

УДК 553.411(571.65)

ТИПОМОРФИЗМ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ЗОЛОТО-РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО РУДНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ФРОНТ (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)

Л. А. Соломенцева, И. С. Литвиненко

*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН,
г. Магадан*

E-mail: SolomenL@neisri.ru, litvinenko@neisri.ru

Исследованы типоморфные свойства самородного золота золото-редкометалльного рудного проявления Фронт, локализованного в раннемеловых лейкократовых гранитах на юго-восточном фланге Яно-Колымского золотоносного пояса. В результате изучения рудной минерализации в кварцево-жильных образованиях с использованием энергодисперсионного спектрометра INCA (X-Maw-50), сканирующего электронного микроскопа EVO-50 и микрозондового анализатора Camebax уточнен минеральный тип оруденения и установлены основные типоморфные черты самородного золота. К ним относятся: его совместная кристаллизация с висмутовыми минералами (прежде всего мальдонитом) и отложение преимущественно в интерстициальных полостях и трещинах ранее раскристаллизовавшихся кварца и рудных минералов сульфидно-сульфоарсенидной ассоциации, очень высокая пробность, весьма мелкая размерность выделений. Основная масса образований самородного золота сосредоточена в кварце (95,7 мас. % от общего количества). Зерна размером менее 0,25 мм составляют 95,2%. Тонкодисперсных (менее 0,01 мм) выделений в общем балансе самородного золота в руде – 32,7%. Преобладают золотины пробностью 890–950‰, а среди них – пробностью 910–920‰. Типоморфной примесью в самородном золоте является теллур. В небольшом количестве отмечены очень высокопробные ветвисто-пористые золотины с оксидами висмута, образовавшиеся в результате гипогенного разложения мальдонита. Широкое развитие мальдонита позволило отнести золото-редкометалльное оруденение проявления Фронт к мальдонит-сульфотеллуриднему минеральному типу.

Ключевые слова: золото-редкометалльное оруденение, золото, типоморфизм.

ВВЕДЕНИЕ

На Северо-Востоке России золото-редкометалльные объекты с экономической точки зрения долгое время традиционно считались неинтересными или с неясными перспективами. Это определило отмечаемую всеми исследователями низкую интенсивность поисковых работ на данный вид объектов и относительную слабость их изученности. Остро обозначившееся в последние десятилетия на Северо-Востоке России истощение сырьевой базы россыпных месторождений вызвало необходимость ускоренного создания и укрепления золоторудной базы горнодобывающей промышленности. Наличие положительных примеров в мировой практике выявления и эксплуатации золото-редкометалльных месторождений (группа «intrinsic» (Newberry et al., Brew, 1995) или «intrusion related» (Lang et al., 2000)) способствовало интенсификации поисково-оценочных работ на объектах такого типа. Появились обобщающие сообщения, посвящен-

ные структурно-морфологической и минералогическо-геохимической типизации золото-редкометалльных месторождений на Северо-Востоке России (Гамянин и др., 1998; Горячев, Гамянин, 2006), особенностям состава рудной минерализации золото-редкометалльного оруденения различных рудно-формационных рядов (Сидоров, 2000) и др.

В связи с относительно слабой изученностью золото-редкометалльных проявлений характеристика типоморфных свойств распространенного в них самородного золота в большинстве ранних публикаций носила общий характер. Появившиеся в дальнейшем материалы показывают широкое разнообразие типоморфных свойств самородного золота данных месторождений Северо-Востока России (Шило и др., 1988; Гамянин и др., 1998; Волков и др., 2011, 2013; и др.). Поэтому изучение типоморфных признаков самородного золота на новых золото-редкометалльных объектах, безусловно, актуально и способствует накоплению информации о его особенностях в такого рода проявлениях различных ми-

неральных типов и входящих в состав различных рудно-формационных рядов.

Статья посвящена изучению типоморфных свойств самородного золота рудного проявления Фронт. Полученные в ходе исследований материалы об условиях нахождения самородного золота в руде, его морфометрических характеристиках и составе представляют не только научный, но и практический интерес, так как могут способствовать совершенствованию методики поисково-оценочных работ и технологии извлечения золота на месторождениях данного типа.

МЕТОДИКА РАБОТ

Для изучения типоморфных свойств самородного золота в рудном проявлении Фронт было отобрано 10 штучных проб массой до 2 кг каждая (6 – из кварцево-жильных образований, 4 – из грейзенов). После дробления до -1 мм из них брали навески на атомно-абсорбционный анализ. В самой богатой пробе, отобранной из кварцевой жилы, среднее содержание золота по данным трех очень близких по значениям определений составило 37,3 г/т. В остальных пробах атомно-абсорбционный анализ показал содержания золота первые десятые доли грамма на тонну.

Из материала наиболее богатой пробы, представленной белым сливным кварцем с тонкой вкрапленностью сульфидов, была отквартована навеска массой 159,2 г. Выполненные по ней исследования по определению условий нахождения самородного золота в руде включали:

- обработку всего материала навески плавиковой кислотой до полного растворения силикатных минералов;
- отбор из образовавшегося рудного концентрата самородного золота под биноклем, измерение, описание и распределение его по классам крупности;
- взвешивание рудного концентрата и обработку его азотной кислотой до полного растворения присутствующих в нем сульфидов и им подобных соединений;
- отбор из полученного остатка самородного золота под биноклем, измерение, описание и распределение его по классам крупности;
- определение (взвешиванием) массы выделенного самородного золота по классам крупности;
- расчет массы самородного золота в силикатной и рудной составляющих и ее доли в суммарном балансе золота.

Всего извлечено 830 золотин, их общая масса 4,183 мг. По полученным данным о массе золота в классах крупности и массе растворенного в кислотах силикатного и рудного материала рассчитаны фракционный состав и содержание выделенного самородного золота в силикатной и рудной матрицах.

Для получения морфологической характеристики самородного золота использованы все выделенные зерна, в том числе и из рудных минералов. Так как растворение рудных минералов проводилось в течение ограниченного количества времени в 60%-ной HNO_3 при комнатной температуре, а содержания серебра в высвободившихся из них золотилах не превышают 13 мас. %, то корродирующее воздействие кислоты на эти золотины было не существенным (на зерна с содержанием золота более 64 мас. % слегка действует только кипящая высококонцентрированная (более 86%) HNO_3 ; Малышев, Румянцев, 1979). Это подтверждается отсутствием у высвобожденных из сульфидов золотин следов растворения.

Минеральный состав поступивших в концентрат (после обработки пробы плавиковой кислотой) рудных минералов изучали под биноклем и в монтированных аншлифах. Для анализа минералов использованы энергодисперсионный спектрометр INCA (X-Maw-50) и сканирующий электронный микроскоп EVO-50 (с энергодисперсионными спектрометрами системы рентгеновского микроанализа Quantax), а также микронзонд Camebax (СВКНИИ ДВО РАН, аналитик Т. В. Субботникова и ГЕОХИ РАН, аналитик Н. Н. Кононкова). Это позволило выполнить качественный анализ 80 зерен сульфидов и 24 сростков рудных минералов с самородным золотом и количественный анализ состава 29 зерен сульфидов (47 определений), 100 частиц самородного золота (244 анализа) и находящихся с ними в сростках рудных минералов (16 анализов). Определение содержания элементов примесей в самородном золоте (13 анализов) выполнено в ГЕОХИ РАН на микронзондовом анализаторе Camebax (аналитик Н. Н. Кононкова). Фотографировали золотины на сканирующем электронном микроскопе EVO-50 в составе аппаратно-программного комплекса QEMSCAN (СВКНИИ ДВО РАН, аналитик О. Т. Соцкая).

