: светлые полосы менее насыщены борнитом, чем темные; Г – фрагмент минерализованного борнитом пузыря сложной конфигурации в лавах. (Hem – гематит, Bn – борнит, Cal – кальцит, Qz – кварц, Mlc – малахит)

Таблица 2

Представительные микрозондовые анализы разновидностей золота (в %)

Образец	Fe	Cu	Au	Ag	Pd	Сумма
Джалкан						
10195	–	3,23	86,24	8,85	–	98,32
Росомаха						
27	–	–	89,52	11,02	–	100,54
27	–	–	88,66	10,34	–	99,00
27	–	2,96	87,31	8,62	–	98,89
27	–	1,39	86,57	10,04	–	98,00
27	–	2,21	87,03	8,81	–	98,05
Хураг						
10012	5,99	–	93,68	–	0,58	100,25
10012	5,96	–	92,87	–	0,89	99,72
10012	10,13	–	87,85	–	1,20	99,18

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480 LV, аналитик С.К. Попова.

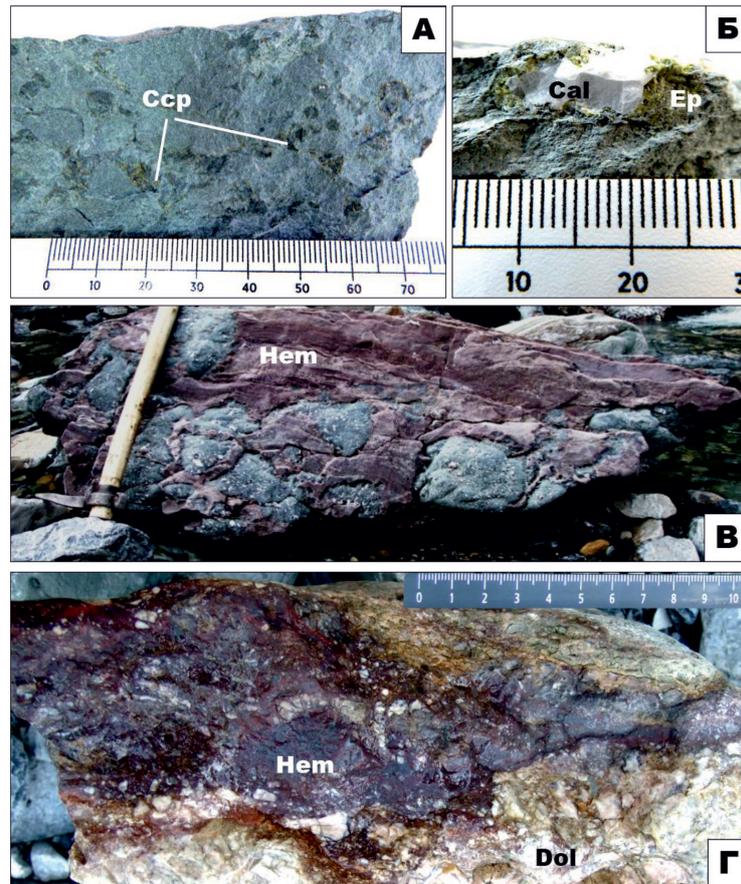


Рис. 4. Типы Fe-оксидных-Cu-Au руд проявления Хурат: А и Б – миндалекаменный базальт с вкрапленностью халькопирита: миндалины выполнены эпидотом, хлоритом и кальцитом, содержат вкрапленники халькопирита. В – подушечная текстура (пиллоу-лава): отдельные «подушки» сцементированы кремнистыми осадками, насыщенными гематитом (руч. Тихий); Г – гематитовая руда в подошве покрова базальтов (ручьи Хурат и Тихий) на контакте и доломитами. (Ccp – халькопирит, Cal – кальцит, Ep – эпидот, Hem – гематит, Dol – доломит)

Особенности самородного золота в Fe-оксидных-Cu-Au рудах

Самородное золото является важным минералом Fe-оксидных-Cu-Au (IOCG) руд, имеет переменный состав (табл. 2), что характеризует генетические особенности рудообразования и представлено системой сплавов: Au-Ag, Au-Ag-Cu и Au-Fe-Pd.

