

## К ПРОБЛЕМЕ ГЕНЕЗИСА СУЛЬФИДОВ И СЕЛЕНИДОВ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ КУПОЛ (Чукотка, Россия)

Н.Е. Савва, Г.А. Пальянова\*, М.А. Бянкин\*\*

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН,  
682000, Магадан, ул. Портовая, 16, Россия

\* Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

\*\* ЗАО «Чукотская горно-геологическая компания», 685000, Магадан, ул. Пролетарская, 11, Россия

Изучены минералы золота и серебра эпitherмального золото-серебряного месторождения Купол (Чукотка, Россия). Составлена схема последовательности минералообразования. Выявлены специфические минеральные ассоциации в ярозитовых брекчиях — с самородным золотом, ютенбогаардитом, фишессеритом, акантитом и самородной серой. Рассмотрен возможный механизм образования сульфидов и селенидов золота и серебра на вулканогенных месторождениях — в сольфатарных и постсольфатарных процессах — при участии вулканических газов или их конденсатов и сублиматов, а также жидкой серы (и селена) и сернокислотных гидротерм, формирующихся при взаимодействии вулканических газов с метеорными водами. Специфические особенности месторождения Купол подтверждают возможный палеосольфатарный генезис Au-Ag сульфидов и селенидов.

*Сольфатары, этапы минерализации, золото-серебряное оруденение, ярозит, ютенбогаардит, фишессерит.*

## THE PROBLEM OF GENESIS OF GOLD AND SILVER SULFIDES AND SELENIDES IN THE KUPOL DEPOSIT (Chukchi Peninsula, Russia)

N.E. Savva, G.A. Pal'yanova, M.A. Byankin

Gold and silver minerals from the Kupol epithermal deposit, Chukchi Peninsula, were studied. A schematic sequence of mineral formation has been compiled. Specific mineral assemblages have been revealed in jarosite breccias: with native gold, yutenbogaardtite, fischesserite, acanthite, and native sulfur. We considered a possible mechanism of formation of gold and silver sulfides and selenides in volcanogenic deposits: They might have formed during solfatara and postsolfatara processes with the participation of volcanic gases or their condensates and sublimes as well as liquid sulfur (and selenium) and sulfuric hydrotherms produced under the interaction of volcanic gases with meteoric waters. The specific features of the Kupol deposit confirm the solfatara genesis of Au-Ag sulfides and selenides.

*Solfatara, mineralization stages, gold-silver mineralization, jarosite, yutenbogaardtite, fischesserite*

### ВВЕДЕНИЕ

Сложные Au-Ag сульфиды и селениды (ютенбогаардит, петровскаит, фишессерит) называют редкими минералами [Barton et al., 1978; Нестеренко и др., 1984; Некрасов и др., 1990], но с каждым годом увеличивается количество месторождений, на которых они обнаружены [Савва, Пальянова, 2007; Анисимова и др., 2008; Пальянова, Савва, 2009; Majzlan, 2009; Савва и др., 2010б; Проскурнин и др., 2011]. В связи с этим генезис сульфидов и селенидов золота и серебра в природных процессах представляется весьма важным. Анализ данных по составу минеральных ассоциаций с ютенбогаардитом и петровскаитом более чем трех десятков месторождений и рудопроявлений позволили выделить среди них две группы — гипергенную и гипогенную [Пальянова, Савва, 2007]. Большая часть месторождений, на которых сульфиды золота и серебра ассоциируют с гипергенными минералами, составляют I группу — Майкаин (Казахстан), Улахан, Крутое, Задержное, Бадран, Купол, Хопто (Россия), Караулхан, Кочбулак (Узбекистан), Назарено (Перу), Понгкор, Тамбанг Сейво (Индонезия), Монинг Ста, Комсток, Ориджинал Баллфрэг, Лаг Баллфрэг (США) и др. Ютенбогаардит и(или) петровскаит присутствуют в верхних уровнях этих месторождений в коре выветривания и ассоциируют с акантитом, самородным золотом и вторичными минералами, такими как гидроксиды железа, ярозит, мелантерит, малахит, азурит, кризотолла, ковеллин, скородит, пиролюзит и манганит. Для месторождений II группы — Юное, Кубака, Дорожное, Альфа, Якутское (Россия), Кызылалмасай (Узбекистан) и Широтан (Индонезия) — характерно

присутствие сульфидов золота и серебра с самородным золотом и акантитом (аргентитом) в гипогенных минеральных ассоциациях. Эти минералы встречаются либо в классических эпиптермальных ассоциациях — с кварцем, серицитом, адуляром, родохрозитом, пиритом, марказитом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом и арсенопиритом, либо в нетипичных эпиптермальных ассоциациях — с Те-содержащим канфилдитом ( $\text{Ag}_8\text{SnS}_4\text{Te}_2$ ), лиллианитом ( $\text{AgPb}_4\text{Bi}_5\text{S}_{12}$ ), касситеритом, ферберитом, шеелитом и гринокитом.

Изучение эпиптермального золото-серебряного месторождения Купол выявило специфические минеральные ассоциации и условия образования акантита, ютенбогаардтита и фишессерита в ярозитовых брекчиях [Савва, Бянкин, 2009; Савва и др., 2010а; Лоренц, 2010]. Цель данной работы — рассмотреть возможность образования Au-Ag сульфидов и селенидов в палеосольфатарных процессах с участием вулканических газов или их конденсатов и сублиматов, а также самородной серы и селена фумарол и серноокислотных гидротерм, формирующихся при взаимодействии вулканических газов с метеорными водами. Предполагается, что обилие серы и селена в ярозитовых брекчиях обусловлено наличием этих компонентов в газовых струях и в конденсатах или кислотных растворах, образующихся в кальдерах вулканов при взаимодействии вулканических газов ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{Se}$ ,  $\text{S}_2$ ,  $\text{Se}_2$ ) с метеорными водами. Авторы статьи провели детальные минералогические исследования золото-серебряных руд месторождения Купол, изучили химический состав минералов золота и серебра, составили схемы последовательности минералообразования и выявили генезис акантита, ютенбогаардтита и фишессерита, а также обосновали возможную специфику механизмов образования сульфидов и селенидов золота и серебра.

