ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, 2012, том 54, № 4, с. 350–359

УДК. 553.411:553.21/24

РУДООБРАЗОВАНИЕ НА Au-Ag-ЭПИТЕРМАЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КУПОЛ, ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)

© 2012 г. А. В. Волков*, В. Ю. Прокофьев*, Н. Е. Савва, А. А. Сидоров*, М. А. Бянкин**, К. В. Уютнов*, Е. Е. Колова****

**Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН 119017, Москва, Ж-17, Старомонетный пер., 35*

***Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН 685010, г. Магадан, ул. Портовая, 16*

Поступила в редакцию 09.04.2012 г.

Au-Ag-эпитермальное месторождение Купол – крупнейшее месторождение этого типа на Северо-Востоке России, расположено во внешней зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. В статье рассмотрены результаты термобарогеохимических исследований флюидных включений в кварце из жильных рудных тел месторождения Купол, проведено сопоставление полученных результатов с данными по месторождениям Двойной и Арыкваам. Результаты исследования водных вытяжек из включений месторождений Двойной и Купол свидетельствуют о сходстве химического состава рудообразующих флюидов по большинству элементов. Существенное различие рудообразующих флюидов изученных месторождений состоит главным образом в наличии заметных концентраций сульфата в рудообразующем флюиде месторождения Купол, что характерно для эпитермальных месторождений алунитового подтипа (“high sulfidation”). Необходимо отметить, что включения в аметисте и кварце из рудных жил месторождений Купол и Двойной, в отличие от безрудных жил Арыкваама, содержат растворы, более чем в 2–3 раза насыщенные солями. Полученные данные подтверждают выдвинутую ранее гипотезу об участии в рудообразовании месторождения Купол фумарол или сольфатар.

ВВЕДЕНИЕ

Месторождение Купол расположено в Анадырском районе Чукотского автономного округа, в 192 км на юго-восток от ближайшего крупного населенного пункта – г. Билибино (фиг. 1; фиг. 2а, врезка).

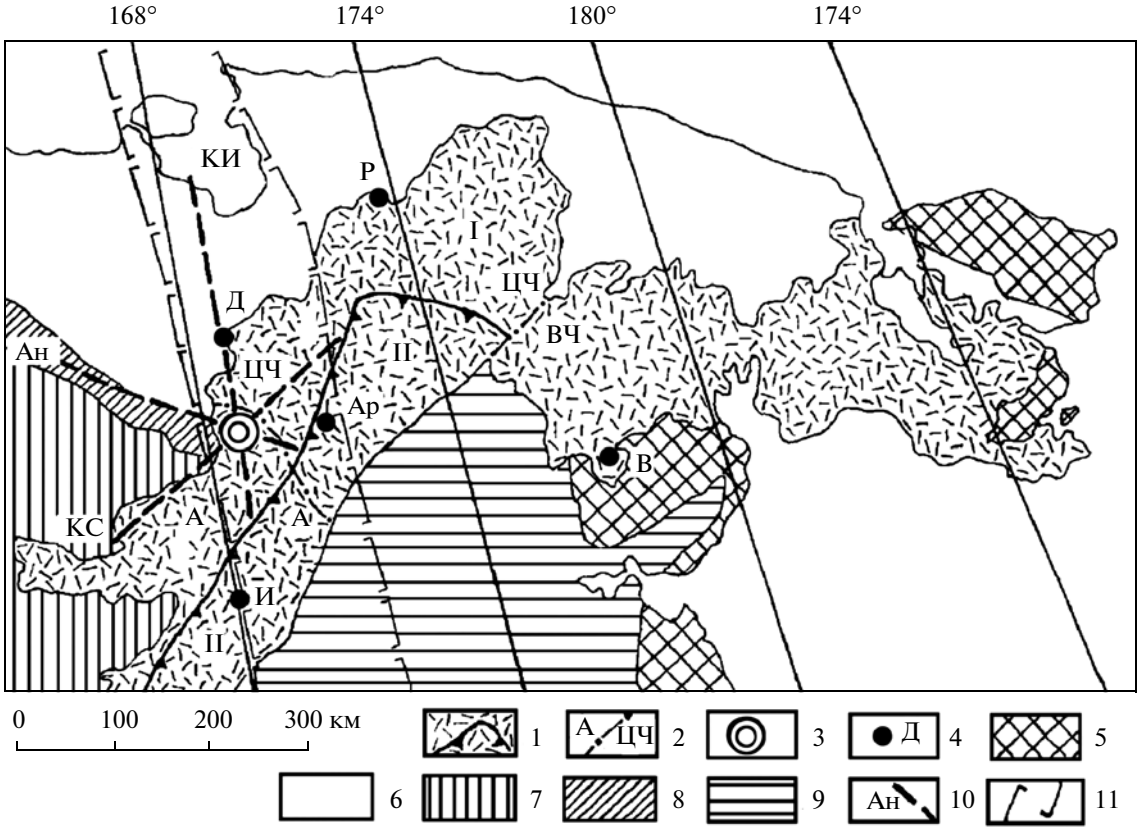
В 1966 г. Южно-Уткувеемской геологосъемочной партией (масштаб 1 : 200000) под руководством В. П. Куклева было выявлено рудопроявление Оранжевое с содержаниями Au 3 г/т и Ag до 660 г/т, которые в то время не представляли промышленного интереса. И только в 1995 г. Имревеемским геохимическим отрядом под руководством В.В. Загоскина в результате заверочных работ на рудопроявлении была вскрыта и прослежена на 1.5 км мощная жильная зона с видимым Au (фиг. 2б). Выявленное месторождение по особенностям рельефа поверхности получило название Купол.

