

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩЕЙ СРЕДЫ В МИНЕРАЛАХ АНТОФИЛЛИТОВЫХ МЕТАСОМАТИТОВ КАРСЬЕВОГОРСКОГО ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В СЫСЕРТСКОМ МЕТАМОРФИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ (СР. УРАЛ)

© 2013 г. В. В. Мурзин, Ю. И. Клюкин, С. Н. Шанина

Карсьюевогорское месторождение локализовано в одном из многочисленных тел ультрабазитов в северном сегменте Сысертско-Ильменогорского метаморфического комплекса. По имеющимся в настоящее время представлениям [1, 3], тела ультрабазитов этого комплекса практически нацело превращены в породы оливин-энстатитового, энстатит-тальк-карбонат-антофиллитового, антофиллитового и, в меньшей степени, тремолитового, актинолитового, тальк-карбонатного состава в результате региональных процессов метаморфизма высоких ступеней и последующего кремнекислотного метасоматоза. Позднее в комплексе проявился локальный кремнекислотный метасоматоз, синхронный с внедрением тел калиевых гранитов, в результате воздействия которых на метагипербазиты образовались тальк-карбонат-антофиллитовые породы. Эти породы изучались в связи с наличием в них промышленного оруденения антофиллит-асбеста [4], однако сульфиды (пирит и пирротин) отмечались в них лишь изредка и в небольшом количестве. Присутствие в амфиболовых метагипербазитах сульфидных руд в Карсьюевогорском месторождении в Сысертском сегменте комплекса (рис. 1) привлекает повышенное внимание к происхождению этих руд.

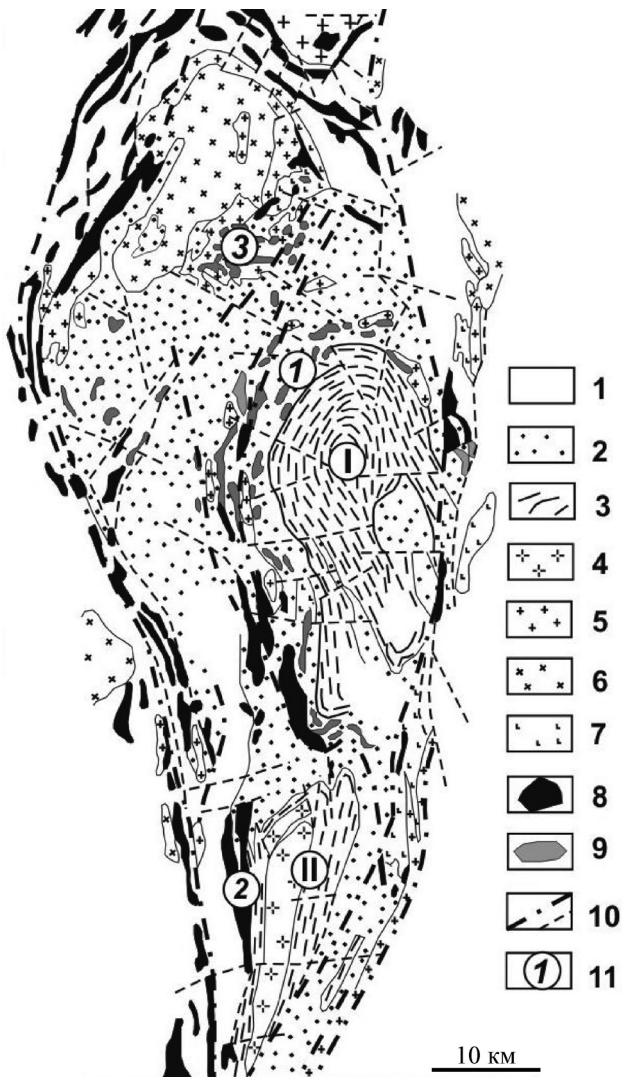
По результатам поисково-оценочных работ на площади месторождения, проведенных в 1985–1990 гг. (А.А. Машаров, Е.В. Стороженко, 1990), на месторождении выделено 4 рудные залежи линзовидной формы, наиболее мощная из которых, вскрытая скв.339 в инт. 137–151 м, стала объектом настоящего исследования (рис. 2). Проведенное нами минералого-геохимическое исследование руд и метасоматитов [5, 6] показало, что метасоматит сложен преимущественно амфиболом, в меньшей степени – карбонатом (доломит-анкерит, магнезит), хлоритом, тальком и редкими вкрапленными сульфидами (не более 1 об. %). Полигонально-зернистая карбонатная масса в метасоматите цементирует агрегаты амфибола, а хлорит выполняет межзерновое пространство в доломитовой массе. Иногда лейсты хлорита обрастают зерна сульфидов или образуют вроски в сульфидах или в доломите. В протолочках метасоматита в минеральных сростаниях фиксируется устойчивая ассоциация сульфидов, доломита и хлорита. Основные сульфидные