ГЕОЛОГИЯ РУДНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ФРОНТ

Объект находится в северо-западной части Мякит-Хурчанского рудно-россыпного узла, входящего в состав Хурчан-Оротуканской золотоносной зоны на юго-восточном фланге Яно-Колымского золотоносного пояса (рис. 1). В тектоническом отношении узел расположен на юго-восточной окраине Куларо-Нерского террейна вблизи его границы с Охотско-Чукотским вулканогенным поясом и приурочен к участку пересечения зон Умарского и Хурчан-Оротуканского глубинных разломов.

Рудное проявление расположено в южной части Берентальского штока, слагающего центральную часть одноименной интрузивно-купольной структуры (см. рис. 1). На крыльях структуры

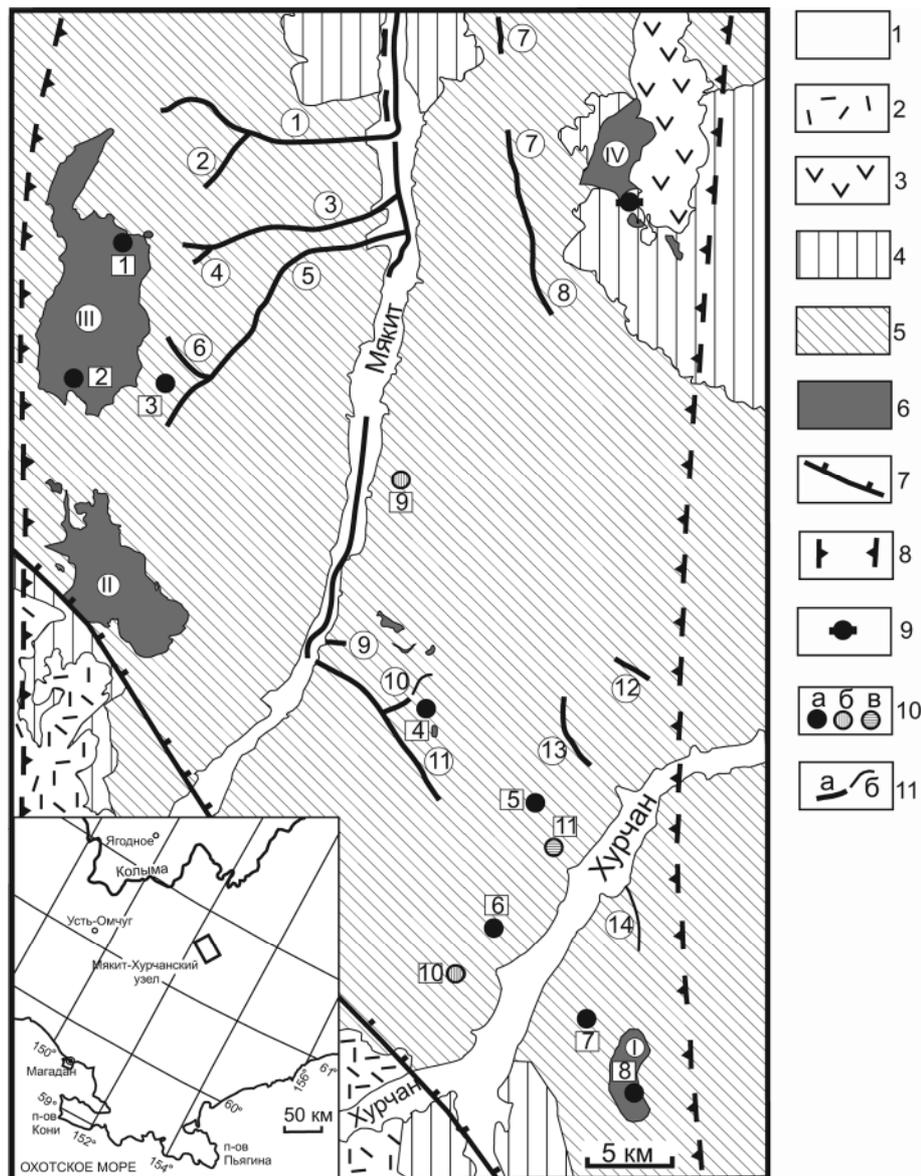


Рис. 1. Геологическая схема Мякиит-Хурчанского рудно-россыпного узла: 1 – четвертичные аллювиальные отложения речных долин; 2, 3 – позднекрейдовыи вулканиты кислого (2) и среднего (3) составов Охотско-Чукотского вулканогенного пояса; 4, 5 – юрские (4) и триасовые (5) терригенные и вулканогенно-терригенные отложения Куларо-Нерского террейна; 6 – раннекрейдовыи интрузии гранитоидов (штоки: I – Галлюцинация, II – Кункуй, III – Берентал, IV – Бутаный); 7 – структурная линия зоны Умарского регионального глубинного разлома; 8 – зона Хурчан-Оротуканского глубинного разлома; 9 – золоторудное месторождение Бутарное; 10 – рудные проявления: а – золота (1 – Берентал, 2 – Фронт, 3 – Кункуй, 4 – Безалаберный, 5 – Крутой, 6 – Хурчан, 7 – Галлюцинация, 8 – Штоковое), б – олова (9 – Мякиит, 10 – Ниса), в – вольфрама (11 – Чиклей); 11 – россыпи золота: а – промышленные (1 – Берентал, 2 – Забытый, 3 – 14-я Верста, 4 – Скальный, 5 – Кункуй, 6 – Плацдарм, 7 – Бутарный, 8 – Топограф, 9 – Лесной, 10 – Кривой, 11 – Безалаберный); 12 – Хмельной; 13 – Безымянный), б – непромышленные (10 – Кривой, 14 – Галлюцинация)

Fig. 1. Schematized geology of the Myakit-Khurchan Lode-Placer District: 1 – Quaternary alluvial deposits in river valleys; 2, 3 – Late Cretaceous acidic (2) and intermediate (3) composition of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt; 4, 5 – Jurassic (4) and Triassic (5) terrigenous and volcanic-terrigenous rocks of the Kular-Nera Terrain; 6 – Early Cretaceous granitoid intrusions (stocks: I – Hallucination, II – Kunkui, III – Berental, IV – Butany); 7 – Umar Regional Deep Fault structure line; 8 – zone of the Khurchan-Orotukan deep fault; 9 – Butarnoe Gold Lode; 10 – lode occurrences: а – gold (1 – Berental, 2 – Front, 3 – Kunkuy, 4 – Bezalaberny, 5 – Krutoy, 6 – Khurchan, 7 – Hallucination, 8 – Shtokovoe), б – tin (9 – Myakit, 10 – Nisa), в – tungsten (11 – Chikle); 11 – gold placers: а – minable (1 – Berental, 2 – Zabyty, 3 – Chetyrnadsataya Versta, 4 – Skalny, 5 – Kunkui, 6 – Platsdarm, 7 – Butarny, 8 – Topograf, 9 – Lesnoy, 10 – Krivoy, 11 – Bezalaberny, 12 – Khmelnoy, 13 – Bezymyanny), б – non-minable (10 – Krivoi, 14 – Hallucination)

развиты раннетриасовые отложения, представленные глинистыми и песчано-глинистыми сланцами, алевролитами и аргиллитами с маломощными горизонтами песчаников. Берентальский шток сложен лейкократовыми гранитами, относимыми на Северо-Востоке России к меловой гранодиорит-гранитной ассоциации I типа (Goryachev, Goncharov, 1995). Возраст гранитов 140 ± 1 , золотого оруденения – 141 ± 1 млн лет (Ньюберри и др., 2000).