В 1998–2007 гг. на месторождении проводились поисково-оценочные и разведочные работы, подтвердившие его крупный масштаб. В феврале 2007 г. канадская кампания “Кинросс” приобрела права на разведку и разработку месторождения Купол. С мая 2008 г. и по настоящее время с месторождения Купол получено более 62.2 т Au и 622 т Ag[1]. На 31 декабря 2011 г., по данным кампании “Кинросс”[1] запасы и ресурсы месторождения составляют: Au – 93 т, Ag – 1155 т, при средних содержаниях 9.73 г/т и 120.8 г/т соответственно.

В ИГЕМ РАН ранее проведено изучение глубинного строения рудного района месторождения Купол, которое показало, что рудный район находится на восточном продолжении крупного ареала раннемеловых гранитоидов, в месте смены разрезов вулканогенных толщ Центрально-Чукотского сектора и Анадырского сектора Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП). Фундамент упомянутых секторов представлен террейнами пассивной континентальной окраины и островодужным террейном с различной металлогенической специализацией, что нашло отражение в составе золото-серебряных руд месторождения Купол и, вероятно, определило его масштаб и богатство (Кравцов и др., 2005; Сидоров и др., 2008). Выполненная палеовулканологическая реконструкция показала, что вулканоструктура, вмещающая месторождение Купол,

Адрес для переписки: А.В. Волков. E-mail: alexandr@igem.ru

[1] http://www.kinross.com/operations/operation-kupol-russia.aspx



Фиг. 1. Положение Вармекайской кальдеры, вмещающей месторождение Купол в структурах Чукотки.

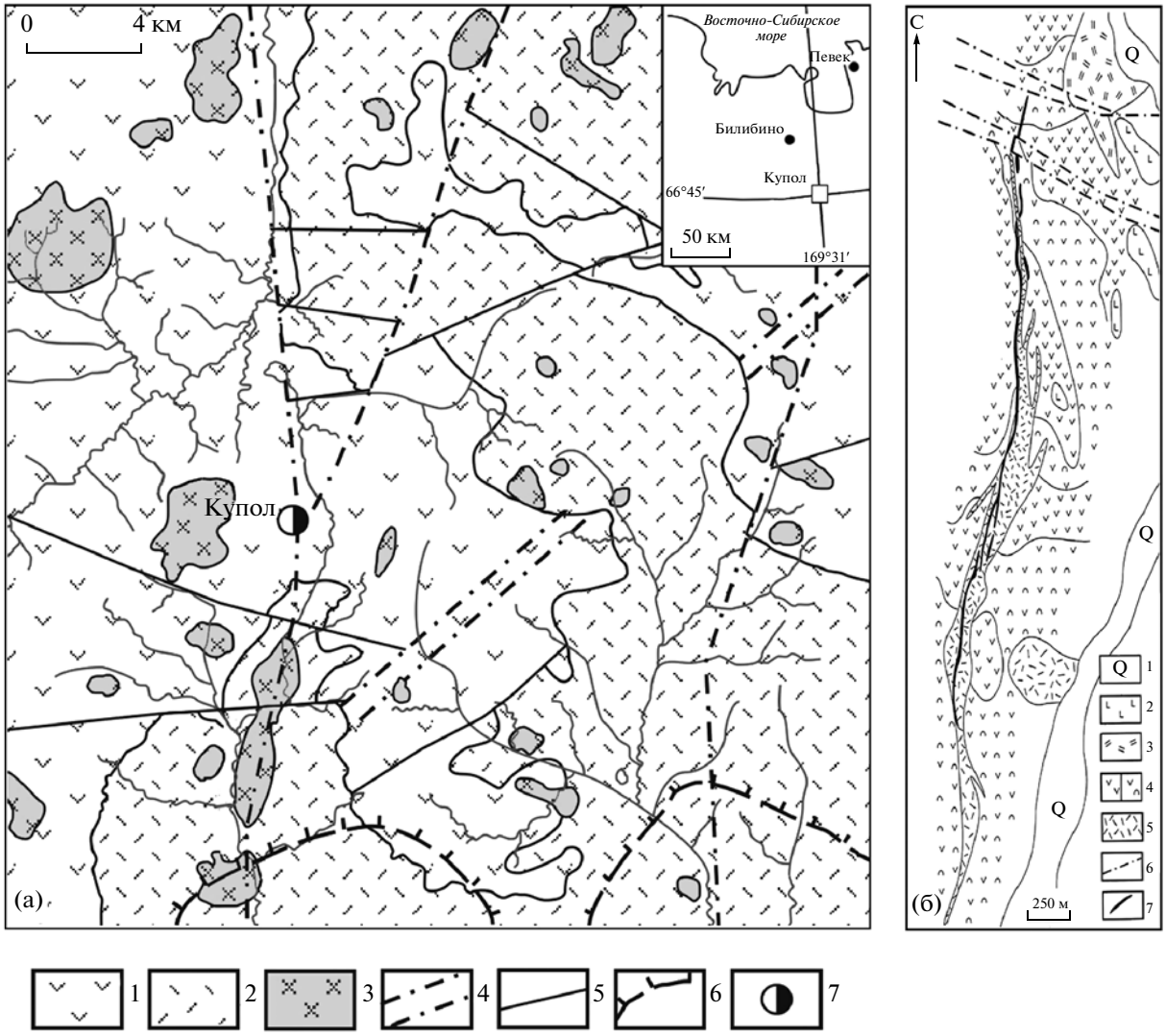
1 – ОЧВП и граница его внешней (I) и внутренней (II) зон; 2 – границы Анадырского (А) и Центрально-Чукотского (ЦЧ) секторов и Восточно-Чукотской фланговой зоны (ВЧ); 3 – Вармекайская кальдера, вмещающая месторождение Купол; 4 – месторождения и наиболее значительные рудопроявления золото-серебряного типа (Ар – Арыкваам, Д – Двойной, Р – Сопка Рудная, В – Валунистое, И – Иргуней); 5 – Эскимосский срединный массив; 6 – Анюйская и Чаунская зоны Чукотской складчатой системы; 7 – Олойская зона Алазейско-Олойского островодужного террейна; 8 – Южно-Анюйская рифтогенная зона; 9 – Анадырско-Корякская складчатая система; 10 – зоны региональных разломов в фундаменте внешней зоны ОЧВП, определившие положение Вармекайской кальдеры (КИ – Кайемравеем-Имравеемская, КС – Крестовско-Саламихинская, Ан – Анюйская); 11 – границы скрытого трансрегионального Азиатско-Тихоокеанского линеамента (Ващилов, 1993).