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУПОЛ

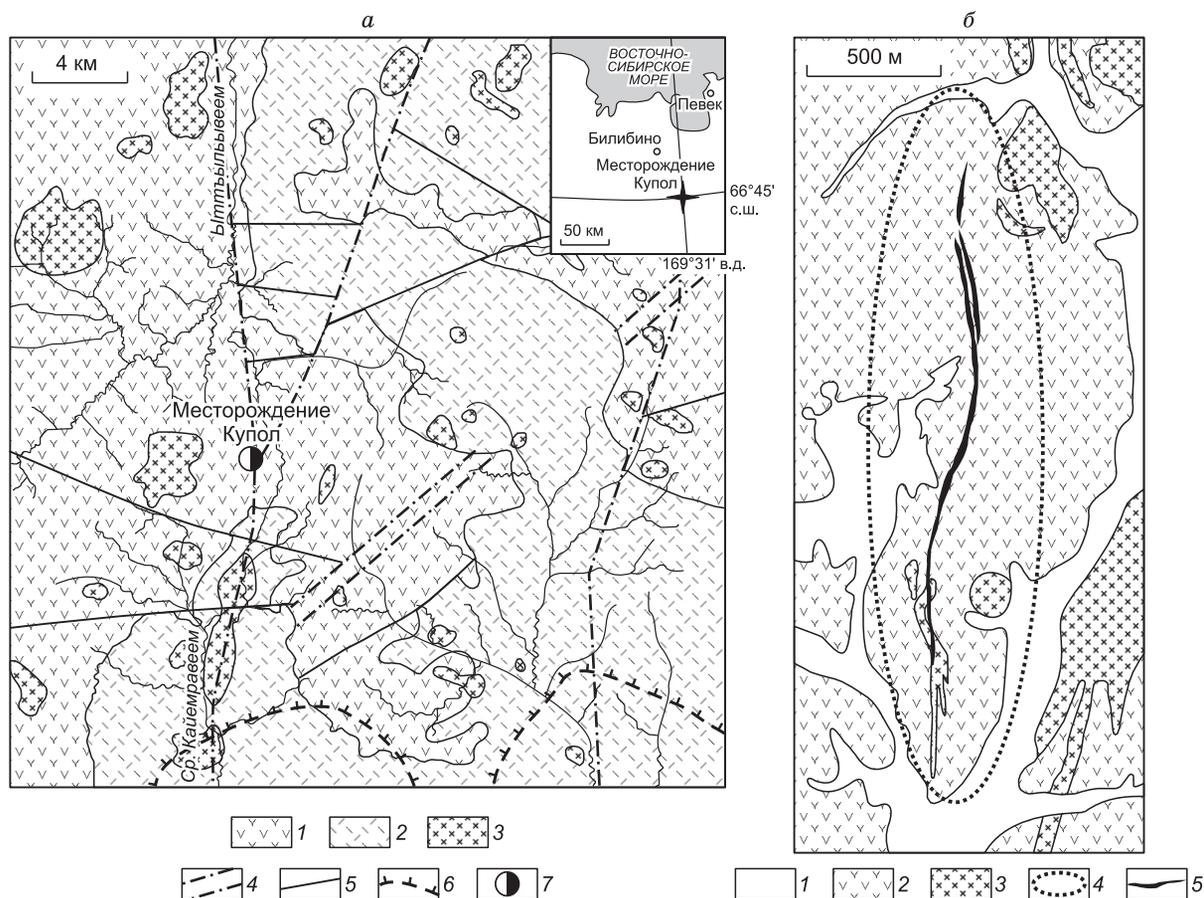
Купольский рудный узел приурочен к Верхнеяблонской металлогенической зоне Центрально-Чукотского сектора Охотско-Чукотского вулканогенного пояса и имеет золото-серебряный металлогенический профиль [Кравцов и др., 2005]. Месторождение Купол открыто В.П. Куклевым в 1966 г., координаты рудного поля:  $66^\circ 45' 48''$ — $66^\circ 48' 39''$  с.ш.,  $169^\circ 31' 21''$ — $169^\circ 35' 52''$  в.д. (рис. 1, а, врезка). Оно приурочено к северной части Мечкеревской вулканотектонической депрессии и имеет сложное геологоструктурное строение, обусловленное полигенным характером рудовмещающих пород. Основным рудоконтролирующим фактором является положение месторождения на сочленении Среднекаймавеевского разлома меридионального простирания с Крестовско-Саламихинским разломом глубинного заложения, имеющим северо-западное простирание (см. рис. 1).

Рудное поле сложено лавами андезитов, реже андезитобазальтов с прослоями пепловых туфов и туффитов позднего мела и характеризуется большим количеством пирокластического материала. Центральная часть представлена туфовой пачкой, в нижней части которой преобладают агломератовые туфы, постепенно сменяющиеся вверх по разрезу более мелкозернистыми разностями вплоть до мелкопсаммитовых. Возраст пород 94—85 млн лет (Ag-Ag датирование) [Леонова и др., 2007]. Меловые эффузивы перекрыты покровами базальтов предположительно палеогенового возраста.

Вулканогенная толща характеризуется весьма резкой фациальной изменчивостью, выражающейся в частом взаимном чередовании по вертикали и латерали лав и туфов, наличии многочисленных непротяженных прослоев и линз вулканогенно-осадочных пород позднемелового возраста. Она прорвана дайками и телами риолитов и риодацитов сложной морфологии. Одна из наиболее мощных даек пересекает главную рудную зону и имеет близкое к ней простирание. К-Ag возраст риолита из дайки — 53 млн лет [Белый и др., 2007]. Рудная зона имеет протяженность более 3500 м и распространяется на глубину более 450 м. Простирание рудной зоны субмеридиональное, падение крутое до вертикального.

Метасоматические процессы весьма разнообразны: от низкотемпературной аргиллизации до высокотемпературной биотитизации. Отмечаются также алунит-ярозитовые метасоматиты, развитые по основной массе вулканических пород и частично затрагивающие пострудную дайку риолитов, пересекающую рудное тело. Считается, что окисленные руды прослеживаются на глубину до 400 м от поверхности и сопровождается образованием лимонита, ярозита и гематита [Вартанян и др., 2005; Сергиевский, 2006].

В рудах месторождения отмечается большое разнообразие текстур прожилково-жильных образований и сложное сочетание брекчиевых, кокардовых и колломорфно-полосчатых текстур, свойственных близповерхностным месторождениям. Наряду с типичными колломорфно-полосчатыми и массивными кварцево-жильными текстурами широко развиты разнообразные брекчии. Среди них можно выделить серые брекчии, состоящие из обломков кварца с кварцевым цементом; черные — с обломками кварца и метасоматитов в кварцевом цементе, насыщенном мелкими зернами сульфидов; красные — с обломками кварца и метасоматитов в кварц-гематитовом цементе; желтые — с обломками кварца в ярозитовом цементе (рис. 2), а также взрывные минерализованные брекчии.



**Рис. 1. Структурно-металлогеническая схема Купольского рудного узла (по В.В. Загоскину, 1995 г.) с упрощениями (а):**

1 — лавы и туфы андезитов и андезибазальтов средней толщи ( $K_2$ ); 2 — игнимбриты, туфы и лавы риолитов верхней толщи ( $K_2$ ); 3 — интрузивные и субвулканические тела различного состава; 4 — осевые зоны крупных разломов; 5 — прочие разломы; 6 — границы палеокальдеров; 7 — местоположение месторождения Купол.

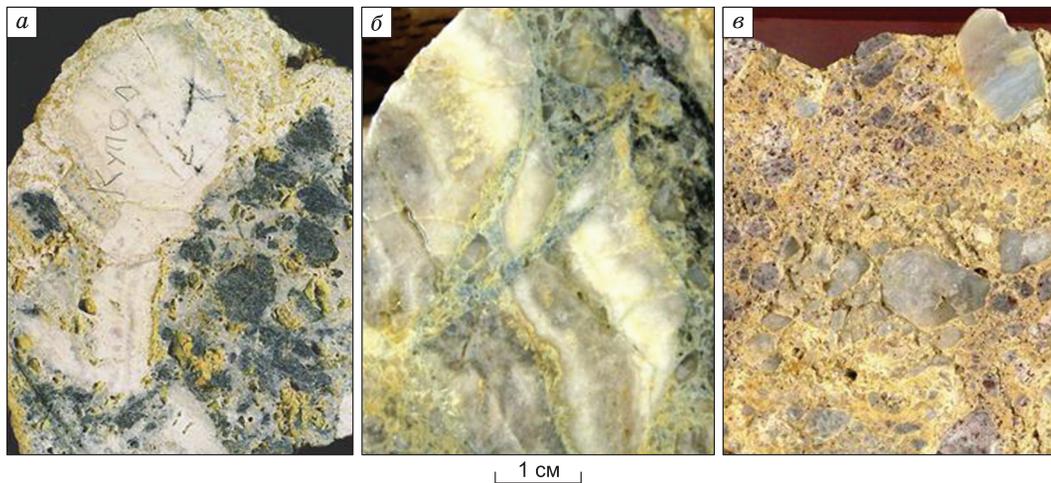
**Схема структурной позиции месторождения Купол (б):**

1 — аллювиальные образования ( $Q_{1-2}$ ); 2 — вулканогенные отложения ( $K_2$ ); 3 — субвулканические и дайковые образования ( $K_2$ ); 4 — контур вулканоструктуры, 5 — рудная жила.

Золото-серебряное оруденение концентрируется в жильных телах, сложенных в основном кварц-халцедоновым материалом и серицитом с относительно небольшим количеством адуляра. Прожилково-жильные гидротермальные образования по минеральному составу и морфологии разделены на три группы: малосульфидные жилы и прожилки халцедон-кварцевого, реже адуляр-кварцевого состава; карбонатные жилы и прожилки (до 0.2 м); гипс-ангидритовые жилы и прожилки (до 0.2 м) [Вартанян и др., 2005; Лоренц, 2010]. Содержание Au в рудах, по данным бороздового и кернового опробования, варьирует от 0.01 до 100 г/т (максимум 2620 г/т), среднее по месторождению — 21.5 г/т. Содержание Ag — от 0.5—10 до 500 г/т (максимум 32420 г/т), среднее по месторождению — 266.6 г/т ([http://www.chukotka.org/ru/economics/branch/get\\_gold/gold\\_deposit](http://www.chukotka.org/ru/economics/branch/get_gold/gold_deposit)).

