

ВОЗРАСТНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ В МЕТАГИПЕРБАЗИТАХ СЫСЕРТСКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ

© 2015 г. В. В. Мурзин*, В. В. Хиллер*, Д. А. Варламов**

**Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7
E-mail: murzin@igg.uran.ru*

*** Институт экспериментальной минералогии РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 4*

Поступила в редакцию 18.02.2015 г.

Принята к публикации 25.03.2015 г.

Массивные и вкрапленные золото-медно-кобальтовые сульфидные руды (Карасьевогорское месторождение) приурочены к телу метаультрамафитов антофиллитового и тремолит-антофиллитового состава. В истории развития Сысертского метаморфического комплекса антофиллитовые породы связываются с процессами гранитизации и проявлены дважды – при палеозойском региональном кремнекислотном метасоматозе, синхронном с плагиогранитизацией, и при позднепалеозойском локальном кремнекислотном метасоматозе, синхронном с калиевым гранитным магматизмом. Возрастной уровень формирования золото-сульфидных руд в антофиллитовых породах установлен нами методом U-Pb химического датирования кристаллов уранинита и составил 294–306 млн лет (средневзвешенное значение 300 ± 3 млн лет). Полученное значение возраста уранинита указывает на то, что при золото-сульфидном рудообразовании участвовал флюид регрессивного этапа плагиогранитизации, завершившего процесс кремнекислотного метасоматоза вещества ультраосновных пород.

Ключевые слова: *химическое датирование, уранинит, метагипербазиты, антофиллитовые метасоматиты, золото-сульфидное оруденение.*

Сысертский метаморфический комплекс сложен архей-протерозойским (?) гнейсово-мигматитовым ядром (шумихинская свита) и, предположительно, рифейским сланцевым обрамлением (породы игишской и сайтовской свит – биотитовые, мусковит-биотитовые плагиосланцы, амфиболиты, кварциты). К сланцевой толще приурочены многочисленные тела ультрабазитов и ассоциирующих с ними габброидов, практически полностью превращенных в породы оливин-энстатитового, энстатит-талк-карбонат-антофиллитового, антофиллитового, тремолитового, актинолитового, талк-карбонатного состава, к которым местами приурочена сульфидная и антофиллитовая минерализация (Левин и др., 2009). Метаморфические породы интродуцированы телами и дайками палингенно-анатектических гранитов различной мощности, пересекающих все породы, в том числе и метаультрамафиты.

В истории развития Сысертского метаморфического комплекса апогипербазитовые антофиллитовые и антофиллитсодержащие породы связываются с процессами гранитизации и проявлены дважды – при региональном кремнекислотном метасоматозе, синхронном с плагиогранитизацией, и ло-

кальном кремнекислотном метасоматозе, синхронном с калиевым гранитным магматизмом (табл. 1). Процессам кремнекислотного метасоматоза предшествовал позднедокембрийский этап зонального регионального динамотермального метаморфизма (“сиалического плутонометаморфизма”), в результате которого по гипербазитам развились энстатит-оливиновые, талк-оливиновые, оливин-антигоритовые и антигоритовые породы. В метагипербазитах этого этапа в расположенном южнее Сысертского Вишневогорском метаморфическом комплексе локализовано Каганское месторождение золото-сульфидно-магнетитовых руд (Мурзин и др., 2007).

Возраст плагиогранитизации, по данным Rb-Sr и Sm-Nd методов, – ордовикско-силурийский (435 ± 44 млн лет) (Краснобаев и др., 1978; Краснобаев, 1980). Более молодые Sm-Nd датировки получены для амфиболитов шумихинской свиты 352 ± 40 млн лет (Ронкин и др., 1993; Echter et al., 1997). В результате регионального кремнекислотного метасоматоза тела гипербазитов были превращены в энстатитовые, антофиллитовые, тремолит-антофиллитовые, антофиллит-хлорит-талк-тремо-

Таблица 1. Этапы и продукты метаморфизма и метасоматоза гипербазитов в Сысертско-Ильменогорском метаморфическом комплексе по (Варлаков и др., 1998) и положение в них оруденения

Table 1. Stages and products of the metamorphism and metasomatism of hyperbasites in the Syser't'-Ilmenogorsk metamorphic complex on (Varlakov and dr., 1998) and the position of ore mineralization in it