принципиально подобна таким известным рудоносным кальдерным комплексам с резургентным куполообразованием как, например, Сан-Хуан (Колорадо, США), а представление о Кайемравеемском вулканическом поле как о стратовулкане (Вартанян и др., 2005) неправомерно. Наша интерпретация морфоструктуры, возникшей при извержениях андезитов верхней толщи еропольской свиты, позволяет выделить здесь щитообразный палеовулкан (Сидоров и др., 2007; Белый и др., 2008). Это первый случай андезитового щитообразного палеовулкана, выявленного в Охотско-Чукотском поясе. Геологическое строение и состав руд месторождения приведены в ряде публикаций ЦНИГРИ и СВКНИИ ДВО РАН (Вартанян и др., 2005; Леонова и др., 2007; Савва, Бянкин, 2009 и др.). Термобарогеохимические условия рудообразования на месторождении Купол до последнего времени не изучались.

В 2011–2012 гг. в ИГЕМ РАН проведено исследование флюидных включений из образцов кварца и аметиста главного рудного тела месторождения. Полученные результаты указывают на специфические особенности процесса рудообразования месторождения Купол. Кроме того, в статье приводятся первые данные изучения флюидных включений из руд эпитермального золото-серебряного месторождения Двойной – второго по крупности в ОЧВП. Изучение рудообразующих флюидов с целью установления их природы на протяжении многих десятков лет является одной из центральных проблем в теории эндогенного рудообразования (Бетехтин, 1955; Бортников, 2006 и др.).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В районе месторождения (фиг. 1, фиг. 2а) с юго-запада на северо-восток, на сравнительно корот-



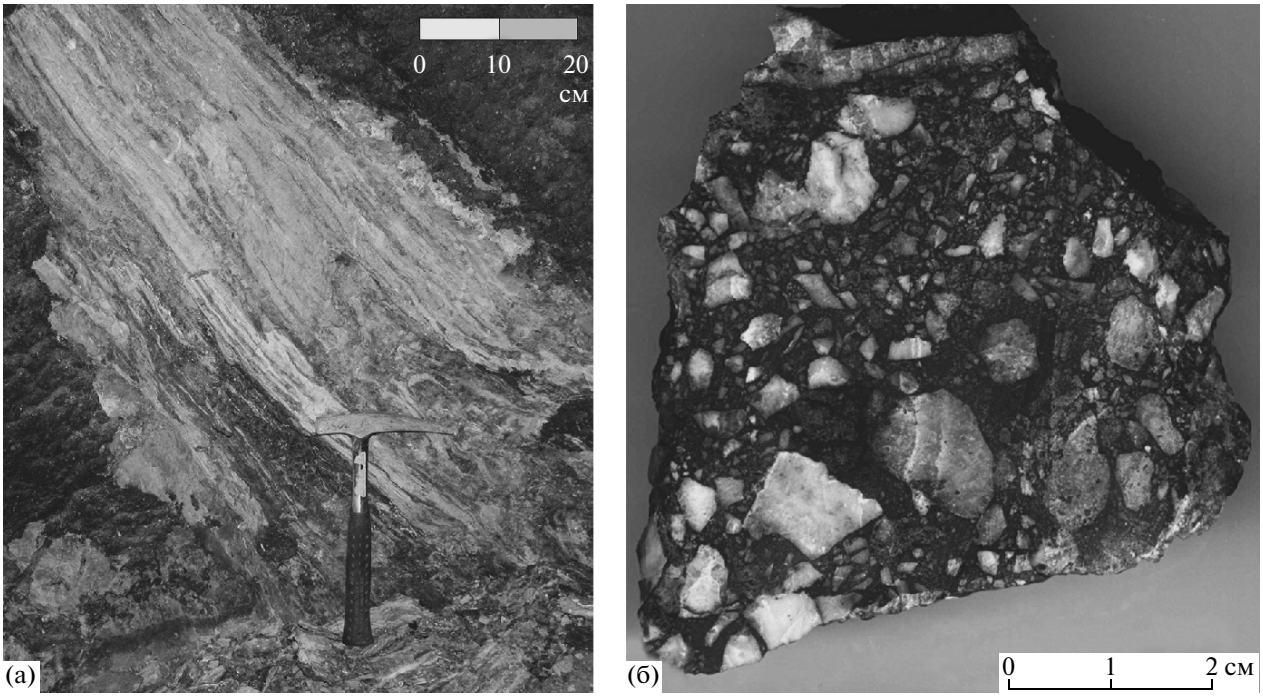
Фиг. 2. Схематические структурно-металлогеническая (а) и геологическая (б) карты рудного района и месторождения Купол (по В.В. Загоскину, 1995 г. и Н.В. Григорьеву, С.В. Филонову, 2004 г.; с упрощениями).

а: 1 – лавы и туфы андезитов и андезито-базальтов средней толщи, 2 – игнимбриты, туфы и лавы риолитов верхней толщи, 3 – интрузивные и субвулканические тела различного состава, 4 – осевые зоны крупных разломов, 5 – прочие разломы, 6 – границы палеокальдеры, 7 – месторождение Купол.