Рудное проявление Фронт было выявлено в 60-х гг. XX в. Его перспективность оценена в ходе поисковых работ Берентальской партии в 1991–1993 гг. По результатам этих работ в южном эндоконтакте Берентальского штока среди грейзенизированных мелкозернистых гранитов была околонулена прожилково-жильная зона мощностью 70 м и протяженностью 300 м, приуроченная к разлому субмеридионального простирания (рис. 2). Она представлена крутопадающими кварцевыми жилами субмеридионального, реже северо-восточного, простирания мощностью 0,3–0,4 м при длине 100–200 м. Жилы сопровождаются разноориентированными кварцевыми прожилками мощностью 1–2 см. Кварц в жильных образованиях белый, дымчато-серый сливной с мелкой (реже гнездовой) вкрапленностью рудных минералов. Штуфным опробованием, проведенным вкrest и вдоль простирания зоны, в 9 из 22 отобранных проб установлено содержание золота более 1 г/т, при максимальном значении 54 г/т. Среднее содержание золота в прогнозируемом рудном контуре по 22 штуфным пробам составило 3,5 г/т. При подвеске оруденения 100 м подсчитанные по категории P_3 прогнозные ресурсы золота оценены в 5,5 т (В. В. Бурзайкин, 1995 г.).

Рудную минерализацию в пределах данного проявления несут мусковитовые, кварц-мусковитовые, гранат-мусковит-кварцевые, андалузит-мусковитовые (со шпинелью) грейзены и кварцевые жилы и прожилки. В грейзенах она представлена неравномерной вкрапленностью различных по размеру (от долей миллиметра до 2–3 мм) зерен арсенипирита, лёллин-

гита и сфалерита или их агрегатов. Суммарный объем рудной минерализации достигает 20–30% от объема породы. Иногда в сростках с арсенипиритом отмечаются очень мелкие или пленочные выделения пирита. Содержания золота в грейзенах, по данным пробирного и атомно-абсорбционного анализов, не превышают первых десятых долей граммов на тонну. Вероятно, они обусловлены тонкодисперсными выделениями самородного золота.

Богатая золоторудная минерализация связана с кварцевыми жилами и прожилками. Ее состав в кварцевых жилах впервые был описан Н. А. Горячевым (Горячев, Колесниченко, 1990). Он выделяет две разновозрастные ассоциации рудных минералов: ранняя сульфидно-арсенидная и более поздняя сульфотеллуридно-висмутовая. Резко преобладающая сульфидно-арсенидная (в дальнейшем (Горячев, 1998) она названа сульфидно-сульфоарсенидной) ассоциация пред-

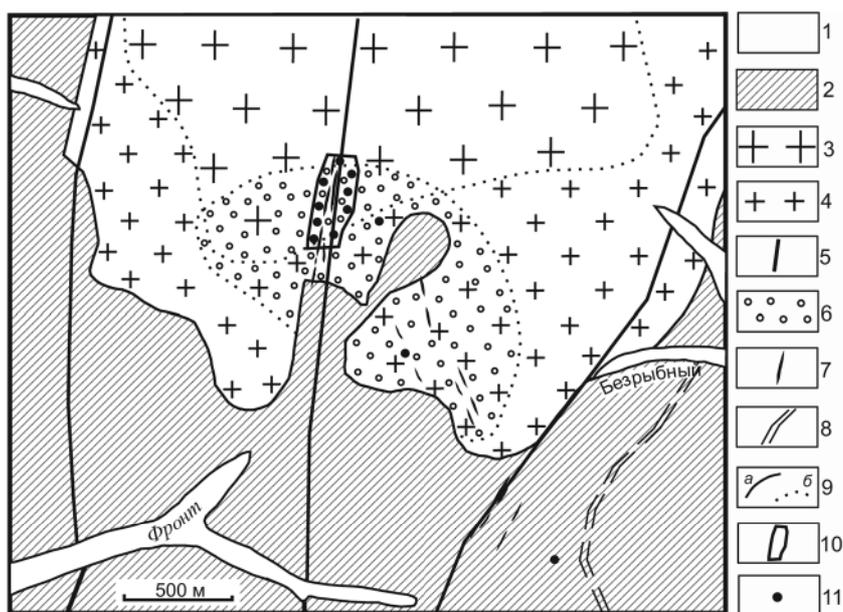


Рис. 2. Схема геологического строения рудного проявления Фронт (по материалам В. К. Романина и др., 2008 г.): 1 – четвертичные отложения (галечники, пески, суглинки); 2 – раннетриасовые сланцы, алевролиты, аргиллиты, песчаники; 3, 4 – крупно-среднезернистые (3) и мелкозернистые (4) биотитовые граниты Берентальского штока; 5 – разрывные нарушения; 6 – грейзены; 7 – кварцевые жилы; 8 – зоны кварцевых прожилков; 9 – геологические границы: а – установленные, б – условные; 10 – золотоносная рудная зона с оцененными прогнозными ресурсами (минерализованная зона дробления с прожилково-жильным окварцеванием); 11 – штуфные пробы с содержанием золота более 1 г/т

Fig. 2. Schematized geological structure of the Front Lode (according to V. K. Romanina et al., 2008): 1 – Quaternary rocks (pebble gravel, sand, loam); 2 – Early Triassic shale, siltstone, argillite, sandstone; 3, 4 – coarse-middle-grained (3) and small-grained (4) biotite granites of the Berental Stock; 5 – fracturing; 6 – greisens; 7 – quartz veins; 8 – quartz stringers; 9 – geological boundaries: a – established, b – conventional; 10 – gold ore zone with assessed indicated ore (mineralized crush belt with veinlet-veined quartz alteration); lump rocks with gold grade over 1 g/t

ставлена арсенопиритом, лёлленгитом (с примесью самородного висмута и золота), пирротином, сфалеритом. Количественная роль сульфотеллуридно-висмутовой ассоциации крайне невелика – доли процента от сульфидно-сульфоарсенидной. В ее составе выявлены висмутин, жозеит А и В, хедлейит, самородные золото и висмут. По последним данным, оруденение отнесено к золото-теллуридно-висмутовой (редкометалльной) формации (Кузнецов и др., 2011).