Этапы метаморфизма и метасоматоза	Продукты метаморфизма и метасоматоза	Тип оруденения	Возраст метаморфических пород, метод датирования
Региональный зональный динамометермальный метаморфизм ("сиалический плутонометаморфизм")	Энстатит-оливиновые породы (амфиболит-гранулитовая фация) Тальк-оливиновые породы (амфиболитовая фация) Антигорит-оливиновые породы (эпидот-амфиболитовая фация) Антигоритовые породы (зеленосланцевая фация) Тремолит, хлорит (диафторез)	Золото-сульфидно-магнетитовое (Каганское месторождение)	Позднедокембрийский (Варлаков и др., 1998)
Региональный кремнекислотный метасоматоз (синхронный с плагииогранитизацией)	Энстатитовые породы Антофиллитовые, тремолит-антофиллитовые породы Антофиллит-хлорит-тальк-тремолитовые, тальковые породы, в разной степени карбонатизированные (брейнерит)	Золото-сульфидное (Карасьевогорское месторождение)	O ₂ -S ₁ (435–466 млн лет) (Краснобаев, 1980), Rb-Sr D ₂ -C ₁ (352 ± 40 млн лет) (Ронкин и др., 1993; Echtler et al., 1997), Sm-Nd C ₂ (300 ± 6 млн лет), U-Pb химическое датирование уранинита (наши данные)
Локальный кремнекислотный метасоматоз (синхронный с калиевым гранитным магматизмом и гранитизацией)	Энстатит-антофиллитовые, тальк-карбонат-антофиллитовые породы по энстатит-антофиллитовым Биметасоматические хлорит-биотитовые, хлорит-актинолитовые породы на контактах метатипербазитов с амфиболитами, гнейсами, дайками кислых пород	Антофиллит-асбестовое (Сысертское, Терсутское месторождения)	P ₃ (250–260 млн лет) (Краснобаев, 1980; Краснобаев и др., 1978), Rb-Sr P ₃ -T ₂ (254 ± 15 млн лет) (Echtler et al., 1997), Rb-Sr P ₃ (260 млн лет) (Ронкин и др., 1993), Sm-Nd P ₃ -T ₁ (251 ± 5 млн лет) (Echtler et al., 1997), K-Ar

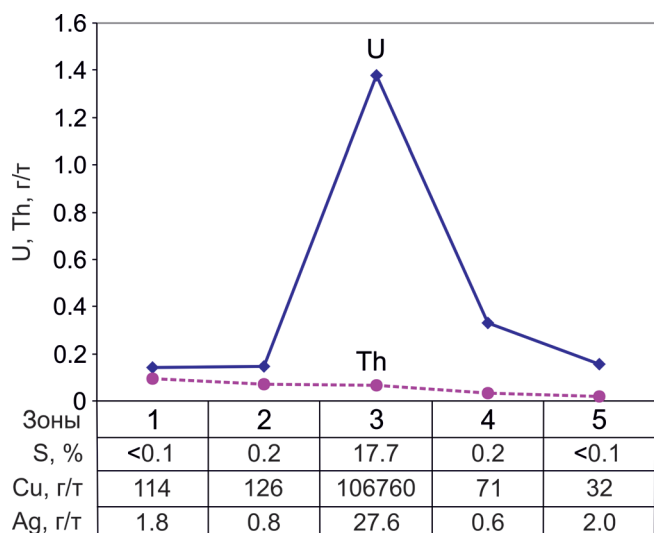


Рис. 1. Распределение U, Th, S, Cu и Ag в пересечении рудного тела скв. 339.

Метасоматические зоны: 1 – амфиболитизированный серпентинит, 2 – карбонат-тремолит-антофиллитовая, 3 – антофиллит-сульфидная, 4 – карбонат-антофиллитовая, 5 – антофиллитовая.

Fig. 1. The distribution of U, Th, S, Cu and Ag in the intersection of the ore body a borehole 339.

The metasomatic zones: 1 – amphibolized serpentinite, 2 – carbonate-tremolite-anthophyllite, 3 – anthophyllite-sulfide, 4 – carbonate-anthophyllite, 5 – anthophyllite.