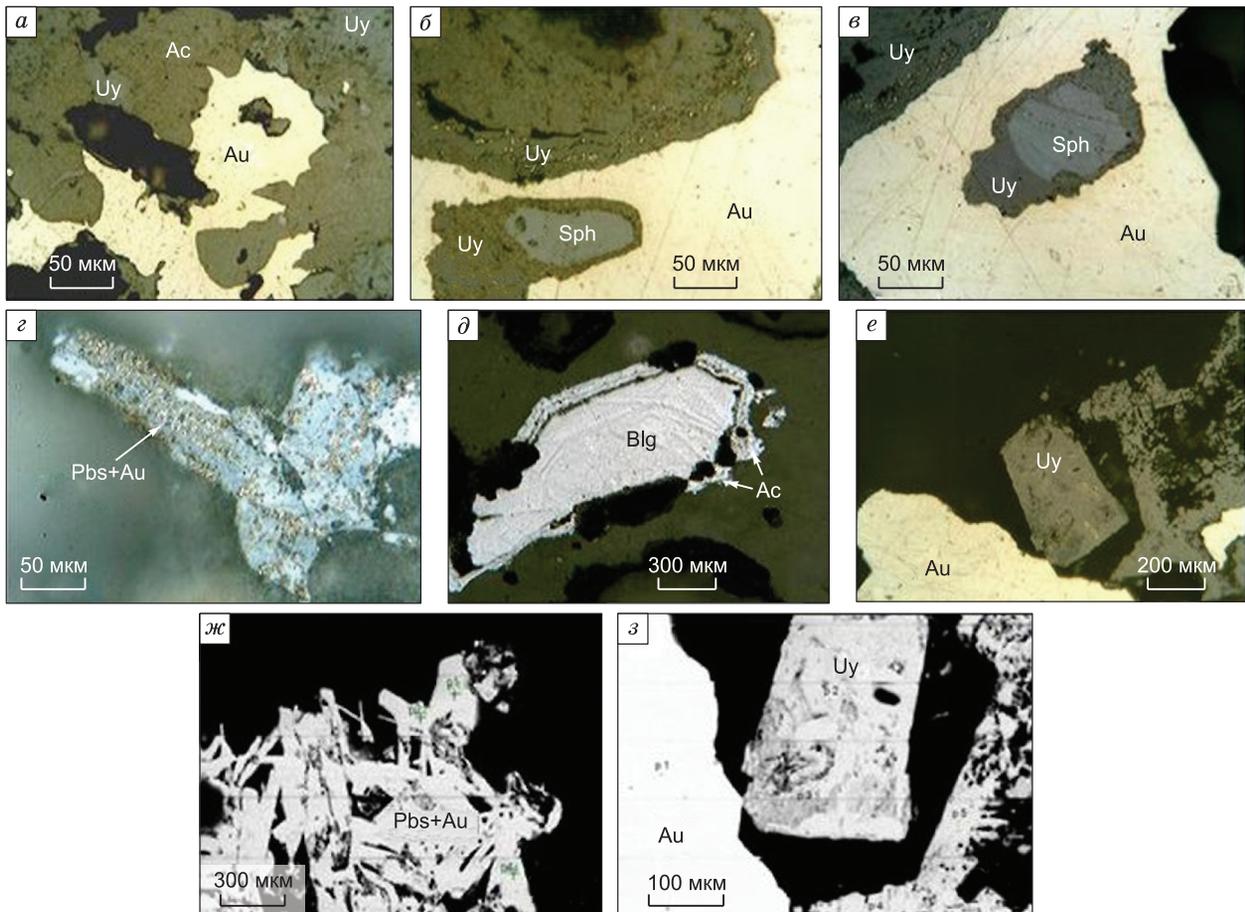
**ЭТАПЫ И СТАДИЙНОСТЬ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ**

В строении рудных тел, по данным [Вартанян и др., 2005; Лоренц, 2010], дополненным нашими исследованиями, участвуют более 50 минералов. При детальном минералогическом исследовании золото-серебряных руд месторождения Купол в качестве критериев для установления последовательности формирования руд (табл. 1) нами использованы различные онтогенетические признаки, включая пересечения жил и прожилков минеральных агрегатов, залечивание трещин катаклаза в ранних минералах поздними, цементация обломков ранних минералов поздними. Процесс рудообразования разделен на три этапа, внутри которых выделено шесть стадий. Последовательность отложения главных и рудных мине-



**Рис. 2. Желтые (ярозитовые) брекчии.**

*a* — обломки жил колломорфно-полосчатого сложения и рудная брекчия с кварцевым цементом в ярозитовом цементе, скв. КР03-09, глубина 103 м; *б* — фрагмент жилы колломорфно-полосчатого сложения, материал жилы катаклазирован и сцементирован ярозит-ангидритовым агрегатом с поздними сульфидами и сульфосолями Ag (клейофан, акантит, ютенбогаардит, фишессерит, золотосодержащий биллингслеит), скв. КР03-074, глубина 36.8 м, содержание золота 30.1 г/т, серебра 449 г/т; *в* — брекчия, состоящая из обломков кварца и метасоматитов в ярозит-ангидритовом цементе (поверхность).



**Рис. 3. Ассоциации рудных минералов в ярозитовой брекчии.**

*a—в* — сростания ютенбогаардита с акантитом, самородным золотом и сфалеритом; *г* — сросток кристаллов Au-содержащего полибазита (золото выступает при светотравлении под объективом микроскопа); *д, е* — в отраженном свете: *д* — срез кристалла биллингслеита с отчетливой зональностью, возникшей в результате светотравления, и с каймой гипергенного акантита; *е* — срез идиоморфного кристалла ютенбогаардита в сростании с самородным золотом; *ж, з* — в отраженных электронах: *ж* — сросток кристаллов Au-содержащего полибазита; *з* — неоднородность кристалла ютенбогаардита по селену (в характеристическом излучении Se). Uy — ютенбогаардит, Ac — акантит, Au — самородное золото, Blg — биллингслеит, Sph — сфалерит, Pbs — полибазит.

ралов месторождения Купол представлена в табл. 1. Смена состава сульфидов в минеральных ассоциациях отражает эволюцию гидротермальных растворов и вариации активности сульфидной серы в вулканогенном гидротермально-метасоматическом процессе.

### Вулканогенный этап

**I стадия** характеризуется последовательным отложением пирротина, арсенопирита, марказита.

**II стадия** начинается с образования пирита, сфалерита, халькопирита, галенита и завершается появлением блеклых руд, электрума и самородного серебра.

**III стадии** свойственно отложение Fe-Sb и Ag-Sb сульфосолей, селенидов, электрума.

Таблица 1. Схема последовательности минералообразования на месторождении Купол

| Минерал               | Этап                            |     |    |                                |  |             |
|-----------------------|---------------------------------|-----|----|--------------------------------|--|-------------|
|                       | гидротермально-метасоматический |     |    | сульфатарный                   | интрузивный<br>(внедрение<br>пострудных<br>даек) | гипергенный |
|                       |                                 |     |    | рудно-<br>метаморфиче-<br>ский |  |             |
|                       | Стадия                          |     |    |                                |  |             |
| I                     | II                              | III | IV | V                              | VI   |             |
| Каолинит              |                                 |     |    |                                |  |             |
| Халцедон              | —                               | —   | —  |                                |  |             |
| Кварц                 | —                               | —   | —  |                                |  |             |
| Адуляр                | —                               | —   | —  |                                | ---  |             |
| Серицит               | —                               |     |    |                                |  |             |
| Карбонат              |                                 |     |    |                                | —  |             |
| Хлорит                | ---                             |     |    |                                |  |             |
| Пирофиллит            |                                 |     |    |                                |  |             |
| Бiotит                |                                 |     |    |                                |  |             |
| Гематит               | —                               |     |    |                                |  |             |
| Пирротин              | —                               |     |    |                                | ---  |             |
| Арсенопирит           | —                               |     |    |                                |  |             |
| Марказит              | —                               |     |    |                                |  |             |
| Пирит                 | —                               | —   |    |                                |  |             |
| Галенит               |                                 | —   | —  |                                |  |             |
| Сфалерит              |                                 | —   | —  | —                              |  |             |
| Акантит               |                                 | —   | —  | —                              | —  |             |
| Халькопирит           |                                 | —   | —  |                                |  |             |
| Блеклые руды          |                                 | —   | —  |                                |  |             |
| Ag-Sb сульфосоли      |                                 |     | —  | —                              | —  |             |
| Fe-Sb сульфосоли      |                                 |     | —  |                                | —  |             |
| Антимонит             |                                 |     |    |                                | —  |             |
| Селениды              |                                 |     | —  | —                              |  |             |
| Au-Ag* интерметаллиды |                                 | —   | —  | —                              |  |             |
| Au-Ag сульфиды        |                                 |     |    | —                              |  | ---         |
| Гипс                  |                                 |     |    |                                |  | ---         |
| Ангидрит              |                                 |     |    |                                |  |             |
| Ярозит                |                                 |     |    | —                              |  |             |
| Халькантит            |                                 |     |    |                                |  |             |
| Халькозин             |                                 |     |    |                                |  | —           |
| Англезит              |                                 |     |    |                                |  | —           |
| Гидроксиды Fe         |                                 |     |    |                                |  | —           |
| Сера                  |                                 |     |    | —                              |  |             |