б: 1 – четвертичные аллювиальные отложения, 2 – покровы палеогеновых базальтов, 3, 4 – позднемеловые вулканиты: 3 – верхняя толща: риолиты, 4 – средняя толща: переслаивание: андезитов, андезито-базальтов с агломератовыми лапиллиевыми и пепловыми туфами, 5 – позднемеловые дайки риолитов, риодацитов, 6 – разломы, 7 – рудные тела: адуляр-кварцевые жилы и зоны прожилкования.

ком расстоянии происходит смена существенно базальт-андезитового типа разреза эффузивов Анадырского сектора Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (гомодромная последовательность) на существенно риолит-дацит-андезито-базальтовый тип разреза (антидромная последовательность) Центрально-Чукотского сектора (Белый и др., 2008).

Причем в Анадырском секторе внешняя зона наложена на структуры Олойской складчатой системы мезозоид, которая на орогенной стадии в поздней юре–апте испытывала по преимуществу депрессивный тип развития, сопровождавшийся интенсивным андезито-базальтовым вулканизмом. В Центрально-Чукотском секторе основанием внешней зоны Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) является Чукотская складчатая система (пассивная окраина – шельф Арктического палеоконтинента), охваченная в позднем триасе общим поднятием и мощным гранитоидным магматизмом. Олойская и Чукотская складчатые системы разделены Южно-Анюйским рифтогенным прогибом (или сутурой – след закрывшегося океана). Продолжение Южно-Анюй-



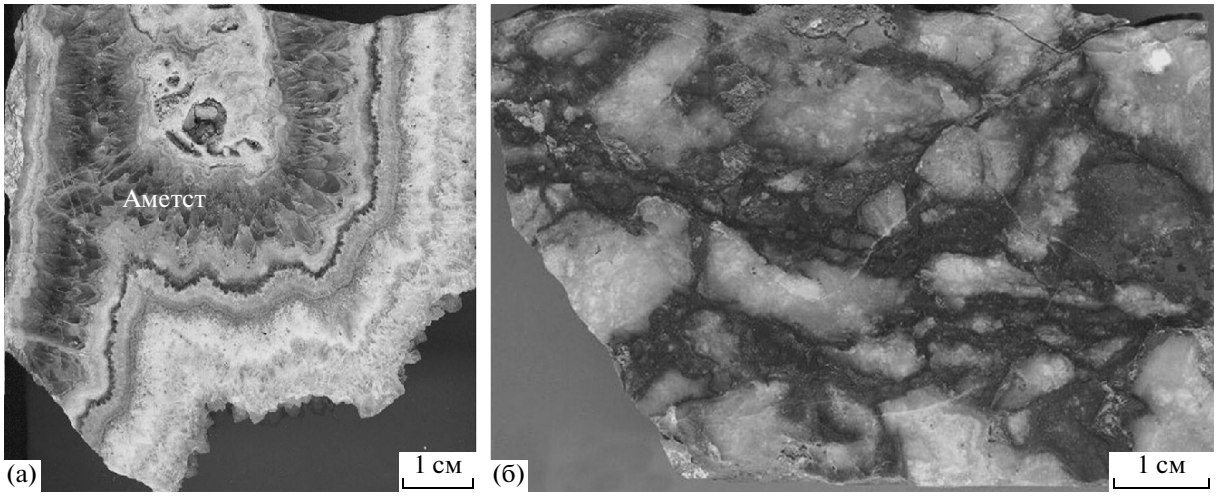
Фиг. 3. Ярозит в р. т. 1 месторождения Купол (а) и пострудная кварцевая брекчия с ксенолитами полосчатой кварцевой жилы, со стекловидным матриксом черного цвета (б).

ского прогиба под внешней зоной ОЧВП фиксирует смену типов разрезов вулканитов Анадырского и Центрально-Чукотского секторов.

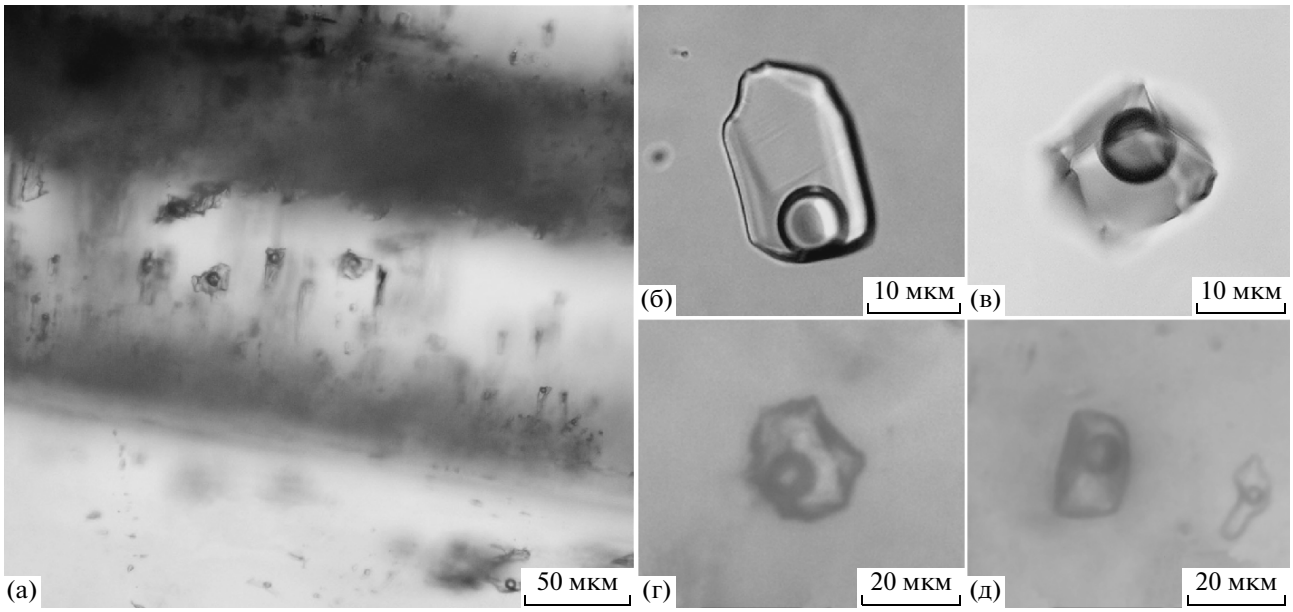
Положение на границе между Анадырским и Центрально-Чукотскими секторами ОЧВП (фиг. 1) позволяет предполагать особую специфику образования месторождения Купол. Так, в результате палеореконструкции (Белый и др., 2008) выяснилось, что месторождение Купол, весьма вероятно, локализовано в северо-западном секторе щитообразного андезитового палеовулкана, возникшего после формирования Вармекайской палеокальдеры и впервые установленного в ОЧВП. Здесь месторождение приурочено к длительно развивавшемуся побочному субвулканическому комплексу, на заключительной стадии развития которого формировались протяженные меридиональные дайки кислого состава, определяющие размещение рудных тел. Возраст вулканитов, вмещающих месторождение, по данным Ar-Ar-датирования, – 94–85 млн. лет (Леонова и др., 2007). Важно отметить, что большая часть рудных тел рудопроявлений Кайемравеемского района также имеет субмеридиональное простирание.