минералы руды: пирит (преобладающий), халькопирит и кубанит. Пирит 1 – ранний сульфид, активно замещающийся хлоритом, сидеритом, марказитом и более поздними сульфидами (халькопиритом, кубанитом). Агрегаты зерен пирита цементируются минералами парагенезиса, в состав которого входят халькопирит, кубанит, **Co–Ni–Fe сульфид** (полностью замещен зигенитом), ильменит, а также целый ряд аксессуарных минералов: пирит 2, пирротин, кобальтсодержащий пентландит, аргентопентландит, сфалерит, самородные золото и висмут, молибденит, уранинит, **Сl-апатит, сульфиды, теллуриды** и селениды **Вi** и **Ag**. Зафиксированы признаки более позднего отложения сульфидных минералов и уранинита по отношению к антофиллиту, что свидетельствует об их наложенном характере.

По данным ICP-MS анализа метасоматитов, руд и слагающих их минералов устанавливается следующий набор преимущественно халькофильных элементов, которые концентрируются в руде в количестве на порядок и более по отношению к метасоматиту: **Cu, Ni, Co, Zn, Ti, V, Mo, Se, Te, Cd, Sn, Hg, Bi, Ag, Au, Pd, Rh, U**. Для большинства из них зафиксированы собственные минералы-концентраторы. В метасоматите концентрируются литофильные элементы **Li, B, Na, Mg, Si, K, Rb, Ca, Mn, Sr, Y, Ba**, носителями которых являются амфиболы и карбонаты.

Особенности минерального состава апогипербазитового метасоматита, вмещающего сульфидную руду, дают основание относить его к продуктам относительно высокотемпературного воздействия умеренно углекислотного флюида на исходную ультраосновную породу. Последняя была карбонатизирована с образованием магнезиальных карбонатов (доломит-анкерит, магнезит), а освободившийся кремнезем был реализован в виде богатого кремнеземом амфибола – антофиллита.

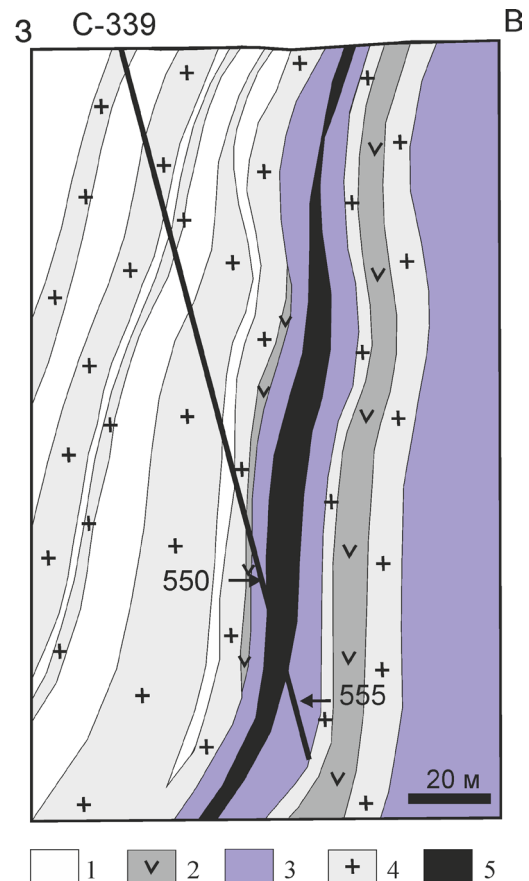
В данной статье представлены результаты изучения минералообразующей среды, заключенной в газовой-жидких включениях в нерудных минералах. В амфиболе такие включения практически отсутствуют, что, возможно, связано с сильной деформацией агрегатов этого минерала – появлением многочисленных микротрещин поперечных удлиению кристаллов, смещением отдельных облом-