Примечание. Толщина линий указывает на относительную степень распространенности минерала, штриховая линия — минерал встречается спорадически.

\* Самородное золото и серебро (%): высокопробное золото — 1000—700, электрум — 700—250, кюстелит — 250—100, самородное серебро — 100—0.

Таблица 2. Химический состав золото-серебряных фаз из ярозитовых брекчий месторождения Купол (данные микрозондового анализа)

| № п/п  | S      | Ag    | Au    | Se    | Sb    | Σ       | (S + Se)                | Ag    | Au   | Sb   |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|---------|-------------------------|-------|------|------|
|  | мас. % |       |       |       |       |         | формульные коэффициенты |       |      |      |
| <b>Ютенбогардит (<math>Ag_3AuS_2</math>)</b>                                 |        |       |       |       |       |         |                         |       |      |      |
| 1  | 12.86  | 54.21 | 31.12 | 0.00  | —     | 98.20   | 2.26                    | 2.82  | 0.89 | 0    |
| 2  | 12.64  | 54.32 | 33.33 | 0.00  | —     | 100.29  | 2.21                    | 2.83  | 0.95 | 0    |
| 3  | 12.90  | 54.43 | 32.61 | 0.00  | —     | 99.94   | 2.25                    | 2.82  | 0.92 | 0    |
| 4  | 12.53  | 58.94 | 30.13 | 0.00  | —     | 101.60  | 2.14                    | 3.00  | 0.84 | 0    |
| 5  | 11.39  | 51.06 | 37.56 | 0.00  | —     | 100.01  | 2.08                    | 2.78  | 1.12 | 0    |
| 6  | 12.30  | 54.87 | 32.54 | 1.80  | —     | 101.51  | 2.26                    | 2.82  | 0.91 | 0    |
| 7  | 11.66  | 54.80 | 30.20 | 1.37  | —     | 98.03   | 2.19                    | 2.92  | 0.89 | 0    |
| 8  | 12.70  | 56.24 | 31.30 | 0.00  | —     | 100.24  | 2.20                    | 2.91  | 0.89 | 0    |
| 9  | 9.79   | 54.93 | 29.32 | 5.60  | —     | 99.64   | 2.18                    | 2.95  | 0.86 | 0    |
| 10   | 9.42   | 53.79 | 33.11 | 2.95  | —     | 99.25   | 2.25                    | 2.79  | 0.96 | 0    |
| 11   | 9.58   | 56.91 | 27.93 | 4.80  | —     | 99.22   | 2.09                    | 3.07  | 0.83 | 0    |
| 12   | 12.22  | 56.77 | 32.89 | 0.00  | —     | 101.87  | 2.12                    | 2.93  | 0.93 | 0    |
| 13   | 12.34  | 54.76 | 33.77 | 0.00  | —     | 100.81* | 2.21                    | 2.83  | 0.96 | 0    |
| <b>Акантит (<math>Ag_2S</math>)</b>  |        |       |       |       |       |         |                         |       |      |      |
| 14   | 14.89  | 86.14 | 0.00  | 0.00  | —     | 101.03  | 1.11                    | 1.89  | 0    | 0    |
| 15   | 14.06  | 87.04 | 0.00  | 0.00  | —     | 101.10  | 1.06                    | 1.94  | 0    | 0    |
| 16   | 14.98  | 85.25 | 0.00  | 0.00  | —     | 101.23  | 1.10                    | 1.90  | 0    | 0    |
| 17   | 16.35  | 81.68 | 0.00  | 2.56  | —     | 100.60  | 1.24                    | 1.76  | 0    | 0    |
| 18   | 15.88  | 81.51 | 0.00  | 2.47  | —     | 99.86   | 1.23                    | 1.77  | 0    | 0    |
| 19   | 17.56  | 83.06 | 0.00  | 0.00  | —     | 100.62  | 1.24                    | 1.76  | 0    | 0    |
| 20   | 16.22  | 78.25 | 0.00  | 5.50  | —     | 99.98   | 1.32                    | 1.68  | 0    | 0    |
| <b>Фишессерит (<math>Ag_3AuSe_2</math>)</b>                                  |        |       |       |       |       |         |                         |       |      |      |
| 21   | 1.24   | 61.7  | 15.58 | 17.31 | 0.77* | 96.6    | 1.59                    | 3.82  | 0.59 | 0.04 |
| <b>Sb-биллингслеит (<math>Ag_7SbS_6</math>)</b>                              |        |       |       |       |       |         |                         |       |      |      |
| 22   | 15.67  | 73.31 | —     | 0.00  | 10.56 | 99.54   | 5.45                    | 7.58  | 0    | 0.96 |
| 23   | 15.67  | 71.24 | —     | 0.00  | 10.24 | 97.12   | 5.54                    | 7.50  | 0    | 0.95 |
| <b>Золотосодержащий полибазит (<math>(Ag,Au)_{16}Sb_2(S,Se)_{11}</math>)</b> |        |       |       |       |       |         |                         |       |      |      |
| 24   | 14.80  | 70.17 | 6.52  | 0.00  | 10.19 | 101.69  | 10.88                   | 16.21 | 1.91 |      |
| 25   | 14.19  | 68.40 | 6.35  | 0.00  | 9.56  | 98.51   | 10.83                   | 16.26 | 1.91 |      |
| 26   | 14.86  | 68.62 | 7.62  | 0.00  | 8.90  | 100.01  | 11.09                   | 16.16 | 1.75 |      |
| 27   | 14.56  | 67.97 | 6.21  | 2.09  | 8.76  | 99.60   | 11.47                   | 15.79 | 1.71 |      |
| 28   | 14.25  | 70.21 | 6.22  | 0.00  | 9.39  | 100.07  | 10.98                   | 16.13 | 1.89 |      |
| 29   | 8.84   | 74.7  | 4.98  | 4.39  | 8.41  | 101.32* | 10.87                   | 16.43 | 1.70 |      |

Примечание. Эталоны — Au-Ag сплавы (пробность (‰) — 1000, 775, 600, 400, 200, 0), аналитические линии —  $AuL_{\alpha}$ ,  $AgL_{\alpha}$ , ZnS и  $SK_{\alpha}$ ,  $Sb_2S_3$  и  $SbL_{\alpha}$ , PbSe и  $SeK_{\alpha}$ . Прочерк — концентрации элементов ниже предела чувствительности.

\* САМЕСА MS-46, аналитик Т.И. Голбеанова (ИГЕМ РАН, г. Москва), остальное — Самебах, аналитики Е.М. Горячева, Т.В. Субботникова (СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан).

**IV стадия** завершает вулканогенный этап и связывается с фумарольной деятельностью, в результате чего происходит образование самородной серы, гипса, ярозита, ангидрита, халькантиста, электрума, акантита, ютенбогардита, фишессерита, клейофана (белого безжелезистого сфалерита) и низкосурьмянистых сульфосолей серебра с примесью Au (табл. 2). Эта стадия важна для формирования руд, так как обеспечивала условия для их природного обогащения. Участки рудного тела, по которым прошли вулканические эксгаляции, маркируются наличием ярозита, серы и клейофана, а также повышенными концентрациями Au и Ag.