литовые и тальковые породы. Эти апогипербазитовые породы среди плагиогнейсов и плагиогранитов вмещают золото-сульфидное оруденение Карасьевогорского месторождения. Возраст поздней калиевой гранитизации (см. табл. 1), наиболее крупное проявление которой – Сысертский гранитный массив, верхнепермско-триасовый (230–270 млн лет – K-Ar, Rb-Sr и Sm-Nd методы) (Краснобаев и др., 1978; Ронкин и др., 1993; Echter et al., 1997). Заключенные в гранито-гнейсах тела метадипербазитов превращены в тальк-карбонат-антофиллитовые породы, вмещающие жиллообразные участки, сложенные промышленными залежами антофиллит-асбеста.

Массивные и вкрапленные золото-сульфидные руды Карасьевогорского месторождения приурочены к телу метадипербазитов антофиллитового и тремолит-антофиллитового состава. Геологическое строение месторождения, минералогическая характеристика руд и метасоматитов, флюидный режим их формирования рассмотрены нами ранее (Мурзин, Варламов, 2012; 2013; Мурзин и др., 2013). В настоящем исследовании уточнено возрастное положение золото-сульфидных руд в имевшей место последовательной метаморфической и метасоматической трансформации пород рассматриваемого комплекса.

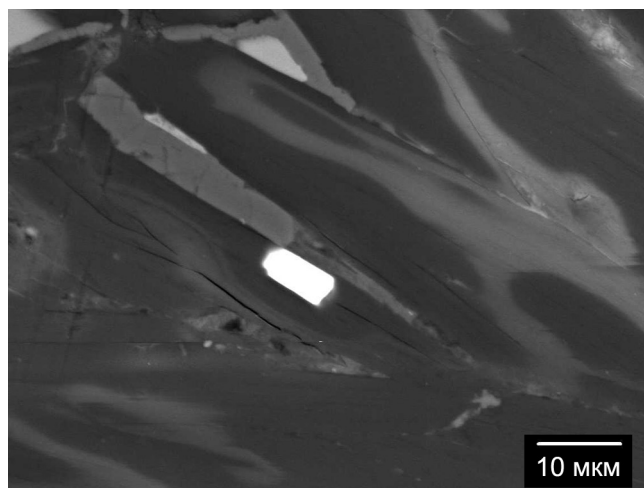


Рис. 2. Кристалл уранинита в агрегате зерен антофиллита.

Снимок выполнен в режиме обратнорассеянных электронов.

Fig. 2. The uraninite crystal in the unit of grains of anthophyllite.

The picture is taken in the BSE (back-scattered electrons) mode.

Возрастной уровень формирования золото-сульфидных руд в антофиллитовых породах установлен нами методом **U-Pb химического датирования** кристаллов уранинита, проведенного в Институте геологии и геохимии УрО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе Cameca SX100. Методика измерений уранинита и обработка его результатов приводится в (Иванов и др., 2010; Хиллер, 2010).

Уранинит выделяется нами в составе продуктивного золото-сульфидного парагенезиса, что отражается в резком обогащении ураном сульфидных руд по отношению к вмещающим метадипербазитам (рис. 1). Минералы этого парагенезиса отлагались позднее антофиллита, что отчетливо устанавливается по отпечаткам скульптуры граней антофиллита на этих минералах (Мурзин, Варламов, 2012).

Отобранные для химического датирования кристаллы уранинита имеют размеры 6–10 мкм (рис. 2). Химический состав трех изученных зерен уранинита (табл. 2) характеризуется высокими содержаниями тория (ThO_2 – 4.12–5.26 мас. %), свинца (PbO – 3.50–3.75 мас. %) и железа (Fe_2O_3 – 21–2.80 мас. %). В меньших количествах присутствуют примеси иттрия (Y_2O_3 до 0.88 мас. %), кремния (до 1.0 мас. %). Суммарное содержание химических элементов в анализах, близкое к 100 мас. %, свидетельствует о ненарушенности **Th-U-Pb системы** уранинита.