Вторая важная структурная особенность месторождения Купол – формирование золото-сереброносных жильных зон контролируется мощными и протяженными дайками и силлами риолитов (фиг. 2б). Главная рудовмещающая структура месторождения – субмеридиональный взброс, по которому породы восточного крыла подняты относительно западного. Амплитуды перемещения по взбросу достигают 40 м. Мощность рудовмещающего разлома достигает 22 м, а вместе с дайкой – 40 м. Рудные тела месторождения имеют меридиональное простирание, согласное с отмеченным выше разломом (фиг. 2а, 2б), и представлены кварцевыми жилами и реже – брекчиями с кварцевым цементом; падение жил – восточное под углом 75°–85°.

Третья важная в промышленном отношении особенность структуры месторождения – значительная протяженность рудоносной зоны по простиранию (около 4 км) и на глубину (более 450 м), что не типично для эпитермальных золото-серебряных месторождений. По-видимому, эта особенность обусловлена формированием рудоносной жильной зоны месторождения в жерловых фациях упоминавшегося выше палеовулкана. В пользу такого вывода говорит также наличие в рудных телах месторождения большого количества брекчий и мегабрекчий с кокардовыми текстурами обрастания обломков различного состава халцедон-адуляровым агрегатом (с золото-серебряной минерализацией), а также разнообразие иных брекчий и даже эксплозивных брекчий внутри рудного тела (фиг. 3а). Обращает на себя внимание и высокое содержание ярозита (при общей низкой сульфидности руд), который цементирует обломки кварцевого агрегата (фиг. 3б). Подобные образования не являются следствием экзогенных процессов, они типичны для фумарол



Фиг. 4. Главные текстуры руд р.т. 1 месторождения Купол.
а – крустификационная текстура; б – брекчиевая текстура.



Фиг. 5. Расположение первичных двухфазовых флюидных включений по зонам роста в кристаллах аметиста месторождения Купол (а) и двухфазовые флюидные включения в аметисте месторождений: Арыкваам (б), Купол (в) и Двойное (г, д).

или сольфатар, сопровождающих вулканические извержения, и характеризуются высокими давлениями и температурами, доходящими до 300°C (Савва, Бянкин, 2009). В рудах месторождения отмечено преобладание сульфида серебра (акантита) над сульфосолями Ag. Для месторождения характерна обратная зональность отношения Au/Ag – последовательное снижение от поверхности на глубину от 1 : 3 до 1 : 100 (Савва, Бянкин, 2009).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

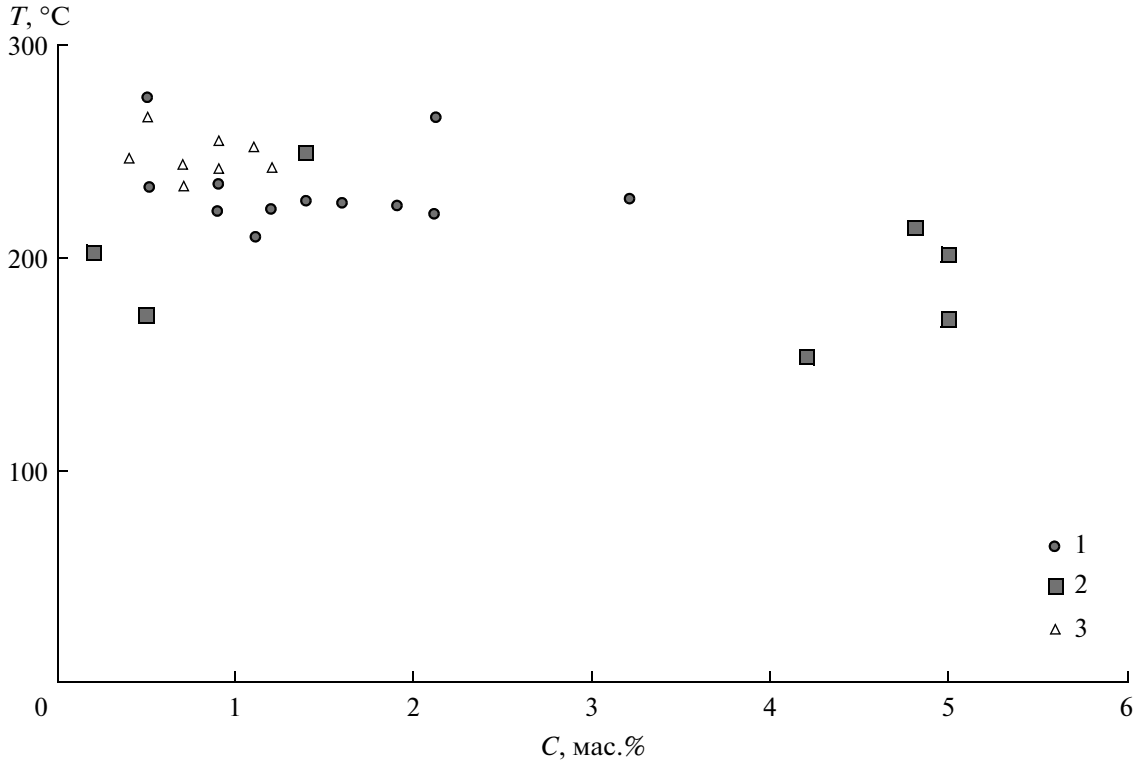
Микротермометрические исследования флюидных включений выполнены в секторе минераграфии ИГЕМ РАН при помощи измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы “Linkam” (Англия), микроскопа “Amplival” (Германия), видеокамеры и управляющего компьютера. Комплекс позволяет в режиме реального времени производить измерения