В рудах проявления Джалкан золото обнаружено в обогащенных гематитом и гетитом лавовых потоках. Размеры выделений до 3 мкм, форма округлая. Проба золота 864‰, содержит примесь меди – 3,23%. В рудах проявления Росомаха золото также присутствует в андезитобазальтах и рудных миндалинах, где ассоциирует с ковеллином. В андезитобазальтах золото без примеси меди, проба 856–895‰, в миндалинах содержит

примесь меди – 1,39–2,96%, проба золота 860–873‰. В рудах проявления Хурат золото обнаружено в Ti-гематите и в кальците, пропитанном тонкой вкрапленностью Ti-гематита, что подтверждает генетическую связь металла с Fe-оксидными рудами. Образуют мелкие (до 2–3 мкм) изометричные включения на границах пластин гематита и кальцита. Необычной особенностью золота является полное отсутствие в составе Ag, при этом присутствуют примеси Fe и Pd.

Выводы

Обобщение данных о выявленных минеральных типах руд, связанных с девонскими базальтами хребта Сетте-Дабан, позволило установить новый для Северо-Востока России генетический тип Fe-оксидных-Cu-Au (IOCG) руд. Его главными особенностями

ми являются высокие содержания железа и меди. Золото всегда присутствует в минеральной форме и может образовывать промышленно значимые концентрации. Установлено присутствие трех разновидностей самородного золота: **Au-Ag**, **Au-Ag-Cu** и **Au-Fe-Pd**, что указывает на генетические различия Fe-оксидных-Cu-Au (**IOCG**) руд, связанных с формированием базальтовых покровов.

Исследования выполнены по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект № 0381-2016-0004, и по проекту «Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие ее производительных сил и социальной сферы на 2016–2020 годы».

Список литературы

1. Баранов В.В. Средний и верхний девон юго-восточного обрамления Сибирской платформы (Южное Верхоянье, хребет Сетте-Дабан) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2007. – Т. 15, № 5. – С. 26–41.
2. Костин А.В. Минеральные разновидности Fe-оксидных-Cu руд проявлений Джалкан, Росомаха и Хурат (Сетте-Дабан, Восточная Якутия) // Отечественная геология. – 2016. – № 6. – С. 11–15.
3. Кутырев Э.И., Соболев А.Е., Исправников А.В. и др. Медистые песчаники и медистые базальты Сетте-Дабанского региона // Стратиформное оруденение Якутии: Сборник научных трудов. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. – С. 74–87.
4. Ян-Жин-Шин В.А. Тектоника Сетте-Дабанского горст-антиклинория // Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1983. – 156 с.
5. Butera K. Genesis, tectonic setting-and exploration: considerations for Fe-oxide Cu Au deposits, Mount Isa Eastern Succession: – James Cook University, 2008. – 167 p.
6. Corriveau L., Mumin H., Montreuil J.F. The Great Bear magmatic zone (Canada): The IOCG spectrum and related deposit types // The 11th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Ore Deposits, Antofagasta, Chile, Transaction Volume. – 2011. – P. 524–526.
7. Groves D.I. et al. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits // Economic Geology. – 2010. – Т. 105, № 3. – P. 641–654.
8. Kostin A.V., Vedyayev A.Y., Rafat G. Iron oxide Cu-Au (IOCG) mineralizing systems: an example from northeastern Russia // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2014. – V. 114. – P. 645–650.
9. Pollard, Peter J. An intrusion-related origin for Cu–Au mineralization in iron oxide–copper–gold (IOCG) provinces. Mineralium Deposita. – 2006. – № 41 (2). – P. 179–187.