Расчетное значение возраста зерен уранинита по 16 единичным измерениям (Montel et al., 1996)

Таблица 2. Химический состав трех зерен уранинита и стандартного образца (мас. %) и расчетные значения возраста в точках измерения по данным рентгеноспектрального микроанализа

Table 2. Chemical composition of 3 grains uraninite and standard sample (wt. %) and calculated values of age in measurement points according to the of x-ray microanalysis data

Номер зерна/ номер точки анализа	ThO ₂	UO ₂	PbO	Ce ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	SO ₃	Сумма	Т, млн лет
1/1	4.78	87.70	3.65	0.04	0.00	0.01	0.52	0.11	0.13	2.80	0.19	99.91	300
1/2	4.29	86.39	3.56	0.08	0.03	0.07	0.75	0.01	0.14	2.15	0.48	97.95	297
1/3	4.76	88.52	3.62	0.03	0.09	0.00	0.56	0.03	0.16	2.00	0.15	99.93	295
1/4	4.40	85.79	3.50	0.04	0.00	0.02	0.64	0.06	0.18	2.44	0.48	97.56	294
1/5	4.44	88.72	3.72	0.06	0.03	0.05	0.80	0.00	0.14	1.31	0.08	99.35	303
2/6	4.12	89.07	3.78	0.00	0.04	0.07	0.88	0.07	0.14	1.33	0.03	99.53	306
2/7	4.73	88.27	3.70	0.07	0.00	0.06	0.60	0.22	0.12	1.49	0.03	99.30	302
2/8	4.32	89.07	3.73	0.03	0.00	0.03	0.75	0.03	0.13	1.21	0.01	99.31	302
2/9	4.56	89.06	3.75	0.08	0.00	0.00	0.68	0.05	0.13	1.25	0.01	99.58	304
3/10	5.17	89.11	3.69	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.12	1.51	0.01	100.20	298
3/11	5.26	88.75	3.71	0.00	0.00	0.03	0.53	0.00	0.11	1.40	0.01	99.80	301
3/12	5.06	88.45	3.69	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.11	1.34	0.00	99.26	300
3/13	5.06	88.33	3.67	0.03	0.00	0.01	0.59	0.00	0.11	1.39	0.01	99.20	299
3/14	5.07	88.18	3.64	0.00	0.01	0.00	0.54	0.00	0.11	1.39	0.01	98.94	298
3/15	4.97	88.11	3.63	0.06	0.00	0.05	0.62	0.00	0.11	1.43	0.01	98.99	297
Стандарт UO ₂	0.00	100.09	0.00	0.00	0.00		0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	100.11	

Примечание. Погрешность определения возраста в точках ±7 млн лет. Положение зерна 1 изображено на рис. 2, точки анализа 1–5 расположены по профилю вдоль удлинения зерна.

Note. Error of age determination ±7 Ma. Grain 1 see on fig. 1, points of measurement (1–5) are along of grain.