Таблица 1. Результаты исследования флюидных включений в минералах месторождений Купол, Двойной и Арыкваам (Северо-Восток России)

№ пробы	Минерал, тип включений	n	$T_{гом}$, °C	$T_{эвт}$, °C	$T_{пл.\ льда}$, °C	$C_{солей}$, мас. %-экв. NaCl	d, г/см^3
			Купол				
KP01	Кварц, П	4	276	–30	–0.3	0.5	0.75
	»	4	235	–31	-0.5	0.9	0.82
	»	3	234	–33	-0.3	0.5	0.82
	»	3	228	–33	–0.8	1.4	0.84
	»	4	226	–32	–0.9	1.6	0.85
	Кварц, П-В	3	222	–32	–0.5	0.9	0.84
	»	5	211	–30	–0.6	1.1	0.86
Kp04-295a-	Аметист П	11	267	–21	–1.2	2.1	0.78
328.8	» П-В	8	222	–21	–1.2	2.1	0.86
Купол2	Кварц, П	3	229	–34	–1.9	3.2	0.86
	»	6	225	–33	–1.1	1.9	0.85
	»	5	224	–28	–0.7	1.2	0.84
			Двойной				
DV05	Кварц, П	7	251	–27	–0.8	1.4	0.80
	»	6	216	–29	–2.9	4.8	0.89
	» П-В	6	203	–33	–3.0	5.0	0.90
	»	4	202	–28	–0.1	0.2	0.87
	»	3	173	–31	–0.3	0.5	0.90
	»	3	172	–30	–3.0	5.0	0.95
	»	3	154	–32	–2.5	4.2	0.95
			Арыкваам				
AM-1	Аметист, П	2	267 Г	–28	–0.3	0.5	Не опр.
	»	14	248	–30	–0.2	0.4	0.80
	»	9	245	–33	–0.4	0.7	0.82
	»	7	243	–36	–0.5	0.9	0.81
	»	3	242	–31	–0.5	0.9	0.81
	» П-В	23	237	–33	–0.5	0.9	0.82
	»	8	234	–33	–0.4	0.7	0.82
AM-2	Аметист, П	4	257	–29	–0.5	0.9	0.79
	»	3	254	–30	–0.6	1.1	0.80
	»	5	244	–28	–0.7	1.2	0.81

Примечание. П – первичные включения, П-В – первично-вторичные включения. n – количество включений, d – плотность флюида.

температур фазовых переходов в интервале от –196 до 600°C, наблюдать за ними при больших увеличениях и получать цифровые микрофотографии. Индивидуальные флюидные включения изучались в двусторонне полированных пластинах толщиной 0.3–0.5 мм. После визуального просмотра и фотографирования препараты отклеивались от стекла, промывались спиртом и от них механически отделялись кусочки кварца с выбранными для исследований включениями. Концентрация солей для включений рассчитывалась по температуре плавления льда ($T_{пл.\ льда}$) с использованием дан-



Фиг. 6. Диаграмма “температура–концентрация” для рудообразующего флюида месторождений: Купол (1), Двойной (2), Арыкваам (3).

ных из работы (Bodnar, Vityk, 1994). Солевой состав растворов определялся по температурам эвтектики ($T_{эвт}$) (Борисенко, 1977). Давление оценивалось для гетерогенного флюида по сингенетичным существенно газовым и газо-жидким включениям как давление водяного пара, поскольку углекислоты во включениях при термо- и криометрических исследованиях обнаружено не было. Оценки концентраций солей и давлений водяного пара проводились с использованием программы “FLINCOR” (Brown, 1989).

Анализ водных вытяжек из включений комплексом методов, включающим газовую и ионную хроматографию и ICP-MS, был выполнен из навесок 0.5 г фракции 0.5–0.25 мм в ЦНИГРИ (аналитик – Ю.В. Васюта) по методике, опубликованной в работе (Кряжев и др., 2006). Предварительно во включениях той же навески определялось количество воды для расчета концентраций элементов в гидротермальном растворе. Анализировались также углекислота и метан, а после приготовления вытяжки в растворе определялись Cl, K, Na, Ca, Mg и все элементы, которые удалось обнаружить методом ICP-MS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

При визуальном изучении флюидных включений в кварце и аметисте из руд р.т. 1 (фиг. 4) месторождения Купол были обнаружены два типа флюидных включений: 1) двухфазовые газо-жидкие включения (фиг. 5б–5д), и 2) малоплотные газовые включения (в одном образце “Купол 2”). Большинство флюидных включений имеет форму отрицательного кристалла кварца (фиг. 5б). Иногда встречаются флюидные включения неправильной формы. Размер включений изменялся от 1 до 23 мкм. Газовые включения (тип 2) приурочены к одним и тем же зонам или трещинам, что и газо-жидкие включения (тип 1) с большим газовым пузырьком (т.е. наиболее высокотемпературные), образуя единую ассоциацию флюидных включений. Наличие такой ассоциации свидетельствует о гетерогенном состоянии рудообразующего флюида (вскипании). Для термо- и криометрических исследований выбирались прежде всего флюидные включения, расположенные в зонах роста или равномерно распределенные по объему отдельных зерен кварца и отнесенные нами к первичным включениям (фиг. 5а).