**Рис. 1.** Положение исследованных объектов на схеме геологического строения северной части Сысертско-Вишневогорского метаморфического комплекса (упрощенная схема Г.А. Кейльмана и Г.А. Глушковой).

1 – нижне-среднепалеозойские вулканогенно-осадочные породы; 2 – рифейские метаморфические породы (графитовые кварциты, амфиболиты, амфиболовые и биотит-амфиболовые гнейсы); 3 – архей-протерозойские гнейсово-мигматитовые комплексы (гнейсы, гранито-гнейсы и мигматиты): I – Сысертский (Шумихинская гнейсово-мигматитовая структура), II – Вишневогорский; 4 – миаскиты и сиениты Вишневогорского комплекса; 5 – граниты; 6 – плагиограниты, кварцевые диориты, гранодиориты; 7 – амфиболиты апогабровые и габбро; 8 – серпентиниты, тальк-карбонатные породы; 9 – антофиллитовые породы; 10 – разрывные нарушения; 11 – месторождения: I – Карасьеговское, 2 – Каганское, 3 – Сысертское и Терсутское месторождения антофиллит-асбеста.

ков друг относительно друга и, по-видимому, уничтожением первичных включений. Напротив, зерна карбоната насыщены очень мелкими (менее 5 мкм) включениями, локализованными вдоль плоскостей



**Рис. 2.** Геологический разрез по скв. 339 Карасьеговского месторождения.

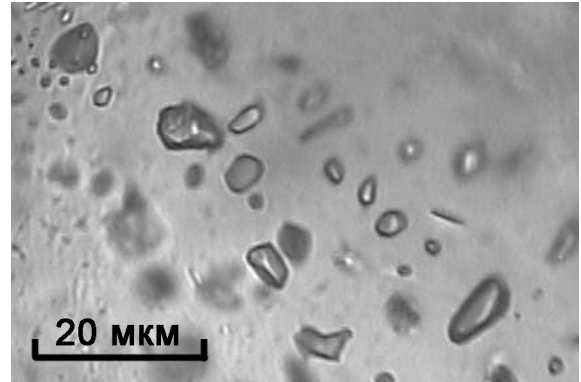
1 – плагиосланцы, кварциты, графитсодержащие кварциты; 2 – амфиболиты; 3 – метагипербазиты (тальк-карбонат-антофиллитовые породы); 4 – граниты; 5 – сульфидные вкрапленные и сплошные руды.

спайности, что свидетельствует о принадлежности их к типу вторичных (рис. 3). По фазовому составу включения однофазные, и лишь отдельные из них содержат газовый пузырек с объемной долей газа <5% и чрезвычайно низкой температурой гомогенизации (менее 100°C). Газ в них представлен водным паром.

Для изучения газовых компонентов включений был проведен хроматографический анализ газовой фазы, выделяющейся при нагревании проб амфиболового метасоматита в двух диапазонах температур – 20–200°C и 200–500°C (табл. 1). Анализ полученных данных указывает на существенные различия в соотношениях основных газовых компонентов в выделенных диапазонах температуры. Ниже 200°C раскрываются чисто водные включения, практически не содержащие углекислоту, возможно, частично участвует вода, сорбированная на поверхности частичек минералов из воздуха. При нагревании до 500°C помимо воды выделяются более значимые количества углекислоты, а также восстановленных газов – водорода, окиси углерода, мета-

на, сероводорода и тяжелых углеводородов. Эти газы, по-видимому, отражают на качественном уровне состав “остаточного (отработанного)” рудоносного флюида, заключенного во вторичных включениях. Расчет мольных содержаний газовых компонентов и величины степени их окисленности (табл. 2) показал, что включения с температурой вскрытия до 200°C не содержат газовых компонентов и заполнены чистым водным раствором. Включения, вскрывающиеся при более высокой температуре, заполнены раствором с повышенным содержанием углекислоты и более низкой степенью окисленности.