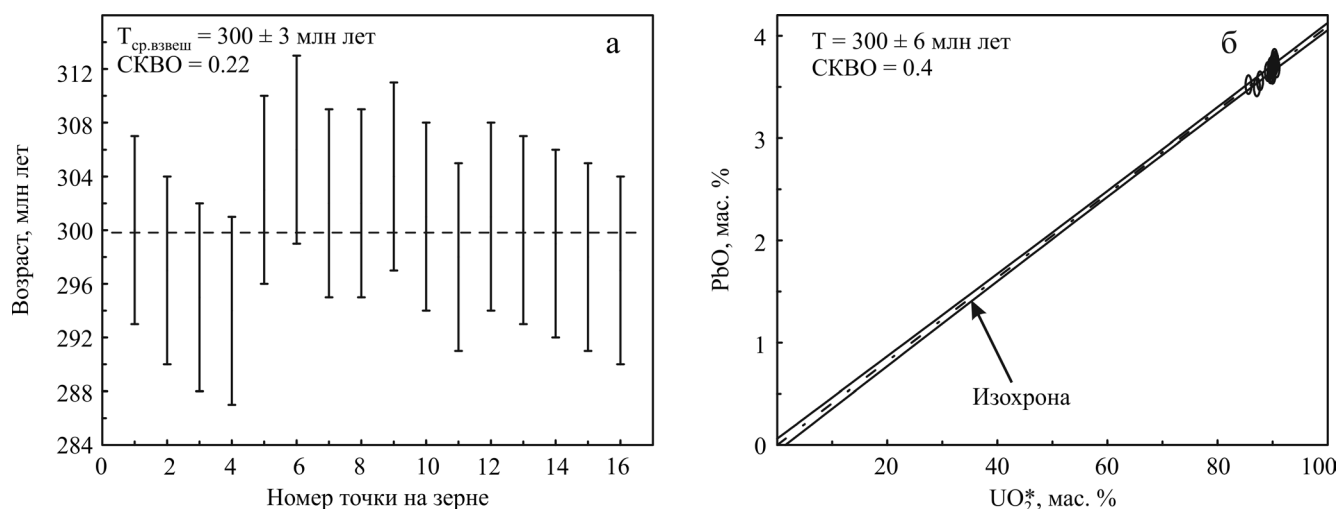


Рис. 3. Вариации значений возраста уранинита, рассчитанные по единичным точкам (с величиной их средневзвешенного возраста) (а) и по совокупности точек графика UO_2^*-PbO (б).

$UO_2^* = (ThO_2 + UO_2^{экв})$, $UO_2^{экв}$ – содержание урана, пересчитанное в эквивалентное содержание тория, способное произвести то же количество Pb за время жизни системы при равенстве U-Pb и Th-Pb значений возраста (Suzuki, Adachi, 1991). Эллипсы – величины погрешности, штрих-пунктиром обозначена изохрона с двумя симметричными гиперболами, фиксирующими погрешности.

Fig. 3. The variations of values of uraninite's age calculated (a) on single points (with the size of their average age), and (b) on set of points on the graph UO_2^*-PbO .

$UO_2^* = (ThO_2 + UO_2^{eq})$, UO_2^{eq} – the content of uranium counted into equivalent content of thorium capable to produce the same amount of lead during lifetime of system with equal U-Pb and Th-Pb age values (Suzuki, Adachi, 1991). Ellipses – error values, a dot-dash line – an isochrone with two symmetric hyperboles fixing errors.

попадает в узкий интервал значений 294–306 млн лет (см. табл. 2) при средневзвешенном значении 300 ± 3 млн лет, СКВО = 0.22, вероятности соответствия (P) = 0.999 (рис. 3а). Аналогичная датировка получена также U-Th-Pb методом расчета возраста по углу наклона изохроны на графике зависимости UO_2^*-PbO с использованием виртуальной точки (Cocherie, Albarede, 2001) – 300.1 ± 5.5 млн лет, СКВО = 0.40, P = 0.98 (рис. 3б).

Полученное значение возраста уранинита указывает на то, что при золото-сульфидном рудообразовании участвовал флюид регрессивного этапа плагитогранитизации, завершающий процесс кремнекислотного метасоматоза вещества ультраосновных пород. Об этом свидетельствует и установленный нами состав рудоносного флюида, обогащенного натрием, сероводородом и восстановленными углеводородами (Мурзин и др., 2013). Этот флюид возник в результате уравнивания глубинного флюида с вулканогенно-осадочными породами, обогащенными изотопно утяжеленным кислородом (Мурзин, Варламов, 2013). В талькарбонат-антофиллитовых породах с промышленными содержаниями антофиллит-асбеста (продуктах более позднего кремнекислотного метасоматоза) сульфидные минералы практически отсутствуют, а метасоматизирующий флюид явился результатом взаимодействия магматической воды, проду-

цированной калиевой гранитизацией, с ультрабазитовым веществом (Мурзин, 2014).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-05-00734-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варлаков А.С., Кузнецов Г.П., Кораблев Г.Г., Муркин В.П. (1998) Гипербазиты Вишневогорско-Ильменогорского метаморфического комплекса. Мисс: Имин УрО РАН, 195 с.
- Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Федоров Ю.Н., Хиллер В.В., Пономарев В.С. (2010) Изотопное и химическое U-Pb-датирование гранитоидов Западно-Сибирского мегабассейна. Докл. АН. 433(5), 671-674.
- Краснобаев А.А., Ронкин Ю.Л., Степанов А.И., Лепихина О.П. (1978) О возрасте гранитизации и природе субстрата гнейсов Сысертско-Ильменогорского комплекса. Ежегодник-1977. Свердловск: ИГиГ УНЦ АН СССР, 3-6.
- Краснобаев А.А. (1980) Основные итоги и проблемы геохронологического изучения Урала. Доордовикская история Урала. Общие вопросы. Свердловск: УНЦ АН СССР, 28-39.
- Левин В.Я., Золотов К.К., Сергеев Н.С., Самков В.С. (2009) Допалеозойские ультрабазиты и связанное с ними оруденение Сысертско-Ильменогорского комплекса. Ультрабазит-базитовые комплексы склад-