## Интрузивный этап

**V стадия** связана с пострудным внедрением дайки риолита в рудное тело и процессами термометаморфизма рудных образований в приконтактных участках. На этой стадии происходит наложение высокотемпературных метасоматитов на низкотемпературные и появление таких метасоматических минералов, как биотит, пиррофиллит и хлорит. При этом имеет место перераспределение рудного вещества — Sb выносятся из сульфосолей серебра и образуются антимонит ( $Sb_2S_3$ ), бертьерит ( $FeSb_2S_4$ ) и акантит. Карбонатные прожилки, секущие рудные агрегаты, практически не содержат рудных минералов.

## Гипергенный этап

Мощность зоны гипергенеза оценивается не менее 50 м.

**VI стадия** характеризуется развитием гипергенных минералов по первичным. В зоне гипергенеза образуются гидроксиды Fe (гётит и гидрогётит), халькозин и гипс. Наиболее распространены замещения халькопирита халькозином и гетитом, пирита — гидрогётитом. Вместе с тем основной чертой зоны гипергенеза месторождения Купол является широко развитый процесс восстановления сульфатной серы до сульфидной. На гипсовых корках, формирующихся непосредственно на поверхности делювиальных обломков метасоматитов, происходит отложение марказита.

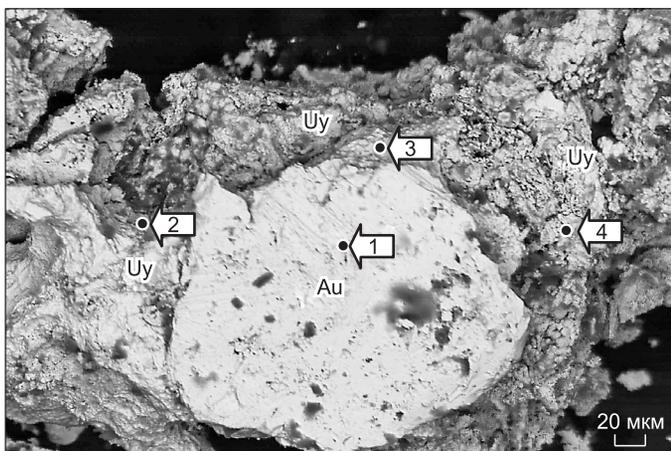
Образование минералов VI стадии мы связываем с сольфатарными процессами. Наиболее детально нами изучены самородное золото, Au-Ag сульфиды и селениды, а также Sb-биллингслеит из ярозитовых брекчий. Характеристики этих минералов (химический состав, морфология, взаимоотношения с другими минералами) приведены в следующем разделе.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ МИНЕРАЛОВ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА ИЗ ЯРОЗИТОВЫХ БРЕКЧИЙ

**Самородное золото.** Несмотря на то, что на месторождении Купол эндогенное золото характеризуется широкими вариациями пробности от 300 до 870 ‰, а пробность гипергенного золота достигает 990 ‰, для золота ярозитовых брекчий типичны значения пробности в интервале 580—690 ‰ и небольшие примеси селена до 0.21 мас. % (табл. 3). Наиболее часто встречается золото пробностью 600—650 ‰. Размер частиц от десятых долей до 1.5 мм. Морфология зерен преимущественно комковидная и интерстициальная с неровной ячеистой поверхностью, в отдельных случаях губчатая. Повсеместно оно сростается с акантитом, стефанитом, клейофаном и ютенбогардтитом (рис. 3, 4; табл. 4).

**Золото-серебряные сульфиды и селениды** распространены до глубины 180 м. Акантит, ютенбогардтит и фишессерит образуют гнездовые скопления, каймы и включения в электруме, а также сростания с клейофаном и сульфосолю, близкой по составу к Sb-биллингслеиту (см. табл. 2). Ютенбогардтит образует каймы обрастания и обособления до 1 мм (см. рис. 3, а—в), а также самостоятельные зерна иногда прямоугольного сечения в срезах шлифов (см. рис. 3, е, з). Данный минерал сростается с самородным золотом, клейофаном, акантитом и Sb-биллингслеитом. В целом для ярозитовых брекчий месторождения Купол состав ютенбогардтита отклоняется от стехиометрии и характеризуется избытком S (см. табл. 2, 4). Акантит образует поверхностные пленки на биллингслеите (см. рис. 3, д) и ютенбогардтите, а также сростается с самородным золотом, формируя слоистые агрегаты. По составу отмечаются селенистые и бесселенистые разновидности акантита с избыточным количеством S (см. табл. 2). Судя по результатам химических анализов ютенбогардтит и акантит содержат примеси селена до 5.6 мас. %. В фишессерите количество примеси серы не превышает 1.2 мас. %.

**Sb-биллингслеит** представлен пластинчатыми кристаллами, похожими на акантит, с многочисленными двойниками прорастания или образует друзовидные сростки пластинчатых и игольчатых кристаллов (см. рис. 3, ж). В отраженном свете биллингслеит быстро подвергается светотравлению, обнаруживая при этом признаки зональности (см. рис. 3, д). На поверхности минерала ус-



**Рис. 4.** Отложение агрегата ютенбогардтита вокруг зерна золота (материал из ярозитовой брекчий).

Усл. обозн. см. на рис. 3. 1—4 — номер точки см. табл. 4.

Таблица 3. Состав самородного золота из ярозитовых брекчий (мас. %)

| № анализа | Se   | Au    | Ag    | Σ      |
|-----------|------|-------|-------|--------|
| 1         | 0.21 | 65.88 | 34.10 | 100.18 |
| 2         | 0.00 | 64.57 | 35.64 | 100.21 |
| 3         | 0.00 | 64.81 | 34.97 | 99.77  |
| 4         | 0.13 | 65.49 | 33.27 | 98.89  |
| 5         | 0.01 | 64.55 | 33.30 | 97.86  |
| 6         | 0.12 | 60.18 | 39.50 | 99.80  |
| 7         | 0.00 | 58.31 | 41.03 | 99.34  |
| 8         | 0.00 | 59.06 | 41.81 | 100.88 |
| 9         | 0.01 | 59.88 | 38.95 | 98.85  |
| 10        | 0.00 | 60.97 | 34.66 | 95.62  |
| 11        | 0.00 | 62.53 | 37.00 | 99.53  |
| 12        | 0.14 | 63.37 | 37.16 | 100.67 |
| 13        | 0.00 | 63.45 | 36.31 | 99.76  |
| 14        | 0.00 | 61.27 | 37.86 | 99.13  |
| 15        | 0.00 | 60.10 | 36.54 | 96.64  |
| 16        | 0.00 | 62.21 | 35.45 | 97.66  |
| 17        | 0.02 | 67.30 | 32.44 | 99.76  |
| 18        | 0.00 | 58.64 | 40.32 | 100.00 |
| 19        | 0.11 | 68.93 | 31.07 | 101.11 |
| 20        | 0.00 | 67.17 | 32.83 | 100.0  |
| 21        | 0.02 | 59.09 | 40.91 | 100.02 |
| 22        | 0.00 | 61.55 | 38.40 | 99.95  |
| 23        | 0.01 | 62.13 | 37.87 | 100.01 |
| 24        | 0.05 | 64.12 | 35.25 | 98.42  |
| 25        | 0.10 | 62.16 | 36.04 | 98.30  |

Примечание. Эталоны — Au-Ag сплавы (пробность (‰) — 1000, 775, 600, 400, 200, 0), аналитические линии — AuL<sub>α</sub> и AgL<sub>α</sub>. САМЕВАХ, аналитик Е.М. Горячева (СВКНИИ ДВО РАН).

тановлены корочки акантита (гипергенные каймы), что отчетливо видно на рис. 3, д. По составу биллингслеит отклоняется от стехиометрии, обладая заметным дефицитом S и избытком Ag (см. табл. 2).

Золотосодержащие минеральные фазы, похожие на биллингслеит и проявляющие сильную способность к светотравлению (см. рис. 3, з), образуют удлиненные кристаллы в пустотах и кавернах. В сечении аншлифа для них характерны игольчатые и призматические формы (см. рис. 3, ж). По составу фазы близки к золотосодержащему полибазиту (см. табл. 2).

### ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ СУЛЬФИДОВ И СЕЛЕНИДОВ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА НА ВУЛКАНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Существование современных сольфатар (сернистых fumarol), расположенных на стенках кратерных воронок, а также наличие кратерных термальных кислотных озер, содержащих высокие концентрации серной кислоты в растворах [Pasternack, Varekamp, 1997; Okrugin et al., 2001; Гавриленко и др., 2009], позволяют предположить, что образование Au-Ag сульфидов и селенидов на эпитеpmальных месторождениях, подобных Куполу, могло происходить в сольфатарных и постсольфатарных процессах. По данным прямых измерений, в различных действующих вулканах среди летучих помимо водяного пара присутствуют диоксид серы (SO<sub>2</sub>), сероводород (H<sub>2</sub>S), газообразная сера и другие газы [Symonds et al., 1990; Коржинский и др., 1996; Taran et al., 2000; Williams-Jones, Heinrich, 2005; Чаплыгин, 2009; Taran, 2009]. Основным продуктом сублиматов сернистых fumarol является самородная сера, образующаяся в результате следующих реакций:



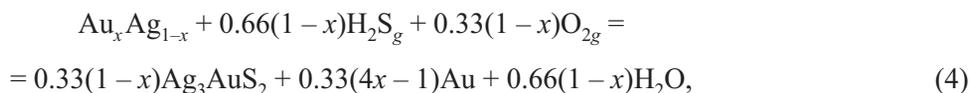
Для серы вулканического происхождения характерны примеси селена, содержание которых варьирует от следовых до 90 мас. % [Синдеева, 1959]. Возможными формами переноса золота и серебра могут быть газовые частицы состава — AuHS·(H<sub>2</sub>S)<sub>n</sub>, AuS·(H<sub>2</sub>S)<sub>n</sub>, AgHS, 2AgHS·(H<sub>2</sub>S)<sub>2</sub>, AgCl·(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>, AuCl·(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub> [Migdisov et al., 1999; Archibald et al., 2001; Bychkov et al., 2005; Zevin et al., 2007]. Концентрации серебра в жидких конденсатах вулканических газов варьируют от 1 до 250 г/т и для золота — от 0.03 до 13 мг/т, что достаточно для образования рудной минерализации [Williams-Jones, Heinrich, 2005]. Самородное золото и серебро найдены в fumarольных полях вулканов России (Камчатка) и Мексики [Набоко, 1959; На-

Таблица 4. Состав минералов самородного золота и ютенбогаардтита (мас. %)

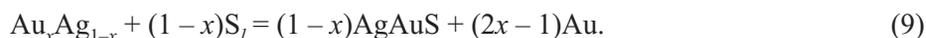
| № точки | S     | Ag    | Au    | Сумма  |
|---------|-------|-------|-------|--------|
| 1       | 0.00  | 40.77 | 59.28 | 100.50 |
| 2       | 12.65 | 54.81 | 29.72 | 99.67  |
| 3       | 12.51 | 52.60 | 35.68 | 100.79 |
| 4       | 12.78 | 50.12 | 35.42 | 98.32  |

Примечание. QEMSCAN, аналитик Т.В. Субботникова (СВКНИИ ДВО РАН).

боко, Главатских, 1996; Taran et al., 2000; Карпов, Алехин, 2009]. Эксгальционный механизм формирования самородного золота и серебра подтвержден многими исследователями [Вергасова и др., 1982, 2000; Symonds et al., 1990; Коржинский и др., 1996; Зеленский, 2003; Чаплыгин и др., 2010]. Мы предполагаем, что образование Au-Ag сульфидов может происходить при взаимодействии вулканических газов — сероводорода, диоксида серы или газообразной серы — с ранее отложенным самородным золотом в результате следующих реакций (показано на примере ютенбогаардтита):



Образование Au-Ag сульфидов возможно также и при участии серы сольфатар и сернокислотных вод, содержащих механическую взвесь кристаллической или жидкой серы. Поскольку температура плавления  $S_s$  составляет 113—120 °С [Мальшев, 2004], то в вулканических гидротермах или сернокислотных растворах при более высоких температурах существует жидкая сера  $S_l$ . Сера в расплавленном состоянии характеризуется повышенной реакционной способностью [Мальшев, 2004]. Образование сульфидов золота и серебра происходит, вероятно, при взаимодействии жидкой серы с ранее отложенным самородным золотом по реакциям:

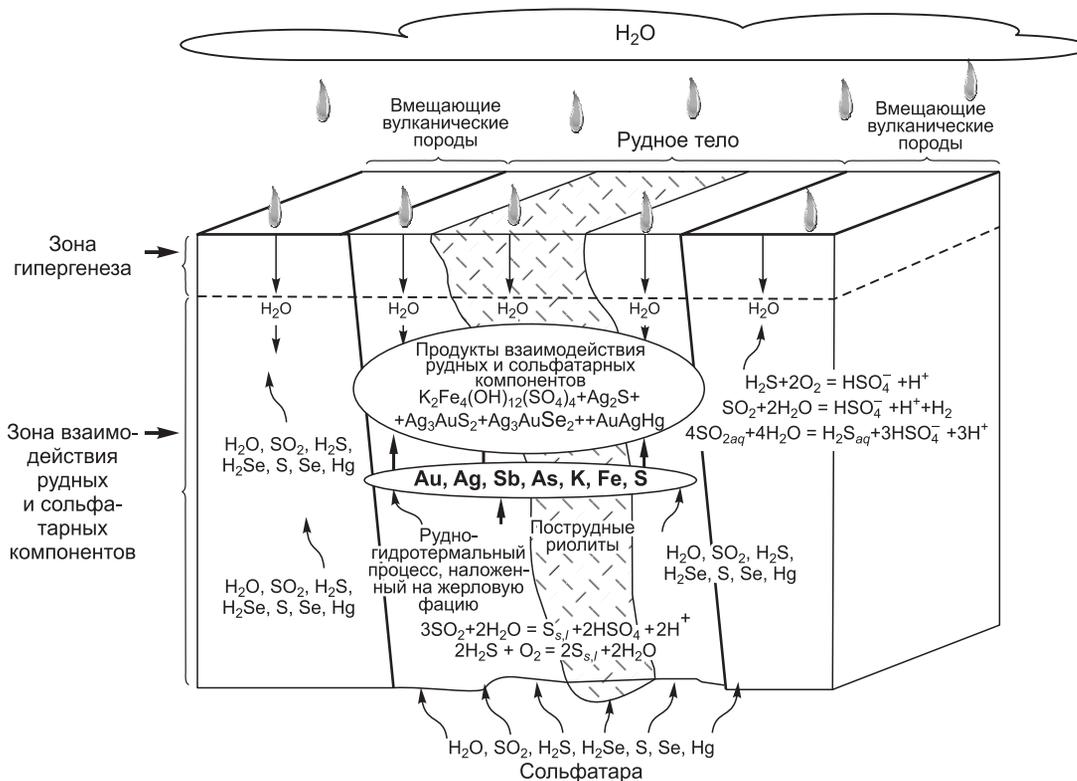


Состав сложных Au-Ag сульфидов будет зависеть от количества золота: при мольной доле золота  $> 0.25$  и  $0.5$  (пробность золота выше 370 и 650 %) возможно образование ютенбогаардтита и петровскита соответственно [Савва и др., 2010б]. Следует отметить, что присутствие серной кислоты повышает температуру кипения воды до 300 °С. Участие жидкой серы способствует быстрому прохождению таких реакций в гидротермальных процессах при температурах 113—300 °С. Что касается селена, то температура его плавления составляет 221 °С, и реакции с жидким селеном будут проходить при более высоких температурах, чем с жидкой серой, но также при  $T < 300$  °С.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изучение минералогических особенностей месторождения Купол выявило специфические продуктивные минеральные ассоциации с самородным золотом и серой, ютенбогаардтитом, фишессеритом и акантитом в ярозитовых брекчиях. На высокую активность серы указывает присутствие самородной серы в ярозитовых брекчиях и ее избыточное содержание в акантите и ютенбогаардтите. Сульфиды и селениды золота и серебра встречаются в виде широких кайм по самородному золоту, тесно ассоциируют с акантитом, реже со сфалеритом, образуя поликристаллические агрегаты (см. рис. 2), что свидетельствует об их более позднем появлении по сравнению с этими минералами. Мы предполагаем, что широкое развитие ярозита ( $\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$ ) и серы при низкой сульфидности руд связано с активной палеосольфатарной деятельностью. Подобные образования не являются следствием экзогенных процессов, они более типичны для гидротерм и сольфатар, сопровождающих вулканические извержения [Marcoux, 1995; White, Hedenquist, 1995; Lueth et al., 2005]. Для месторождения Купол характерен ряд черт, свидетельствующих об особой специфике формирования месторождения:

