

УДК 550.4:553+553.41

## ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ГРАФИТОНОСНЫХ ПОРОДАХ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

© 2010 г. Академик А. И. Ханчук, В. П. Молчанов, Е. И. Медведев, Л. П. Плюснина

Поступило 07.07.2009 г.

Высокоуглеродистые стратифицированные метаморфические породы многие исследователи относят к числу основных источников прироста запасов золота и металлов платиновой группы в России XXI в. Подтверждением тому могут служить широкая протяженность, значительный вертикальный размах и устойчивые промышленные концентрации благородных металлов. Именно к таким объектам принадлежит зона региональной графитизации в северной части Ханкайского террейна, вытянутая в виде субмеридиональной полосы длиной свыше 100 км при ширине 3–5 км [1]. Наиболее крупные месторождения этой площади – Тамгинское (центр) и Тургеневское (южный фланг), где был отобран каменный материал для исследований.

Первые данные о проявлениях золото-платиноидного оруденения в графитсодержащих породах этих месторождений приведены нами в работах [1, 2]. Последующее использование электронной сканирующей микроскопии позволило установить полигенную природу золоторудной минерализации, которая проявилась в значительной изменчивости пробности золота и разнообразии морфологических особенностей выделений золота и сопряженных с ним ассоциатов. Наиболее важные в промышленном отношении концентрации золота (3–22 г/т) связаны с эндогенными графитовыми рудами, скарнами и кварцевыми гидротермалитами. Целью данного сообщения является описание состава и морфопризнаков золота полихронного оруденения.

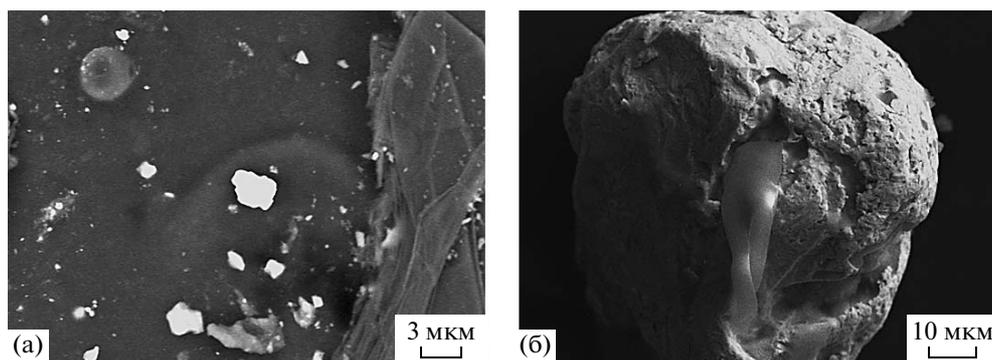
В геологическом строении указанных месторождений принимают участие биотит-полевошпат-графитовые, гранат-биотит-полевошпат-графитовые и биотит-мусковит-полевошпатовые сланцы, переслаивающиеся с графитсодержащими гранат-диопсидовыми скарнами и согласными инъекциями графитизированных биотитовых и лейкократовых гранито-гнейсов. Наряду с ними отмечают небольшие штоки поздних редкозе-

мельных гранитов, а также маломощные кварцевые жилы и прожилки.

Основным минералом-концентратором углерода является графит, присутствующий в рудах как в дисперсном состоянии, так и в виде мономинеральных прожилков и гнезд [1]. Наиболее обильная графитизация происходит по плоскостям трещиноватости гранито-гнейсов, где графит фиксируется в виде чешуек от 1 до 5 мм, имеющих состав (мас. %): С 99.78 и Si 0.22. Изотопный состав углерода довольно однороден: значения  $\delta^{13}\text{C}$  варьируют в узком диапазоне от  $-8.5$  до  $-8.7\%$ , характерном для мантийного углерода [2]. В пользу глубинного происхождения графита свидетельствует также развитие глобулярных микроструктур, образование которых происходит при конденсации углеродистых газов в условиях резкого понижения температуры и давления.

На поверхности чешуек графита в ассоциации с мелкими угловатыми зернами самородной меди и железа обнаружены углеродистые выделения сфероидальной формы (глобулы) диаметром до 5–6 мкм (рис. 1а). По сравнению с графитом их состав характеризуется присутствием помимо С (70.22 мас. %) довольно значительного количества О (до 25.06 мас. %), а также примесей Cu, Zn, Na, Si, S, Cl, K, Ca (суммарно не более 4–5 мас. %). Этот факт может свидетельствовать об их участии в транспорте рудного вещества. Глубинные флюиды, как следует из опубликованных данных [3], весьма насыщены разнообразными летучими углеродистыми соединениями, кислородом, хлором и другими компонентами, которые и могли послужить исходным материалом для природного синтеза графита и углеродистых глобул.