В исследованной пробе выделенные рудные минералы составили 0,4% от массы всей пробы. Они представлены преимущественно минералами сульфидно-сульфоарсенидной ассоциации: главным образом арсенопиритом и лёллингитом. В небольшом количестве отмечены пирит и сфалерит. В качестве микровключений в основном в лёллингите, реже в арсенопирите, выявлены округлые выделения пирротина. Высокое содержание в сфалерите железа (табл. 1) подтверждает представления Н. А. Горячева и П. П. Колесниченко

(1990) о высокотемпературных условиях формирования рудной минерализации на проявлении Фронт.

Минералы сульфотеллуридно-висмутовой ассоциации изучены главным образом в сростках с самородным золотом и в микровключениях в самородном золоте. В исследованной пробе эта ассоциация представлена самородным висмутом, висмутином, сульфотеллуридами висмута переменного состава (табл. 2), мальдонитом, самородным золотом, теллуридом золота(?). В количественном отношении минералы сульфотеллуридно-висмутовой ассоциации резко уступают минералам сульфидно-сульфоарсенидной ассоциации. Среди них преобладают сульфотеллуриды и сульфиды висмута, самородное золото и мальдонит. Поэтому данную ассоциацию предлагается называть мальдонит-золото-сульфотеллуридной. Минеральный же тип золото-редкометалльного оруденения, распространенного на рудном проявлении Фронт, может быть определен как мальдонит-сульфотеллуридный.

Таблица 1. Состав минералов сульфидно-сульфоарсенидной ассоциации, мас. %

Table 1. Composition of the sulfide-sulfoarsenide association minerals, mass %

Минерал	№ зерна	Элемент							Сумма
		Fe	As	S	Co	Ni	Sb	Zn	
Пирит	3	46,05	–	53,01	–	–	–	н. о.	99,06
	6	45,47	0,12	53,67	0,04	0,07	0,03	н. о.	99,37
Арсенопирит	30	34,27	46,98	19,95	–	–	–	н. о.	101,2
Лёлленгит	11	26,60	71,31	1,36	–	–	–	н. о.	99,27
	12	27,60	70,08	1,56	0,10	0,03	0,12	н. о.	99,37
Пирротин (включение в лёллингите)	12	62,82	0,30	37,33	0,02	–	0,02	н. о.	100,47
Пирротин (включение в арсенопирите)	14	62,57	0,90	36,5	0,01	–	0,01	н. о.	99,98
Сфалерит	19	13,69	н. о.	32,83	н. о.	н. о.	н. о.	52,61	99,12

Примечание. Здесь и в табл. 2 прочерк – элемент не обнаружен, н. о. – элемент не определялся.

Таблица 2. Состав минералов сульфотеллуридно-висмутовой ассоциации, мас. %

Table 2. Composition of the sulfotelluric-bismuth association minerals, mass %

Минерал	№ зерна	Элемент									Сумма
		Au	Ag	Bi	Te	S	Sb	Pb	Cu	Se	
Самородный висмут	18	н. о.	н. о.	97,58	н. о.	97,58					
Висмутин	5	н. о.	0,12	78,82	0,91	17,75	0,12	0,03	0,36	0,31	98,42
	13	н. о.	0,14	79,81	–	18,13	0,20	–	0,1	–	98,38
Сульфотеллурид висмута	6	н. о.	0,05	46,94	42,09	7,02	0,2	–	2,6	0,47	99,37
		н. о.	–	44,45	39,69	8,39	0,08	–	3,58	0,18	96,37
Мальдонит	9	65,77	н. о.	33,38	н. о.	–	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	99,15
	17	65,66	н. о.	33,84	н. о.	–	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	99,5
	24	66,04	н. о.	33,24	н. о.	–	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	99,28

Особенностью висмутовой минерализации на рудном проявлении Фронт, как уже отмечено, является широкое присутствие в ней мальдонита. В ходе проведенных исследований помимо микровключений в самородном золоте установлены три разновидности его выделений. Первая – очень мелкие самостоятельные зерна преимущественно комковидной формы. Вторая – выделения мальдонита, фрагментарно покрытые с поверхности тонкой оболочкой высокопробного самородного золота, придающей им темно-желтый цвет. Отличить такие выделения от образований самородного золота можно только при минераграфических исследованиях в монтированных аншлифах. И, наконец, третья разновидность – зерна мальдонита в сростках (в различных пропорциях) с очень высокопробным ветвисто-пористым самородным золотом, получившим в минералогическом обиходе название «губчатого» или петельчатой «мозговидной» текстуры (Нестеренко, 1991). Характер таких сростков (оторочки ветвисто-пористого самородного золота, окаймляющие сохранившиеся реликты мальдонита), присутствие в порах между «петельками» золота оксидов висмута указывают, что имело место замещение мальдонита самородным золотом с оксидами висмута.

Отмеченные разновидности мальдонита встречаются в небольшом количестве в остатке после растворения рудных минералов. Если также учесть и отмечающиеся самостоятельные ветвисто-пористые золотины с оксидами висмута как полностью замещенные зерна мальдонита, то можно констатировать, что на ранней стадии становления оруденения выделения мальдонита среди минеральных образований золота играли существенную роль. Зерна мальдонита составляли примерно 25% от общего количества выделений мальдонита и самородного золота. В дальнейшем произошло замещение части мальдонита высокопробным ветвисто-пористым самородным золотом, ассоциирующим с оксидами висмута.

Ветвисто-пористые выделения самородного золота обычно характерны для его гипергенных образований в окисленных рудах (Мурзин, Малюгин, 1987; Нестеренко, 1991; и др.). Но так как выраженная зона окисления на изучаемом объекте не проявлена, присутствующие в исследованной пробе выделения рудных минералов и самородного золота не несут следов гипергенных преобразований, то можно предположить, что замещение мальдонита самородным золотом и оксидами висмута произошло в результате его разложения в гипогенных условиях. Этот процесс рассмотрен во многих работах (Гамянин и др., 1986; Некрасов, 1991; Гамянин, 2001) и связывается с локальным повышением в рудообразующей системе фугитивности кислорода (Гамянин и др., 1986).

УСЛОВИЯ НАХОЖДЕНИЯ И ТИПОМОРФИЗМ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА

Условия нахождения и типоморфизм самородного золота в рудном материале проявления Фронт до настоящей работы оставались практически не исследованными. Лишь в публикации Н. А. Горячева и П. П. Колесниченко (1990) без указания способа определения и количества изученного материала приводятся данные по пробности самородного золота (860–890‰).

В исследованной пробе основная масса самородного золота выделена из силикатной матрицы (табл. 3). На зерна золота, находившиеся в рудных минералах, приходится всего лишь 4,3 мас. %. Представлено оно в рудных минералах зернами тонкой и пылевидной размерности (см. табл. 3). В жильном материале преобладает весьма мелкое и тонкое золото. Построение кумулятивного графика гранулометрического состава золота на вероятностном бланке по методике А. Н. Колмогорова (1941) показывает, что при увеличении массы пробы золотины крупнее 0,5 мм могут составить не более 0,1 мас. %.