Монофракция антофиллита пробы 555 была также проанализирована С.Г. Кряжевым (ЦНИГРИ) методом валового анализа солевого, газового и микроэлементного состава минералообразующей среды извлеченной из вторичных газожидких включений при термическом вскрытии включений при  $T = 500^\circ\text{C}$  [2]. Для валового анализа состава включений использована фракция 0.25–0.5 мм массой 1 г, предварительно очищенная разбавленной (1:1)  $\text{HNO}_3$ , затем электролитически в ультразвуковой ванне. Высушенная навеска амфибола была помещена в стеклянный реактор, заполненный гелием. Вскрытие включений осуществляется нагреванием до  $500^\circ\text{C}$ . Выделенные газы вводились в хроматограф для анализа  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , а также  $\text{CH}_4$  и других углеводородов. Затем декрепитированную пробу заливали деионизированной водой и помещали в ультразвуковую ванну. Полученная водная вытяжка отделялась центрифугированием и поступала на анализ  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  методом ионной хроматографии, а микроэлементов



**Рис. 3.** Включения минералообразующей среды в карбонате антофиллитового метасоматита.

Большинство из них однофазные, в некоторых виден также пузырек газовой фазы.

методом ICP-MS. Из результатов были вычтены данные анализа повторных (холостых) вытяжек.

В результате валового анализа выявлены следующие характеристики содержимого включений: 1) низкая общая концентрация солей в растворе – 4 г/кг воды (0.4 мас. %), свидетельствующая о принадлежности включений к типу вторичных; 2) значительное преобладание натрия над калием ( $\text{Na/K} = 8$ ) в катионном составе флюида; 3) хлоридный, возможно, хлоридно-сульфатный состав флюида: среди анионов преобладает  $\text{Cl}^-$  (0.85 г/кг воды), ион  $\text{HCO}_3^-$  присутствует в заметно меньших количествах (0.11 г/кг воды), сульфат ион содержится в количестве менее 2 г/кг воды; 4) флюид характери-

**Таблица 1.** Газовый состав включений минералообразующей среды в минералах амфиболовых метасоматитов, вскрывающихся в температурных диапазонах менее  $200^\circ\text{C}$  и  $200\text{--}500^\circ\text{C}$  по данным газовой хроматографии

№ обр.	T, °C	Содержание, мкг/г образца													
		H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	H <sub>2</sub> S
550	20–200	н.о.	н.о.	н.о.	0.44	712	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
	200–500	0.06	0.25	3.37	30.67	1375	0.189	0.249	0.033	0.425	0.050	0.004	0.141	0.010	0.048
555	20–200	н.о.	н.о.	н.о.	0.40	408	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
	200–500	0.80	0.13	5.16	74.69	265	0.668	0.656	0.448	0.694	0.280	0.009	0.182	0.027	0.023

Примечание. Исследования состава газов выполнялись в Институте геологии КомиНЦ УрО РАН пиролитическим способом на газовом хроматографе “Цвет-800” с гелием в качестве газа-носителя. Н.о. – ниже предела обнаружения, составляющего (мкг/г): 1 ( $\text{H}_2\text{O}$ ), 0.08 ( $\text{H}_2$ ), 0.01 ( $\text{N}_2$  и  $\text{CO}$ ), 0.03 ( $\text{CO}_2$ ),  $1.5 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{CH}_4$ ),  $1.3 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{C}_2\text{H}_4$  и  $\text{C}_2\text{H}_6$ ),  $2 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{C}_3\text{H}_6$  +  $\text{C}_3\text{H}_8$ , i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> и n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>). Погрешность определения метода 16 отн. %.