Значительный интерес представляют обнаруженные включения углеродистого вещества (УВ) в золоте (рис. 1б). В них кроме С и О, содержащихся в меньшем, по сравнению с глобулами, количестве, найдены Au, Ag, Cl, K, Si, Ca (табл. 1). Присутствие в самородных металлах включений УВ свидетельствует о резко восстановительных условиях их образования в процессе дегазации мантийных очагов [4].



**Рис. 1.** Углеродистые выделения сфероидальной формы (глобулы) и субтаблитчатые выделения (светлые пятна) интерметаллида Cu и Fe (а), включения графита в самородном золоте (б).

Рудная минерализация, ассоциирующая с графитом, характеризуется довольно сложным полиминеральным составом и многообразием форм распределения благородных металлов в виде самородных элементов, твердых растворов и интерметаллических соединений [5]. Самородное золото представлено частицами неправильной формы, пластинчатыми обособлениями и нередко встречающимися золотинами сфероидальных очертаний. Диапазон гранулометрической шкалы, включающей классы видимого золота, невелик (70–100 мкм). Химический состав металла варьируется в сравнительно узких пределах: содержание основной примеси – Ag – обычно не превышает 6–8 мас. %, что свидетельствует о высокой пробыности золота. Среди других микроэлементов отмечается Cu в количестве до 2–3 мас. %. Так, в золотине (рис. 1б), содержащей микровключения углеродистого вещества, концентрация Au меняется от 93.3 до 97.9 мас. %, Ag – от 2.1

до 3.5 мас. %. В других точках съемки той же частицы Ag отсутствует, а примесь Cu составляет 2.1 мас. %. Наряду с этим отмечены участки со 100%-й концентрацией Au. Различная концентрация золота в пределах одного зерна, возможно, является следствием его кристаллизации из газовой фазы [6].

Довольно широко распространены выделения природного ртутистого золота, где концентрация Au достигает 90.88 ат. %, а Hg – 9.12 ат. %. Размер обособлений редко превышает 1–2 мкм. По представлениям ряда исследователей [7], Hg-содержащая минерализация связана с глубинными флюидными потоками. Иногда встречаются микронные выделения интерметаллических соединений Au–Cu. Состав этих фаз (Au 65.9 ат. % и Cu 34.1 ат. %) близок к формуле купроаурита  $\text{CuAu}_3$ .

К редким находкам относят небольшие зерна интерметаллидов Au, Ag, Pd, Sn, обнаруженные в процессе термоокисления графитовой руды. Их химический состав (без “фона” матрицы), мас. %: Au 24.50; Ag 10.53; Pd 58.10; Sn 6.87. Металлическая пленка золото-палладиевого состава, обнаруженная на поверхности кристаллов алмаза [8], подтверждает предположение о мантийном источнике рудоносного флюида.

Самородное золото скарнов, развитых на Тургеневском и Тамгинском месторождениях графита, по морфологии, гранулометрии и химическому составу заметно отличается от своих аналогов из графитоносных прожилков. Так, скарновому золоту более всего присущи комковидно-губчатые формы (рис. 2а). Размеры зерен достигают 1.0 мм. Существенно меняется их состав: доля Ag увеличивается до 10 мас. %, соответственно уменьшается доля Au.

На поверхности скарновых золотинок выявлены углеродистые микронаноструктуры. Доминирующую роль в их кристаллизации играет пленка наноразмерной толщины (100–200 нм), содержащая в своем составе помимо C (56–60 мас. %) и O (19–33 мас. %) примеси S, K, Ca, Cl, Al и Fe (до

**Таблица 1.** Химический состав включений углеродистого вещества в золоте, мас. %

Элемент	Углеродистое вещество			Золото
	центр	центр	край	
C	59.80	57.43	48.04	–
O	28.77	27.41	26.54	–
Si	0.54	–	–	–
Cl	1.91	2.5	2.06	–
K	2.05	1.68	–	–
Ca	0.62	–	–	–
Au	6.31	10.98	23.36	97.94
Ag	–	–	–	2.06
Сумма	100	100	100	100

Примечание. Здесь и в табл. 2 анализ выполнен на сканирующем электронном микроскопе EVO-50 XVP. Аналитик П.П. Сафронов.