Большинство исследователей отмечают, что для золото-редкометалльных месторождений ха-

Таблица 3. Гранулометрический состав самородного золота, мас. %

Table 3. Granulometric composition of native gold, mass %

Материал пробы	Доля в общем балансе пробы, мас. %	Условия нахождения	Содержание, г/т	Доля в общем балансе, мас. %	Фракции, мм					Средний диаметр, мм
					>0,025	0,025–0,05	0,05–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5	
Силикаты	99,6	В силикатах	23,8	95,7	–	7,6	27,1	60,3	5,0	0,14
Рудные минералы	0,4	В рудных минералах	232,4	4,3	6,3	35,0	58,7	–	–	0,06
В целом	100,0	В целом	24,9	100,0	0,3	8,9	28,5	57,3	4,8	0,13

Примечание. Прочерк – золото данной фракции не выявлено.

Таблица 4. Морфология монолитных выделений самородного золота, %

Table 4. Morphology of solid native gold, %

Условия нахождения	Классы крупности, мм	Форма золотин					Поверхность золотин			
		комковидная	таблитчатая	пластинчатая	дендриты	палочковидная	ямчатая	мелкоямчатая	ступенчатая	гладкая
В силикатах	0,25–0,5	100,0	–	–	–	–	–	20,0	80,0	–
	0,1–0,25	65,6	6,4	16,1	6,4	5,4	3,2	11,8	69,9	19,0
	0,05–0,1	78,8	2,2	11,2	5,2	2,6	0,9	12,1	75,8	11,2
	0,025–0,05	94,2	–	3,4	0,7	1,7	–	2,7	94,2	3,0
В рудных минералах	0,05–0,1	69,2	3,8	19,2	7,7	–	–	–	96,1	3,8
	0,025–0,05	78,9	11,3	9,8	–	–	–	7,0	85,9	7,0
	–0,025	100,0	–	–	–	–	–	–	68,8	31,2

Примечание. Прочерк – золотины с данными свойствами не выявлены.

рактально присутствие большого количества тонкодисперсных выделений самородного золота. Эти утверждения, как правило, носят предположительный характер. Конкретных материалов по количественной оценке тонкодисперсных выделений самородного золота очень мало. Это обусловлено тем, что даже с помощью новейших аналитических методов исследований выявить наличие таких выделений золота в рудном материале (обычно речь идет о сульфидах) очень трудно (Волков и др., 2006).

Полученные нами материалы позволяют косвенным образом оценить количество тонкодисперсных выделений самородного золота в исследованной пробе. Эта оценка вытекает из разницы содержания золота в пробе по данным атомно-абсорбционного анализа и рассчитанного содержания извлеченного самородного золота. Так как выделенные частицы самородного золота с учетом их пробности обеспечивают содержание только в 24,9 г/т против 37,0* г/т, по атомно-абсорбционному анализу, то можно предположить, что недостающее содержание (12,1 г/т) было обусловлено тонкодисперсными его выделениями. При отмыве остатков растворения материала пробы от кислот такие частицы самородного золота ушли вместе с водой. Размер дефицита содержания извлеченного самородного золота к содержанию по атомно-абсорбционному анализу позволяет считать, что на тонкодисперсные выделения приходится 32,7%.

Среди выделенных золотин по их сложению отмечены две разновидности: монолитные и пористые (ветвисто-пористые) с оксидами висмута. Первые в количественном отношении преобладают и представляют собой гипогенные образования самородного золота, отложившиеся из рудоносных растворов. Вторые присутствуют в

резко подчиненном количестве. Сложены они золотом пробностью около 1000‰ и, как уже отмечено, вероятнее всего, образовались в результате гипогенного разложения мальдонита.

Среди монолитных золотин по морфологии во всех классах крупности преобладают изометричные (комковидные) образования, в силикатной матрице преимущественно со ступенчатой, реже мелкоямчатой или гладкой поверхностью, а в рудных минералах – в основном со ступенчатой (отпечатки минералов матрицы) (рис. 3, табл. 4). Уп্লощенные разности золота и в силикатах, и в рудных минералах играют подчиненную роль (см. табл. 4). Среди золотин из кварцевого материала в небольшом количестве отмечены дендритоиды и палочковидные образования.

Монолитные изометричные выделения самородного золота представлены, главным образом, интерстициальными видами, реже – это плохоограниченные индивиды и их сростки или каплевидно-округлые зерна. Среди интерстициальных преобладают комковидно-угловатые (с быстро выклинивающимися выступами) и комковидно-гнездовые (без угловатых выступов) разновидности, в небольшом количестве отмечены уплощенно-комковидные образования (см. рис. 3).

Пористые золотины, образовавшиеся в результате разложения мальдонита, имеют преимущественно комковидный облик (рис. 4). Их ветвисто-пористое строение видно лишь при большом увеличении на сканирующем электронном микроскопе (см. рис. 4). Текстура таких золотин, представляющих собой агрегат петельчатых выделений самородного золота, очень разнообразна. Во-первых, они различаются размером «петелек» и межпетельного пространства, иногда заполненного оксидами висмута (см. рис. 4). По этому признаку можно говорить о микро- и мелкопористой текстуре (в случае наличия оксидов висмута – о микро- и мелкографической структуре)

* Рассчитано как разность между общим содержанием и долей золота, приходящейся на мальдонит.