- чатых областей и связанные с ними месторождения: мат-лы третьей Междунар. конф. Т. 2. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 13-16.
- Мурзин В.В. (2014) Изотопный состав кислорода и водорода флюида при формировании антофиллитовых метагипербазитов в Сысертском метаморфическом комплексе на Среднем Урале. *Докл. АН.* **459**(4), 479-483.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А. (2012) Минералогия золото-сульфидных руд в апогипербазитовых антофиллитовых метасоматитах Карасьевогорского месторождения (Сысертский метаморфический комплекс, Средний Урал). *Ежегодник-2011. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 159*, 139-143.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А. (2013) Стабильные изотопы (С, О, D, S) и генетические аспекты формирования золотого оруденения в метагипербазитах Сысертско-Ильменогорского метаморфического комплекса (Урал). *Литосфера.* (4), 154-162.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А., Шанина С.Н. (2007) Новые данные о золото-антгоритовой формации Урала. *Докл. АН.* **417**(6), 810-813.
- Мурзин В.В., Ключкин Ю.И., Шанина С.Н. (2013) Исследование включений минералообразующей среды в минералах антофиллитовых метасоматитов Карасьевогорского золото-сульфидного месторождения в Сысертском метаморфическом комплексе (Ср. Урал). *Ежегодник-2012. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 160*, 261-264.
- Ронкин Ю.Л., Носков А.Г., Журавлев Д.З. (1993) Sm-Nd изотопная система Сысертского гнейсово-мигматитового комплекса. *Ежегодник-1992.* Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 135-139.
- Хиллер В.В. (2012) Состав, кристаллохимия, эволюция U-Th-Pb-системы ряда минералов-геохронометров по данным экспериментального исследования и компьютерного моделирования. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 23 с.
- Cocherie A., Albarede F. (2001) An improved U-Th-Pb age calculation for electron microprobe dating of monazite. *Geochim. Cosmoch. Acta.* **65**(24), 4509-4522.
- Echtler H.E., Ivanov K.S., Ronkin Y.L. et al. (1997) The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reappraisal. *Tectonophysics.* **276**, 229-251.
- Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A. (1996) Electron microprobe dating of monazite. *Chem. Geol.* **131**, 37-53.
- Suzuki K. and Adachi M. (1991) Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. *Geochem. J.* **25**, 357-376.

Рецензент А.А. Краснобаев

The age position of gold-sulfide mineralization in the metahyperbasites of the Sysert' metamorphic complex in the Middle Urals

V. V. Murzin*, V. V. Hiller*, D. A. Varlamov**

* Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

** Institute of Experimental Mineralogy RAS

The massive and disseminated gold-copper-cobalt sulfide ores (Karasya Gora deposit) are restricted to the body of metahyperbasites of anthophyllite and tremolite-anthophyllite composition. In the history of evolution of the Sysert' metamorphic complex anthophyllite rocks are associated with processes of a granitization and appeared twice: during the Paleozoic regional silica-acid metasomatism, synchronous with a plagiogranitization, and during a local Late Paleozoic silica-acid metasomatism, synchronous with potassium granite magmatism. The age 294–306 Ma of the formation of the gold-sulfide ores in anthophyllite rocks is established using the U-Pb method of chemical dating of uraninite crystals and are shown (average value 300 ± 3 Ma). The obtained value of uraninite's age indicates that the fluid produced at the regressive stage of a plagiogranitization which finished the process of the silica-acid metasomatism of the ultramafic rocks, participated in the gold-sulfide ore formation.

Key words: chemical dating, uraninite, metahyperbasites, anthophyllitic metasomatites, gold-sulfide ores.