- относительно большой масштаб оруденения (руды с видимым золотом встречаются на глубинах свыше 450 м);
- мощность рудовмещающей структуры протяженностью от 50 до 3000 м;
- положение секущей дайки риолитов в центральной части рудовмещающей структуры, разделяющей рудную жилу на тела висячего и лежачего крыльев;
- наличие эксплозивных брекчий внутри рудного тела;
- широкое развитие брекчий и мегабрекчий в рудных телах с кокардовым обрастанием рудным агрегатом обломков различного состава;
- присутствие большого количества ярозита и серы в цементе рудных брекчий при относительно низком содержании сульфидов (0.5—1 %) в главном рудном теле;
- последовательное снижение Au:Ag отношения в рудах с поверхности на глубину от 1:3 до 1:100.



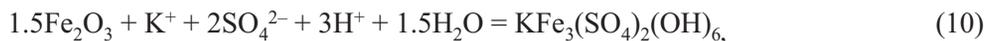
**Рис. 5. Возможная схема образования золото-серебряных руд на месторождении Купол при участии вулканических газов, серы сольфатар и метеорных вод.**

Такой масштаб оруденения, как на Куполе, свойствен тем месторождениям, в которых Au-Ag оруденение наложено на жерловые фации, например, Тавуа или Ватукоула на о. Фиджи [Полезные..., 1980]. Значительная мощность рудовмещающей структуры, наличие большого количества брекчий и мегабрекчий, в том числе взрывчатых внутри рудного тела, свидетельствуют о рудообразующих процессах в жерле трещинного вулкана. Важной особенностью является также высокое содержание ярозита и серы, цементирующие обломки кварцевого агрегата и заполняющие пустоты в выщелоченном кварце. Такие образования представляют вулканические эксгалляции, описанные как отложения из газа и пара в области действующих или потухших вулканов, и которые могут вступать в реакцию с боковыми (вмещающими) породами или поверхностными водами [Шнейдерхён, 1958].

Вероятная схема формирования золото-серебряных руд на месторождении Купол, содержащих ярозит, сульфиды и селениды золота и серебра, с участием серы сольфатар, вулканических газов и метеорных вод приведена на рис. 5. Самородное золото могло образоваться как на ранних рудообразующих стадиях, так и в результате эксгалляционных процессов [Вергасова и др., 1982, 2000; Symonds et al., 1990; Коржинский и др., 1996; Taran et al., 2000; Зеленский, 2003; Карпов, Алехин, 2009; Чаплыгин и др., 2010]. Сольфатары могут создавать также и определенные условия для перераспределения Au и Ag. Возможно, что образование высокопробного золота происходит при избирательном растворении низкопробного золота водными растворами серной кислоты с преимущественным переходом серебра в раствор и последующем его переотложении, что приводит к снижению Au:Ag отношений в рудах от верхних горизонтов к нижним и формированию обратной зональности [Глухов, 2008]. Здесь же, на месторождении Купол, вероятно, имели место и эксгалляции Hg, Se и Sb — легколетучих элементов (см. рис. 5), которые в заметных количествах установлены в составе рудных минералов (см. табл. 2, 3).

Выявленные специфические черты месторождения Купол и данные, полученные при исследовании минерального состава руд, свидетельствуют о возможных фумарольных процессах. Появление ютенбогаардгита, фишессерита и акантита, по-видимому, может происходить с участием серы и селена сольфатар или при непосредственном взаимодействии вулканических газов ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{Se}$ ,  $\text{S}_2$ ,  $\text{Se}_2$ ), или их конденсатов, или гидротерм, насыщенных вулканическими газами и содержащих растворенные компоненты (такие как  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{S}_{aq}$ ,  $\text{H}_2\text{Se}_{aq}$ ,  $\text{HSeO}_4^-$  и др.). Для фишессерита — это те же реакции (4), (6)—(9), где вместо серы участвуют соединения селена —  $\text{H}_2\text{Se}_g$ ,  $\text{Se}_{2g}$  и  $\text{Se}_{s,l}$ .

Образование ярозита и гетита может происходить в зонах взаимодействия рудных и сольфатарных компонентов в результате следующих реакций с участием гематита или пирита, или Fe-содержащего сфалерита ранних стадий:



Источником калия для реакции (10) служит калиевый полевой шпат, который растворяется под воздействием гидротерм, продуцируя переход  $\text{K}^+$  в раствор. По мере приближения к поверхности в продуктах взаимодействия вулканических газов с водой сульфатные формы начинают преобладать над сульфидными, что приводит к образованию ярозита в низкотемпературных процессах.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение минералов золота и серебра месторождения Купол выявило специфические минеральные ассоциации с самородным золотом, ютенбогардитом, фишессеритом и акантитом в ярозитовых брекчиях, содержащих самородную серу. Установлены не типичные для эпитермальных месторождений характеристики, которые связаны с генетическими особенностями формирования данного объекта. Предложен новый механизм образования сульфидов и селенидов золота и серебра на вулканогенных месторождениях, условно названный палеосольфатарный — при участии вулканических газов или их конденсатов и сублиматов, а также жидкой серы (и селена) и сернокислотных гидротерм.

Авторы благодарны Ю.В. Серёткину и Н.С. Карманову (ИГМ СО РАН) за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 11-05-00504а, 09-05-98593-р\_восток\_а, 48 ПФИ СО и ДВО РАН).

#### ЛИТЕРАТУРА

**Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Лескова Н.В.** Сульфидные соединения золота и серебра в золоторудных месторождениях Восточной Якутии // Отечественная геология, 2008, № 5, с. 24—32.

**Белый В.Ф., Сидоров А.А., Волков А.А., Ващилов Ю.Я.** Палеовулканологическая реконструкция уникального золоторудного района Чукотки // Изв. вузов. Геология и разведка, 2007, № 4, с. 40—47.

**Вартанян С.С., Лоренц Д.А., Сергиевский А.П., Щепотьев Ю.М.** Золото-серебряные руды Кайемравеемского узла Чукотского автономного округа // Отечественная геология, 2005, № 4, с. 10—18.

**Вергасова Л.П., Набоко С.И., Серафимова Е.К., Старова Г.Л., Филатов С.К.** Эксгальационное самородное золото // Докл. АН СССР, 1982, т. 264, № 1, с. 201—204.

**Вергасова Л.П., Старова Г.Л., Серафимова Е.К., Филатов С.К., Философова Т.М., Дунин-Барковский Р.Л.** Самородное золото вулканических эксгальаций шлаковых конусов большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология, 2000, № 5, с. 19—27.

**Гавриленко Г.М., Мельников Д.В., Овсянников А.А.** Современное состояние термального озера в активном кратере вулкана Горелый (Камчатка) // Материалы Всероссийской научной конференции «100-летие Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908—1910 гг.». Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2009, с. 86—95.

**Глухов А.Н.** Региональная геологическая позиция, структура и минералого-геохимическая зональность золото-серебряного месторождения Купол (Чукотский автономный округ) // Вест. СВНЦ ДВО РАН, 2008, № 3, с. 34—45.

**Зеленский М.Е.** Транспорт элементов и условия минералообразования в зонах разгрузки высокотемпературных фумарол на вулкане Мутновский (Камчатка): Автореф. дис. ... к.г.-м.н. Новосибирск, ОИГМ СО РАН, 2003, 20 с.

**Карпов Г.А., Алехин Ю.В.** Минералого-геохимические критерии рудоносности современных вулканогенных флюидных систем Камчатки // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2009, т. 2, с. 755—759.

**Коржинский М.А., Ткаченко С.И., Булгаков Р.Ф., Шмулович К.И.** Составы конденсатов и самородных металлов в сублиматах высокотемпературных газовых струй вулкана Кудрявый (остров Итуруп, Курильские острова) // Геохимия, 1996, № 12, с. 1175—1182.