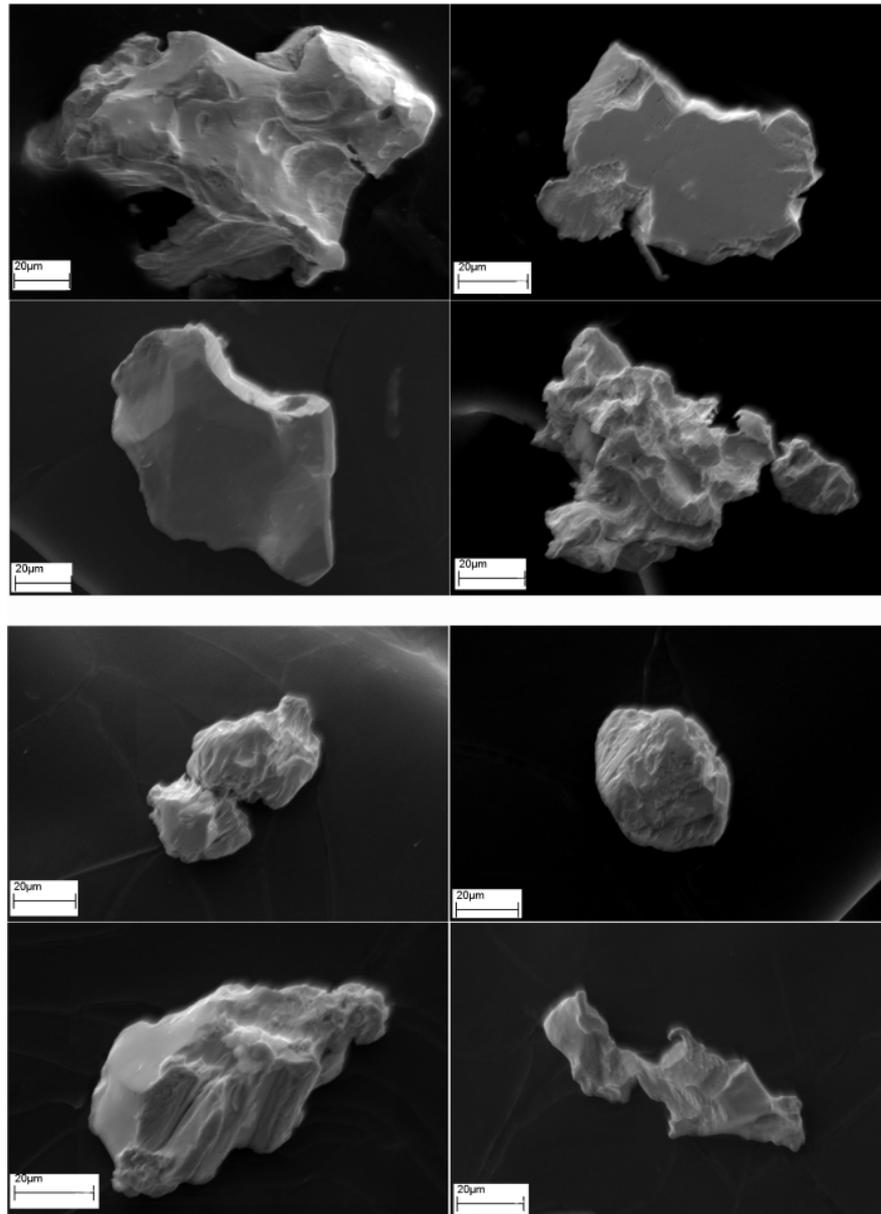


Рис. 3. Морфология монолитных выделений самородного золота, высвобожденных из силикатных (четыре верхние фотографии) и рудных (четыре нижние) минералов

Fig. 3. Morphology of solid particles of native gold released from silicate (the upper 4 photos) and ore (the lower 4) minerals

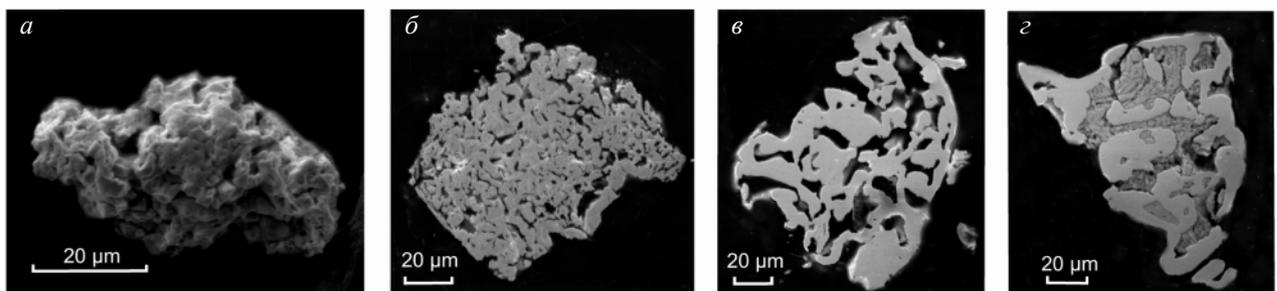


Рис. 4. Морфология (а) и внутреннее сложение (б-г) пористых золотин (б-г – монтированные шлифы, темно-серый фон – наполнитель, г – светло-серое – золото, серое – оксиды висмута)

Fig. 4. Morphology (a) and inner structure (b-g) of porous gold: (b-g – pictures show mounted polished sections, the filler substance is dark-gray; g – the light-gray is gold, the gray is bismuth oxide)

таких золотин. При этом более крупные золотины, как правило, характеризуются мелкопористой текстурой (см. рис. 4). Во-вторых, такие золотины различаются по соотношению суммарного объема (в их плоскости среза – суммарной площади) самородного золота, оксидов висмута и пустот (см. рис. 4). В исследованных зернах, отношение суммарного объема самородного золота к суммарному объему пустот и оксидов висмута составляет от 1:1 до 4:1.

Пробность самородного золота в пористых зернах, как уже отмечено, близка к 1000%. Пробность монолитных золотин колеблется от 866 до 1000% и согласуется с данными по со-

ставу самородного золота рудного проявления Фронт, полученными Н. А. Горячевым (Горячев, Колесниченко, 1990). И в кварце, и в рудных минералах четко выявляются две группы монолитных выделений самородного золота: среднепробная-высокопробная и весьма высокопробная (рис. 5).

Среднепробная-высокопробная группа монолитных золотин – основная. В целом можно отметить, что как в рудных минералах, так и в силикатной матрице резко преобладают зерна пробностью 890–950% (см. рис. 5). Именно золотины с данной пробностью и являются определяющими для исследованного оруденения.