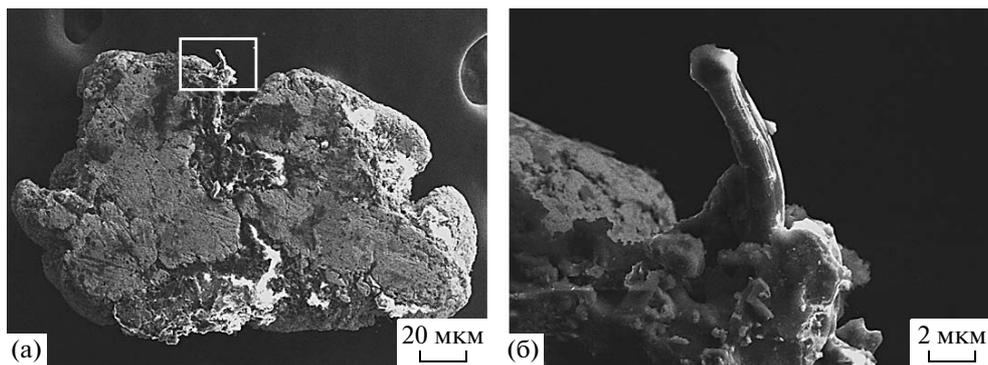


Рис. 2. Комковидное выделение скарнового золота (а), углеродистая нанотрубка (б) показана слева (в рамке).

1–2 мас. %), рис. 26. Трансформация углеродистой пленки в процессе скарнообразования привела к появлению на ее поверхности трубчатых индивидов. Это, пожалуй, одно из первых подтверждений наличия углеродистых нанотрубок в природных соединениях. Состав нанотрубки (табл. 2) в ее основании близок к составу нано пленки. По мере удаления от минеральной матрицы содержание С при незначительной примеси кислорода (не более 10 мас. %) увеличивается (до 90 мас. %), что может рассматриваться как иллюстрация процесса гетерогенизации глубинного флюида на УВ и графит.

Помимо нанотрубок на поверхности скарновых золотин присутствуют мельчайшие (до 1 мкм) серебро- и золотосодержащие фазы следующего состава, мас. %: Ag 12.36, Al 11.30, Si 13.00, С 22.69, О 35.65 и Ag 1.94, Au 32.55, С 26.58, О 28.78. Наиболее вероятным источником золота и серебра была сама золотина. Возможно, в процессе выделения углеродистого вещества на поверхности катализатора (золота) наночастицы последнего активируются, образуя сложные соединения с другими компонентами.

В кварцевых жилах широко распространена низкопробная разновидность золота – электрум. Размеры подавляющей части зерен обычно не превышают 100 мкм, изредка достигая 1.0 мм. Форма их выделения – комковидная, реже таблитчатая. Состав электрума характеризуется присутствием Ag – от 33 до 34 мас. %, Cu – до 2 мас. %. Совершенно необычным является постоянное наличие в его составе F в высокой концентрации (до 34 мас. %). Изредка отмечают присутствие U – до 3.42 мас. % и W – 1.26 мас. % (табл. 3). Согласно [9], величина Au/Ag в рудах является совокупной характеристикой, отражающей соотношение золота и серебра в гидротермальных рудообразующих растворах.

На поверхности зерен электрума фиксируются единичные зерна магнетита и фрагменты углеродистой пленки (рис. 3). Размеры фрагментов до-

стигают 5–6 мкм при толщине 100–200 нм. Элементный состав пленочного наноматериала отличается от состава его скарновых аналогов повышенным уровнем накопления Si (7.2 мас. %) и Al (4 мас. %).

Исследование закономерностей распределения золота и углерода, а также форм их выделений позволило установить несколько этапов формирования полигенных благородно-металльных руд. На первом этапе формируются графитовые руды, связанные с длительным функционированием мантийного очага и проявлением интрузивного магматизма. Самородное золото и углерод мантии транспортировались к поверхности суши восстановленными флюидами по легко проницаемым зонам скрытых глубинных разломов в осадочном чехле северной окраины Ханкайского террейна. Отложение рудного вещества осуществлялось в восстановительной среде, свидетельством чего служит широкий набор самородных элементов и интерметаллидов.