**Таблица 2.** Компонентный состав минералообразующей среды, заключенной во включениях в минералах амфиболовых метасоматитов и степень окисленности летучих компонентов по данным газовой хроматографии

№ обр.	T, °C	Мольные доли компонентов							СОЛ
		X <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	X <sub>CO<sub>2</sub></sub>	X <sub>CH<sub>4</sub></sub>	X <sub>CO</sub>	X <sub>H<sub>2</sub></sub>	X <sub>C<sub>n</sub>H<sub>m</sub></sub>	X <sub>N<sub>2</sub></sub>	
550	20–200	1.000	0.000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.00000	1.000
	200–500	0.988	0.009	0.0002	0.002	0.000	0.0003	0.00012	0.789
555	20–200	1.000	0.000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.00000	1.000
	200–500	0.860	0.099	0.0024	0.011	0.023	0.0038	0.00027	0.711

Примечание. СОЛ – степень окисленности летучих:  $X_{\text{CO}_2} / (X_{\text{CO}_2} + \Sigma X_{\text{вос}})$ .

зуются повышенными концентрациями (мг/кг воды) Ва (1737), Sr (183), Mn (15), As (8), Sb (5), а также ряда гранитофильных элементов – В (71), Li (7), Rb (3.3), Cs (0.7), W (2.1), Th (0.02); **5) отсутствие в водной вытяжке основных рудных компонентов (Cu, Fe, Zn, Pb, Co, Ni, Bi), что свидетельствует о заполнении включений преимущественно “остаточным” флюидом.**

Таким образом, реликты минералообразующей среды во вторичных включениях минералов амфиболовых метасоматитов, по-видимому, представлены смесью двух флюидов: 1) остаточного рудоносного, обогащенного натрием, сероводородом и восстановленными углеводородами и 2) окисленного, обогащенного гранитофильными элементами, связанного с внедрением более поздних даек калиевых гранитов, широко представленных в разрезе рудного тела (см. рис. 2). Под воздействием гранитных даек амфиболовые метасоматиты и сульфидные руды были метаморфизованы. Мы полагаем, что при сульфидном рудообразовании участвовал флюид регрессивного этапа регионального метасоматоза (плагиогранитизации), однако этот флюид вряд ли мог являться также и источником рудных компонентов. Факт пространственной приуроченности золото-медно-сульфидного оруденения только к локальным телам метагипербазитов противоречит региональному характеру кремнекислотного метасоматоза. Рудные компоненты были, скорее всего, заимствованы из вмещающих пород – ультрабазитов и базитов. Этим можно объяснить относительно небольшие масштабы золото-сульфидного оруденения изученного типа.

*Исследования осуществлялись при поддержке РФФИ (грант № 12-05-00734-а) на базе коллекции образцов и проб, а также фондовых материалов по Карасьевогорскому месторождению, любезно предоставленных авторам Ю.А. Волченко.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варлаков А.С.* Рифтогенные офиолиты, метаморфизм гипербазитов и строение Вишневогорско-Ильменогорского комплекса. Миасс: ИГЗ, 1995. 66 с.
2. *Кряжев С. Г., Васюта Ю. В., Харрасов М. К.* Методика валового анализа флюидных включений в кварце // Мат-лы XI Междунар. конф. по термобарогеохимии. Александров: ВНИИСИМС, 2003. С. 6–9.
3. *Левин В.Я., Золоев К.К., Сергеев Н.С., Самков В.С.* Допалеозойские ультрабазиты и связанное с ними оруденение Сысертско-Ильменогорского комплекса // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения: мат-лы III междунар. конф. Т. 2. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2009. С. 13–16.
4. *Месторождения антофиллит-асбеста СССР.* Под ред. И.Ф. Романовича. М.: Недра, 1976. 247с.
5. *Мурзин В.В., Варламов Д.А.* Минералогия и геохимия золото-сульфидного оруденения в метагипербазитах Сысертского метаморфического комплекса (Ср.Урал) // Вестник УрО РМО. № 9. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН. 2012. С. 99–114.
6. *Мурзин В.В., Варламов Д.А.* Минералогия золото-сульфидных руд в апогипербазитовых антофиллитовых метасоматитах Карасьевогорского месторождения (Сысертский метаморфический комплекс, Средний Урал) // Ежегодник-2011. Тр. Ин-та геол. им. акад. А.Н. Заварицкого. Вып. 159. 2012. С. 139–143.