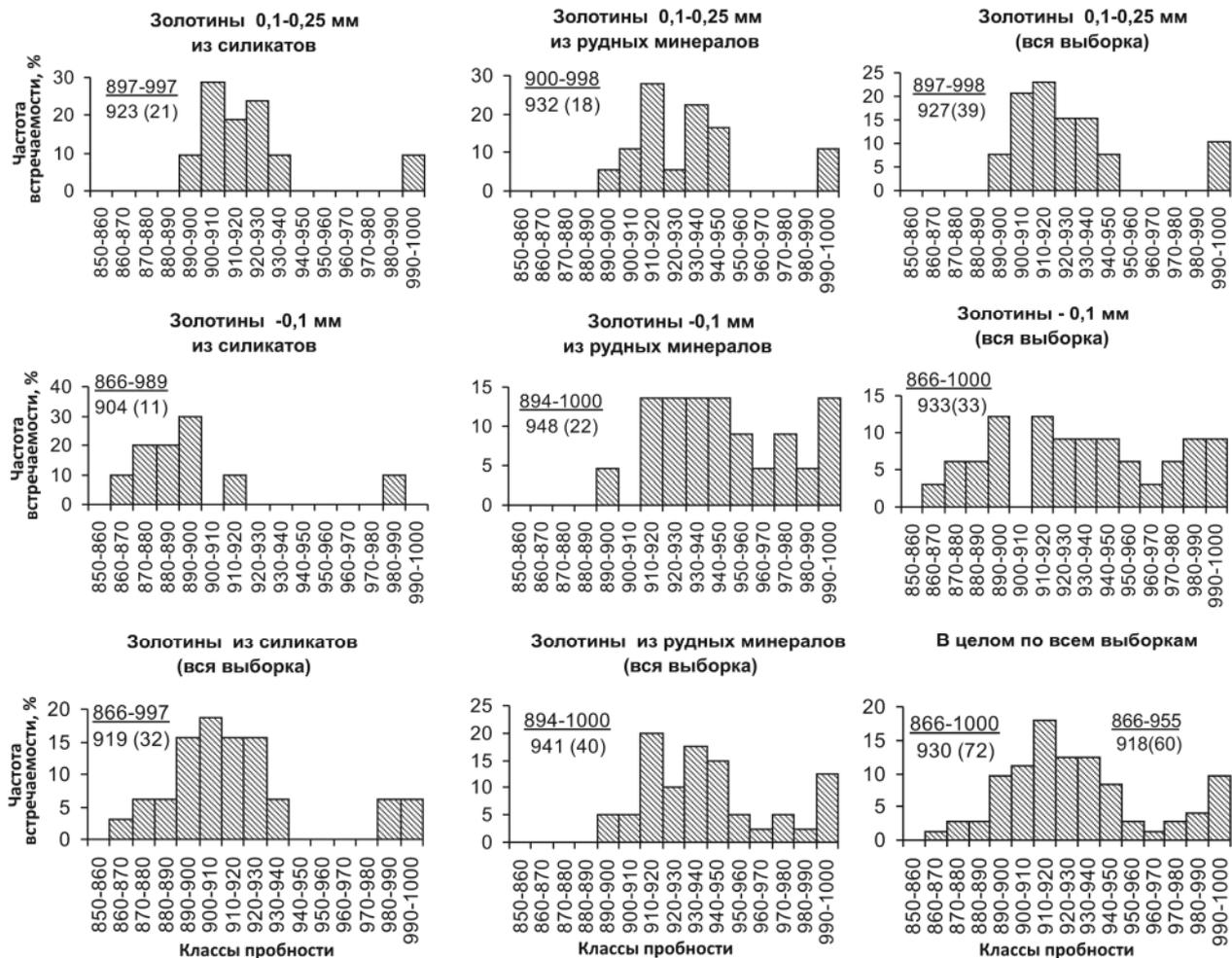


Рис. 5. Гистораммы пробности самородного золота различной крупности. В числителе – интервал колебания пробности золотин, в знаменателе – среднее значение пробности по всем золотинам, в скобках – количество исследованных золотин. На итоговой гисторамме в надписи в правом углу – то же для среднепробной-высокопробной группы выделений самородного золота. Пробность золотин рассчитана как среднее из 2–4 микрозондовых анализов

Fig. 5. Frequency histograms of solid gold particles differing in fineness. The histogram indications: above the line – gold fineness fluctuation interval; below the line – the average of all gold fineness values; in brackets – the number of analyzed gold particles. In the right-hand corner, the resulting histogram presents the same values for middle and high-fineness native gold. The fineness of gold particles is calculated as the average of 2–4 microprobe analyses

Таблица 5. Состав самородного золота, мас. %

Table 5. Native gold composition, mass %

Разновидность золотин по текстурному сложению	№ зерна	Элемент												Сумма
		Au	Ag	Fe	As	Zn	Pb	Cu	Bi	Te	Sb	Hg	Se	
Монолитные	22	89,14	10,25	0,03	0,04	0,06	0,03	0,02	–	0,07	0,04	0,36	–	100,05
	21	89,71	10,17	0,11	–	–	0,02	0,06	–	0,12	–	0,12	–	100,32
	20	87,36	11,79	–	–	–	0,02	–	–	0,03	0,02	0,38	0,03	99,63
	19	98,71	0,67	0,04	–	–	–	0,05	–	0,04	0,02	0,29	–	99,82
	18	87,75	11,06	–	–	0,01	–	–	0,09	0,1	0,04	0,32	–	99,37
	17	87,73	11,3	0,04	–	–	0,03	0,11	–	0,12	0,08	0,49	–	99,89
	10	86,97	12,79	–	–	–	–	0,08	0,17	0,15	–	0,21	–	100,37
	11	98,09	0,75	0,07	–	0,01	0,02	0,06	0,22	–	–	0,38	0,03	99,63
	12	88,21	11,25	0,03	–	0,03	0,09	0,09	–	0,14	–	0,14	–	99,98
	14	89,38	10,27	–	–	–	–	0,04	–	0,11	0,19	0,28	–	100,29
	15	91,02	8,3	0,08	–	–	–	0,07	–	0,12	0,01	0,19	0,03	99,81
Пористые	23	73,29	0,77	–	–	0,06	–	0,06	0,06	0,05	0,08	0,81	0,01	75,20
	16	81,68	0,69	0,03	–	–	0,16	0,06	3,35	–	0,1	0,25	0,02	86,35

Примечание. Прочерк – элемент не обнаружен.

Среди них максимально распространены зерна пробностью 910–920‰. В качестве важной характеристики отметим двумодальное распределение и более высокую пробу самородного золота в рудных минералах, более широкий интервал ее вариаций для субмикроскопических выделений (см. рис. 5).

Что касается выявленных в небольшом количестве монолитных весьма высокопробных золотин (пробностью более 975‰), то тут можно отметить следующее. На приведенных (см. рис. 5) гистограммах они однозначно выделяются в отдельную группу, т. е. могут представлять иную генерацию золота. Считать выявленные монолитные весьма высокопробные выделения гипергенными – нет оснований. Весьма высокопробное золото (до 1000‰) отмечено в золото-редкометалльных проявлениях на Северо-Востоке России (Гамянин и др., 1998; Горячев, 1998). Следовательно, и в рудном проявлении Фронт в очень небольшом количестве присутствуют гипогенные монолитные выделения весьма высокопробного золота, но существенной роли в общем балансе металла они не играют.

Выполненные ранее исследования геохимического состава самородного золота золото-редкометалльных проявлений на Северо-Востоке России показали, что они характеризуются либо очень чистым, практически беспримесным золотом (Шило и др., 1988), либо оно имеет ярко выраженную висмутовую специализацию (Гамянин, 2001). В ходе проведенных исследований состава монолитных выделений самородного золота из рудного проявления Фронт установлено, что по частоте встречаемости элементов

примесей оно медисто-теллуру-ртутистое (табл. 5). Так как медь и ртуть являются очень распространенной примесью в золоте рудных проявлений Яно-Колымского золотоносного пояса (Гамянин, 2001), то типоморфным для самородного золота рудного проявления Фронт определенно можно считать теллур. При этом отмечена его устойчивая положительная корреляционная связь с серебром (коэффициент корреляции 0,74). Теллуровая специализация самородного золота для рассматриваемого мальдонит-сульфотеллуридного типа золото-редкометалльного оруденения вполне закономерна. Оно кристаллизовалось совместно с мальдонитом, для отложения которого благоприятны малосернистые, теллуридные гидротермальные растворы (Гамянин и др., 1986). Висмут же, не смотря на тесную связь золота с висмутовой минерализацией, на данном рудном проявлении не является для самородного золота характерной примесью. Достаточно часто в нем отмечаются сурьма и железо (см. табл. 5).

Исследование состава пористых золотин показало присутствие в таком золоте в отдельных случаях повышенных содержаний висмута (до 3,35 мас. %). Это подтверждает представления о том, что образование данных выделений самородного золота происходило в результате разложения мальдонита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлен новый для Северо-Востока России минеральный тип золото-редкометалльного оруденения – мальдонит-сульфотеллуридный. Тем самым подтверждены представления (Гамянин, и др.,

1986), что на Северо-Востоке России в золото-редкометалльных проявлениях мальдонит является не экзотическим, а распространенным минералом. На ранней стадии становления оруденения проявления Фронт на него приходилось примерно 25% от общего количества выделений минеральных образований золота.