**Кравцов В.С., Белый В.Ф., Волков А.В., Алексеев В.Ю., Сидоров А.А., Томсон И.Н.** Региональная геолого-структурная позиция золото-серебряного месторождения Купол (Чукотка) // Докл. РАН, 2005, т. 404, № 2, с. 216—219.

**Леонова В.В., Акинин В.В., Гельман М.Л., Глухов А.Н.** Характерные особенности петрографии рудовмещающего комплекса золотосеребряного месторождения Купол (Чукотка), новое определение возраста // Чтения памяти академика К.В. Симакова: тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Магадан, 27—29 ноября 2007 г. Магадан, СВНЦ ДВО РАН, 2007, с. 94—95.

**Лоренц Д.А.** Минеральные парагенезисы в золото-серебряных рудах месторождения Купол (Центральная Чукотка) // Материалы Всероссийской конференции «Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований». Т. 1. М., ИГЕМ РАН, 2010, с. 322—324.

**Мальшев А.И.** Сера в магматическом рудообразовании. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 2004, 189 с.

**Масленицкий И.Н., Чугаев Л.В., Борбат В.Ф., Никитин М.В., Стрижко Л.С.** Металлургия благородных металлов. М., Metallurgia, 1987, 432 с.

**Набоко С.И.** Вулканические эксгальции и продукты их реакций. М., Изд-во АН СССР, 1959, 294 с. (Тр. лаборатории вулканологии, вып. 16).

**Набоко С.И., Главатских С.Ф.** Золото и серебро в вулканогенном флюидном режиме // Вулканология и сейсмология, 1996, № 6, с. 3—19.

**Некрасов И.Я.** Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М., Наука, 1991, 302 с.

**Некрасов И.Я., Самусиков В.П., Лескова Н.В.** Первая находка сульфида  $AgAuS$  — аналога петровскита // Докл. АН СССР, 1988, т. 303, № 4, с. 944—947.

**Нестеренко Г.В., Кузнецова А.П., Пальчик Н.А., Лаврентьев Ю.Г.** Петровскит  $AuAg(S,Se)$  — новый селеносодержащий сульфид золота и серебра // Зап. ВМО, 1984, № 5, с. 602—607.

**Пальянова Г.А., Савва Н.Е.** Сульфиды золота и серебра: состав, минеральные ассоциации, условия образования // Химическая технология, 2007, т. 8, № 9, с. 421—442.

**Пальянова Г.А., Савва Н.Е.** Особенности генезиса сульфидов золота и серебра месторождения Юное (Магаданская область, Россия) // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (7), с. 759—777.

**Полезные ископаемые Австралии и Папуа Новой Гвинеи.** Т. I / Ред. К. Найт. М., Мир, 1980, 658 с.

**Проскурнин В.Ф., Пальянова Г.А., Карманов Н.С., Багаева А.А., Гавриш А.В., Петрушков Б.С.** Первая находка ютенбогаардита на Таймыре (рудопроявление Конечное) // Докл. РАН, 2011, т. 441, № 4, с. 527—531.

**Савва Н.Е., Пальянова Г.А.** Генезис сульфидов золота и серебра на месторождении Улахан (северо-восток России) // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (10), с. 1028—1042.

**Савва Н.Е., Бянкин М.А.** Au-Ag месторождение Купол — типичный или нетипичный объект? // Чтения памяти академика К.В. Симакова: тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Магадан 25—27 ноября 2009 г. Магадан, СВНЦ ДВО РАН, 2009, с. 137—138.

**Савва Н.Е., Пальянова Г.А., Бянкин М.А.** О возможном механизме образования ютенбогаардита и фишессерита на месторождении Купол // Материалы Всероссийской конференции «Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований». Т. II. М., ИГЕМ РАН, 2010а, с. 173—176.

**Савва Н.Е., Пальянова Г.А., Колова Е.Е.** Минералы золота и серебра в зоне вторичного сульфидного обогащения (рудопроявление Крутое, Северо-Восток России) // Вест. СВНЦ ДВО РАН, 2010б, № 1, с. 33—45.

**Сергиевский А.П.** Геология Кайемравеемского рудного узла и условия локализации золотосеребряного оруденения: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. М., ЦНИГРИ, 2006, 27 с.

**Синдеева Н.Д.** Минералогия, типы месторождений и основные черты геохимии селена и теллура. М., Изд-во АН СССР, 1959, 257 с.

**Чаплыгин И.В.** Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские о-ва): Автореф. дис. ... к.г.-м.н. М., ИГЕМ РАН, 2009, 26 с.

**Чаплыгин И.В., Юдовская М.А., Дистлер В.В.** Типоморфизм и механизмы образования эксгальционного золота на активных вулканах // Материалы Всероссийской конференции «Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований». Т. II. М., ИГЕМ РАН, 2010, с. 292—294.

**Шнейдерхён Г.** Рудные месторождения / Ред. В.И. Смирнов. М., ИЛ, 1958, 501 с.

**Archibald S.M., Migdisov A.A., Williams-Jones A.E.** The stability of Au-chloride complexes in water vapor at elevated temperatures and pressures // Geochim. Cosmochim. Acta, 2001, v. 65, p. 4413—4423.

**Barton M.D., Kieft C., Burke E.A.J., Oen I.S.** Uytенбогаардтита, a new silver-gold sulfide // Canad. Miner., 1978, v. 16, p. 651—657.

- Bychkov A.Yu.** Experimental study of silver transport in gaseous hydrogen sulfide at 300 °C // Goldschmidt Conference Abstracts, 2005, p. A736.
- Lueth V.W., Rye R.O., Peters L.** «Sour gas» hydrothermal jarosite: ancient to modern acid-sulfate mineralization in the southern Rio Grande Rift // Chem. Geol., 2005, v. 215, p. 339—360.
- Majzlan J.** Ore mineralization at the Rabenstein occurrence near Banska Hodrusa, Slovakia // Miner. Slovaca, 2009, № 41, p. 45—54.
- Marcoux E.** Gold and volcanoes: epithermal gold deposits, a review // C.R. Acad. Sci. Ser. 2. Fass. A., 1995, v. 321, № 9, p. 723—735.
- Migdisov A.A., Williams-Jones A.E., Suleimenov O.M.** Solubility of chlorargyrite (AgCl) in water vapor at elevated temperatures and pressures // Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, v. 63, p. 3817—3827.
- Okrugin V., Zelenskii M., Marynova V., Okrugina A., Senyukov S., Sergeeva S.** Last news about volcanic activity in Kamchatka peninsula: Mutnovskii and Gorelyi volcanoes especially // Bull. Research Centre for North Eurasia and North Pacific Regions, 2001, v. 1, p. 146—163.
- Pasternack G.B., Varekamp J.C.** Volcanic lake systematics. I. Physical constraints // Bull. Volcanol., 1997, v. 58, p. 528—538.
- Symonds R.B., Rose W.I., Gerlach T.M., Briggs P.H., Harmon R.S.** The evaluation of gases, condensates, and SO<sub>2</sub> emissions from Augustine Volcano, Alaska: the degassing of a Cl-rich volcanic system // Bull. Volcanol., 1990, v. 52, p. 355—374.
- Taran Yu.A.** Geochemistry of volcanic and hydrothermal fluids and volatile budget of the Kamchatka—Kuril subduction zone // Geochim. Cosmochim. Acta, 2009, v. 73, № 4, p. 1067—1094.
- Taran Yu.A., Bernard A., Gavilanes J.C., Africano F.** Native gold in mineral precipitates from high-temperature volcanic gases of Colima volcano. Mexico // Appl. Geochem., 2000, v. 15, p. 337—346.
- White N.C., Hedenquist J.W.** Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration // SEG Newsletter, 1995, № 23, p. 8—13.
- Williams-Jones A.E., Heinrich C.A.** Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits // Econ. Geol., 2005, v. 100, p. 1287—1312.
- Zein D.Yu., Migdisov A.A., Williams-Jones A.E.** The solubility of gold in hydrogen sulfide gas: an experimental study // Geochim. Cosmochim. Acta, 2007, v. 71, p. 3070—3081.

*Рекомендована к печати 15 июля 2011 г.  
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию  
10 ноября 2010 г.*