Результаты термо- и криометрических исследований 59 индивидуальных флюидных включений в кварце месторождения Купол приведены в табл. 1 и на фиг. 5, 6. Двухфазовые газо-жидкие включения в кварце и аметисте рудных жил месторождения Купол гомогенизируются в жидкую фазу при температурах от 276 до 222°C и содержат водный раствор с концентрацией солей от 3.2 до 0.5 мас. %-экв. NaCl. В растворе этих включений преобладают NaCl и $MgCl_2$ ($T_{эвт}$ = –34...–21°C), Плотность флюида составляет 0.75–0.86 г/см^3. В образце ("Купол 2") встречены существенно газовые включения, сингенетичные поздним газо-жидким с температурой гомогенизации 229°C. Давление водяного пара составляет 25 бар, что свидетельствует о приповерхностных условиях (250 м для гидростатического давления) в период залечивания трещин и образования поздних включений.

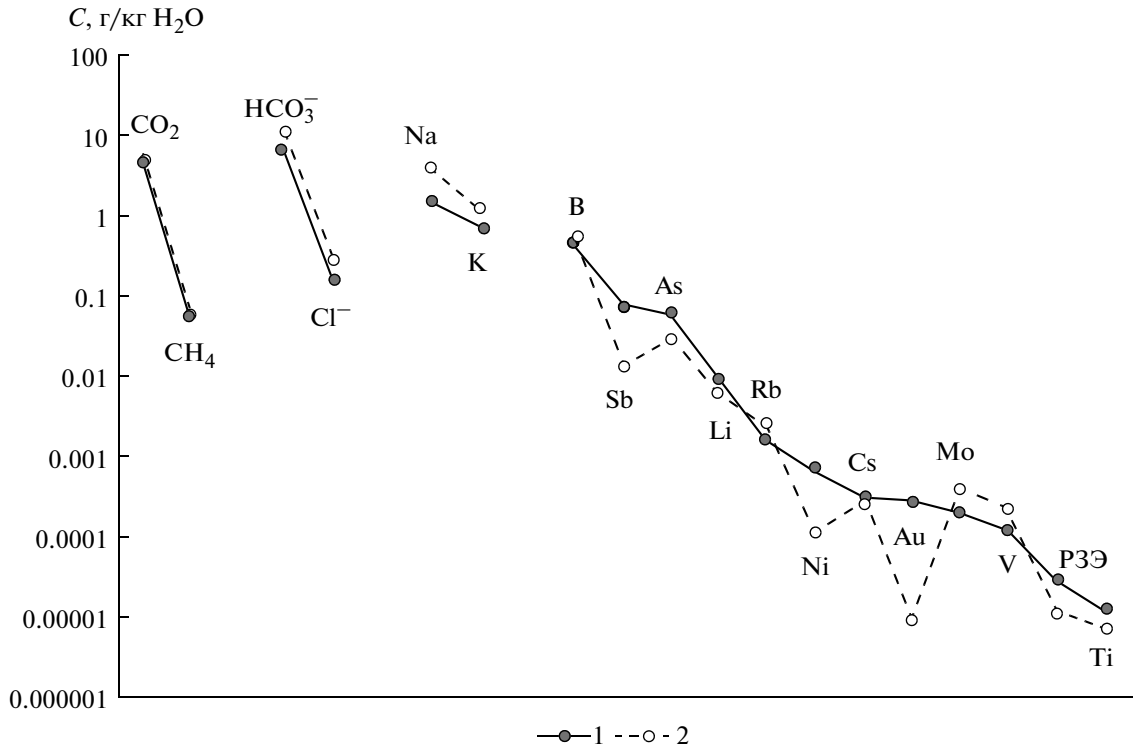
Состав растворов приведен в табл. 2 и на диаграмме фиг. 7. Во флюиде среди катионов главную роль играют (г/кг H_2O): Na (1.6) и K (0.75), а Ca (0.36) и Mg (0.40) находятся в подчиненном количестве. Установлены заметные количества таких компонентов, как (г/кг H_2O): Cl^- (0.16), SO_4^{2-} (1.3), HCO_3^- (6.6), CO_2 (4.8) и CH_4 (0.05), а также B (0.49). Кроме того, в составе флюида выявлены многие микрокомпоненты (мг/кг раствора): Sb (78), Ba (75), As (56), Mn (12), Li (9.5), Zn (7.0), Sr (5.6), Rb (1.6), Ni (0.66), Cs (0.3), Au (0.27), Mo (0.2), Co (0.18), V (0.12), Cd (0.05) и РЗЭ (0.025).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Если сравнить данные, полученные по месторождению Купол, с данными по аналогичному месторождению Двойной, расположенному в 80 км к северу (фиг. 1), то можно заключить, что параметры и состав рудообразующих флюидов этих месторождений очень близки (фиг. 6, 7; табл. 1, 2). На фиг. 6 и в табл. 1 видно, что проба рудного кварца месторождения Двойной более низкотемпературная, чем исследованные пробы месторождения Купол. Возможно, изучаемый срез месторождения Купол имел несколько большую глубину формирования, чем месторождение Двойной. Кроме того, в сравнительном плане были изучены безрудные эпитермальные аметистовые жилы рудного поля Арыкваам (расположено в 100 км к юго-востоку от месторождения Купол) из коллекции В.Ф. Белого. В аметисте из жил Арыкваама обнаружены существенно газовые и газо-жидкие включения (фиг. 5а). Газовые включения содержат водяной пар и водный раствор с концентрацией солей 0.5 мас. %-экв. NaCl. Они гомогенизируются в газ при температуре 267°C, давление водяного пара составляет 50 бар. Газо-жидкие