В рудном проявлении Фронт присутствуют две генетические разновидности выделений самородного золота. Основная их масса кристаллизовалась из рудоносных растворов совместно с висмутовыми минералами и отлагалась преимущественно в интерстициальных полостях и трещинах ранее раскристаллизовавшихся кварца и рудных минералов сульфидно-сульфоарсенидной ассоциации. Подавляющее количество таких выделений сосредоточено в кварце. Незначительная часть самородного золота (пористое) образовалась в результате гипогенного разложения мальдонита. Отношение суммарного объема самородного золота к суммарному объему оксидов висмута и пустот в таких золотилах не соответствует теоретическому (теоретически в золотилах, образовавшихся в результате разложения мальдонита, оно должно быть 1:2, а в исследованных золотилах составляет от 1:1 до 4:1). Данный факт, а также наличие пористых золотин без оксидов висмута указывают на то, что вопрос генезиса этого золота очень сложный и требует специального изучения.

Типоморфными признаками для самородного золота мальдонит-сульфотеллуридного минерального типа золото-редкометалльного оруденения рудного проявления Фронт являются: высокая и очень высокая пробность, весьма мелкая размерность и преимущественно изометричная комковидная форма выделений, теллуровая геохимическая специализация, тесная ассоциация с мальдонитом, наличие золотин с ветвисто-пористым строением.

Полученные данные об условиях нахождения и гранулометрическом составе самородного золота в проявлении Фронт (прежде всего существенная роль зерен крупнее 0,1 мм, преимущественно интерстициальный вид выделений) должны учитываться при разработке рациональной методики опробования месторождений с подобным типом оруденения. Учет этих данных позволит уточнить массу отбираемых проб, схему их обработки.

ЛИТЕРАТУРА

- Волков А. В., Савва Н. Е., Сидоров А. А. и др. Золоторудное месторождение Школьное (Северо-Восток России) // Геол. рудн. месторожд. – 2011. – Т. 53, № 1. – С. 3–11.
- Волков А. В., Черепанова Н. В., Прокофьев В. Ю. и др. Месторождение золота в гранитном штоке Бутарный (Северо-Восток России) // Геол. рудн. месторожд. – 2013. – Т. 55, № 3. – С. 214–237.
- Волков А. В., Генкин А. Д., Гончаров В. И. О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинское и Майское (Северо-Восток России) // Тихоокеан. геология. – 2006. – Т. 25, № 6. – С. 18–29.
- Гамянин Г. Н., Гончаров В. И., Горячев Н. А. Золото-редкометалльные месторождения Северо-Востока России // Тихоокеан. геология. – 1998. – Т. 17, № 3. – С. 94–103.
- Гамянин Г. Н., Некрасов И. Я., Самусиков В. П. Мальдонит из золоторудных проявлений Восточной Якутии // Минерал. журн. – 1986. – Т. 8, № 3. – С. 65–71.
- Гамянин Г. Н. Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозойд. – М.: ГЕОС, 2001. – 222 с.
- Горячев Н. А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. – 210 с.
- Горячев Н. А., Колесниченко П. П. Граниты и грейзены Мякитского интрузива как пример локальной рудно-магматической системы // Рудно-магматические системы Северо-Востока СССР: сб. науч. тр. / под ред. Н. А. Шило, В. И. Гончарова. – Хабаровск: Хабаровск. политех. ин-т, 1990. – С. 41–53.
- Горячев Н. А., Гамянин Г. Н. Золото-висмутовые (золото-редкометалльные) месторождения Северо-Востока России: типы и перспективы промышленного освоения // Золоторудные месторождения Востока России: тр. III Всерос. симп. «Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология» (Улан-Удэ, 21–25 сент. 2004 г.). – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2006. – С. 50–61.
- Колмогоров А. Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР. – 1941. – Т. 31, № 2. – С. 99–101.
- Кузнецов В. М., Горячев Н. А., Жигалов С. В., Савва Н. Е. Структура и рудоносность Мякит-Хурчанского рудно-россыпного узла // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2011. – № 4. – С. 37–51.
- Мальшиев В. М., Румянцев Д. В. Золото. – М.: Металлургия, 1979. – 288 с.
- Мурзин В. В., Малюгин А. А. Типоморфизм золота зоны гипергенеза (на примере Урала). – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. – 96 с.
- Некрасов И. Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. – М.: Наука, 1991. – 302 с.
- Нестеренко Г. В. Прогноз золотого оруденения по россыпям (на примере районов юга Сибири). – Новосибирск: Наука, 1991. – 191 с.
- Ньюберри Р. Дж., Лейер П. У., Ганз П. Б. и др. Предварительный анализ хронологии мезозойского магматизма, тектоники и оруденения на Северо-Востоке России с учетом датировок $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и данных по рассеянным элементам изверженных и оруденелых пород // Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики: тр. Всерос. совещ. Магадан, 4–6 сент. 1997 г.: в 2 т. Т. 1. Геология, геохронология и геохимия. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. – С. 181–205.
- Сидоров А. А. Золото-порфиновые месторождения Северо-Востока России // Там же. Т. 2. Рудная минерализация и петрогенезис. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. – С. 106–109.

Шило Н. А., Гончаров В. И., Альшевский А. В., Ворцелнев В. В. Условия формирования золотого орудения в структурах Северо-Востока СССР. – М. : Наука, 1988. – 181 с.

Goryachev N. A., Goncharov V. I. Late Mesozoic granitoid magmatism and related gold and tin mineralization of North-East Asia // Resource Geology Special Issue. – 1995. – No. 18. – P. 111–122.

Lang J. R., Baker T., Hart C. J. et al. An exploration model for intrusion-related gold systems // SEG Newsletter. – 2000. – No. 40. – P. 6–15.

Newberry R. J., McCoy D., Brew D. A. Plutonic-hosted gold ores in Alaska: igneous vs. metamorphic origins // Resource Geology Special Issue. – 1995. – No. 18. – P. 61–109.

Поступила в редакцию 19.12.2014 г.

NATIVE GOLD TYPOMORPHISM AT THE FRONT AU LODGE, NORTH-EAST OF RUSSIA

L. A. Solomentseva, I. S. Litvinenko

This paper presents the results of studying typomorphic properties of native gold from the Front gold-rare metal lode hosted in the Early Cretaceous leucocratic granites at the southeastern flank of the Yana-Kolymian Gold Belt. The INCA energy dispersion spectrometer (X-Maw-50), EVO-50 scanning microscope and Camebax electron microprobe analyzer was used to examine ore minerals in quartz veins. As a result, the mineralization type of the lode has been specified, and the principal typomorphic characters of native gold have been defined. These include crystallization of gold in association with bismuth minerals (mainly maldonite), its occurrence in interstices and fractures of earlier crystallized quartz and sulfide-sulfoarsenide minerals, a very high fineness, and quite a small size. Native gold is mostly present in quartz (95,7 mass % of its total amount). Gold particles less than 0,25 mm make up 95,2%. Finely dispersed gold smaller than 0,01 mm makes up 32,7% of the native gold balance in the ore. Native gold is dominated by fineness 890–950‰, and gold particles of 910–920‰ are the most frequent within this interval. Tellurium is a typomorphic admixture in native gold. Small quantities of very high-fineness ramose-porous gold particles with bismuth oxides, resulted from maldonite hypogenic decomposition, are noticed. Wide-spread maldonite permitted researchers to classify the Front Au-rare metal lode as the maldonite-sulfotelluride mineralization type.

Key words: gold-rare metal mineralization, gold, typomorphism.