Таблица 2. Химический состав углеродистой нанотрубки, мас. %

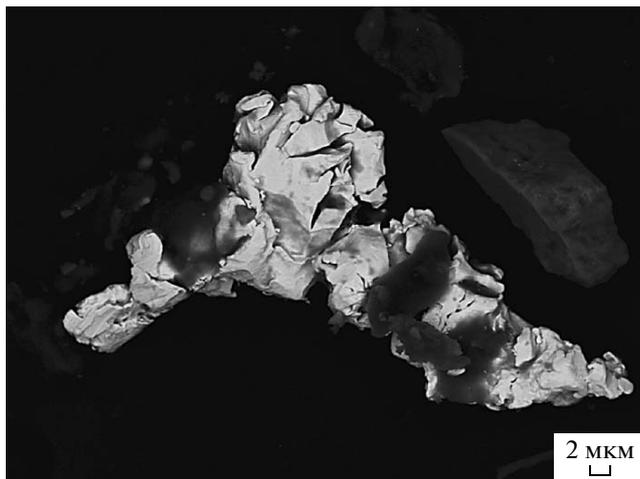
Элемент	Нанотрубка		
	основание	центр	край
C	54.43	72.63	88.19
O	7.33	21.45	11.54
Na	3.59	0.31	–
Si	1.08	0.37	–
S	0.9	1.44	0.28
Cl	28.54	–	–
K	2.46	1.63	–
Ca	1.67	1.23	–
Br	–	0.94	–
Сумма	100	100	100

**Таблица 3.** Химический состав электрума и углеродистой нанопленки, мас. %

Элемент	Электрум			Нано-пленка
	центр 1	центр 2	край	
C	—	8.47	20.98	19.83
O	—	11.21	13.56	65.69
F	2.16	10.41	34.66	—
Mg	—	1.01	5.68	0.55
Na	—	—	—	0.36
Al	—	1.2	7.98	3.94
Si	—	—	1.06	7.24
Cl	—	—	—	0.13
K	—	—	1.51	0.71
Ca	—	—	—	0.3
Fe	—	—	0.53	1.25
Cu	—	1.94	1.0	—
Ag	30.85	20.88	3.58	—
Au	63.56	42.26	9.44	—
U	3.42	1.36	—	—
W	—	1.26	—	—
Сумма	100	100	100	100

Примечание. 1 и 2 – движение в направлении от центра к краю. Аналитик Н.Н. Баринов.

Высокотемпературные флюиды могут переносить металлы в виде металлоорганических соединений с  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{O}_2$ , S и другими летучими компонентами. В условиях метаморфизма эти соединения диссоциируют, разлагаясь по схеме  $\text{M}_x(\text{CO})_y =$



**Рис. 3.** Пластинчатое выделение электрума из углеродсодержащих пород.

$= x\text{M} + y\text{CO}$ , и металл переходит из возбужденного состояния в нейтральное [4]. Это объясняет присутствие самородных металлов и интерметаллидов в углеродистых комплексах. Формирующееся таким образом видимое золото обычно обладает высокой пробностью, что было показано нами для руд первого, раннего, этапа, сопряженного с графитизацией.

На втором, скарном, этапе происходила перекристаллизация рудного вещества с образованием новых микропарагенезисов золота, нередко при участии УВ. При этом золото часто выступало в качестве подложки для формирования углеродистых нанотрубок.

Третий, наиболее поздний, гидротермальный этап связан с участием в становлении золото-кварцевых жил гидротермальных растворов, продуцируемых редкоземельными гранитоидами, что заметно сказалось на составе самородного золота, в котором появились примеси W, F и U. Рудообразование сопровождалось перекристаллизацией и переносом УВ вмещающих пород, что оказывало определенное влияние на редокс-потенциал системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ и Президиума ДВО РАН: 09–05–98545, 09–05–12060–офи–м, 09–2–СО–08–002, 09–3–А–415.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Молчанов В.П. // ДАН. 2004. Т. 397. № 4. С. 524–529.
2. Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Молчанов В.П. и др. // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26. № 1. С. 70–80.
3. Бряничикова Н.И. Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 88–90.
4. Буслаева Е.Ю., Новгородова М.И. Элементоорганические соединения в эндогенных рудах. М.: Недра, 1992. 234 с.
5. Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Молчанов В.П. и др. В сб.: Чтения памяти академика К.В. Симакова. Тез. докл. Всерос. науч. конф. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2007. С. 107–108.
6. Паддефет Р. Химия золота. М.: Мир, 1982. 264 с.
7. Степанов В.А., Моисеенко В.Г. Геология золота, серебра и ртути. Владивосток: Дальнаука, 1993. 228 с.
8. Макеев А.Б., Дудар В.А. Минералогия алмазов Тимана. СПб.: Наука, 2001. 366 с.
9. Пальянова Г.А. Физико-химические особенности поведения золота и серебра в процессах гидротермального рудообразования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 220 с.