Таблица 2. Состав растворов флюидных включений в кварце месторождений Купол и Двойной

Элемент	KP 01 (Купол)	DV 05 (Двойной)
Макрокомпоненты, г/кг H_2O		
CO_2	4.77	5.36
CH_4	0.05	0.06
Cl^-	0.16	0.29
SO_4^{2-}	1.33	–
HCO_3^-	6.64	11.88
Na	1.62	4.06
K	0.75	1.23
Ca	0.36	–
Mg	0.40	–
Микрокомпоненты, 10^{-3} г/кг H_2O		
As	56.5	31.1
Li	9.6	6.4
B	492	566
Rb	1.6	2.5
Cs	0.31	0.27
Sr	5.6	–
Mo	0.20	0.41
Sb	78	13
Cu	–	0.76
Zn	7.0	–
Cd	0.05	–
Pb	–	0.06
Bi	–	0.002
Al	–	232
Ge	–	0.10
Sc	–	2.4
Ni	0.66	0.11
Ti	–	0.02
Mn	12.3	–
Co	0.18	–
V	0.12	0.21
Cr	–	0.17
Y	–	0.005
Zr	0.003	–
Ba	74.8	–
W	–	0.07
Au	0.27	0.01
Tl	0.01	0.01
REE	0.03	0.01
La	0.01	–
Ce	–	0.002
Nd	0.003	0.002
Sm	0.003	0.01
Eu	0.01	–
Yb	0.003	–
Hf	–	0.002
Ta	–	0.002
K/Rb	467	497



Фиг. 7. Сравнение составов рудообразующих флюидов месторождений Купол (1) и Двойной (2).

включения содержат хлоридный водный раствор с концентрацией солей 1.2–0.4 мас. %-экв. NaCl, их $T_{гом}$ = 257–234°C. На фиг. 5 видно, что включения в кварце и аметисте из рудных жил месторождений Купол и Двойной, в отличие от безрудных жил месторождения Арыкваам, содержат растворы, в 2–3 раза более насыщенные солями.

Данные исследования химического состава водных вытяжек из включений месторождений Двойной и Купол (фиг. 7; табл. 2) также свидетельствуют о сходстве химического состава рудообразующих флюидов по большинству элементов. Существенное различие рудообразующих флюидов изученных месторождений состоит главным образом в наличии заметных концентраций сульфата в рудообразующем флюиде месторождения Купол, что характерно также для эпитермальных месторождений алунитового подтипа (“high sulfidation”).

Полученные данные свидетельствуют в пользу выдвинутой ранее гипотезы об участии в рудообразовании месторождения Купол фумарол или сольфатар (Савва, Бянкин, 2009). Кроме того, они подтверждают вывод о связи месторождения Купол не только с золото-сульфидной, но и с медно-порфировой формацией (Сидоров и др., 2007).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 12–05–01083-а, 11–05–00006-а, 11–05–00007-а, 11–05–00504-а), ДВО РАН – №12–II–0–08–2 и Минобрнауки (Госконтракт № 16.515.11.5014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белый В.Ф., Сидоров А.А., Волков А.В. и др. Структура и развитие Каемравеемского рудного поля (новый рудный район Чукотки) // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 149–157.

Бетехтин А.Г. Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М.: Изд-во АН, 1955. С. 125–278.

Бортников Н.С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах // Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48. № 1. С. 1–26.

Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.

Вартанян С.С., Лоренц Д.А., Сергиевский А.П. и др. Золото-серебряные руды Кайемравеемского узла Чукотского автономного округа // Отечественная геология. 2005. № 4. С. 10–16.

Ващилов Ю.Я. Глубинная структура, геодинамика и геокинематика Северо-Востока России // Структура и геокинематика литосферы Северо-Востока России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1993. С. 19–43.

Кравцов В.С., Белый В.Ф., Волков А.В. и др. Региональная геолого-структурная позиция золото-серебряного месторождения Купол (Чукотка) // Докл. РАН. 2005. Т. 404. № 2. С. 616–620.

Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP-MS при анализе состава рудообразующих флюидов // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 2006. № 4. С. 30–36.

Леонова В.В., Акинин В.В., Гельман М.Л. и др. Характерные особенности петрографии рудовмещающего комплекса золото-серебряного месторождения Купол (Чукотка), новое определение возраста // Чтения памяти академика К. В. Симакова. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2007. С. 94–95.

Савва Н.Е., Бянкин М.А. Au-Ag-месторождение Купол – типичный или не типичный объект? // Чтения памяти академика К.В. Симакова: Тез докл. Всеросс. науч. конф (Магадан 25–27 ноября 2009 г.). Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2009. С. 138–139.

Сидоров А.А., Белый В.Ф., Волков А.В. и др. Геология и условия образования уникального золото-серебряного месторождения на Чукотке // Докл. РАН. 2007. Т. 412. № 2. С. 234–239.

Сидоров А.А., Ващилов Ю.Я., Волков А.В. и др. Глубинное строение Кайемравеемского рудного района и особенности формирования золотосеребряного оруденения // Докл. РАН. 2008. Т. 421. № 1. С. 80–85.

Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microterhrmometric data for H_2O–NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignano: Siena, 1994. P. 117–130.

Brown P. FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Mineralogist. 1989. V. 74. P. 1390–1393.