

---

---

**МИНЕРАЛЫ  
И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ**

---

---

**МАЛЬДОНИТ, ЮТЕНБОГААРДИТ И РАЗНОВИДНОСТИ САМОРОДНОГО  
ЗОЛОТА ИЗ РУДНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ НИЖНЕ-МЯКИТСКОГО  
РУДНО-РОССЫПНОГО УЗЛА (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)**

© 2020 г. д. чл. И. С. Литвиненко<sup>1</sup>, \*, Л. А. Шилина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,  
ул. Портовая, 16, Магадан, 685000 Россия*

*\*e-mail: litvinenko@neisri.ru*

Поступила в редакцию 24.10.2019 г.

После доработки 18.03.2020 г.

Принята к публикации 08.04.2020 г.

Описаны выделения мальдонита, ютенбогаардита, губчатого и “горчичного” самородного золота из рудных проявлений связанной с гранитным интрузивом золото-рудной системы (RIRGD-системы) в юго-восточной части Яно-Колымского золотоносного пояса. Мальдонит установлен в висмут-сульфотеллуридном минеральном типе оруденения рудопроявлений Фронт и Плацдарм, ютенбогаардит – в сульфидно-сульфоарсенидном типе на рудопроявлении Плацдарм. В результате гипогенных преобразований произошло замещение части мальдонита губчатым высокопробным самородным золотом, ассоциирующим с оксидами висмута. Микропористые выделения “горчичного” золота, в поровом пространстве которого отмечается кераргирит, сформировались на рудопроявлениях Берентал и Плацдарм предположительно в результате гипергенного разложения ютенбогаардита.

*Ключевые слова:* золотое оруденение, мальдонит, ютенбогаардит, губчатое и “горчичное” золото

**DOI:** 10.31857/S0869605520030041

## ВВЕДЕНИЕ

В статье приводятся результаты исследований мальдонита, ютенбогаардита, губчатого и “горчичного” золота, выявленных на золоторудных проявлениях Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла в юго-восточной части Яно-Колымского золотоносного пояса. Вследствие ограниченного распространения их новые находки, несомненно, представляют научный интерес.

Изученные минералы были установлены в штучных, протолочных и шлиховых пробах. Протолочные и шлиховые (из элювиальных развалов рудных тел) пробы обогащались на лотке. Раздробленный до 1.0 мм материал штучных проб последовательно растворялся в плавиковой и азотной кислотах. После каждой стадии растворения из полученного остатка проводился отбор минералов золота под бинокляром.

Изучение состава зерен минералов золота выполнено в монтированных аншлифах методом локального микрорентгеноспектрального анализа на микрозондовом анализаторе Camebax 304 с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 английской фирмы Oxford Instruments, программное обеспечение Inca Energy (СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитики Т.В. Субботникова и Е.М. Горячева). С целью подтверждения возможности присутствия в губчатом и “горчичном” золоте, помимо золота и

серебра, значимых концентраций других элементов аншлифы также изучались на сканирующем электронном микроскопе EVO-50 германской фирмы Carl Zeiss с рентгеновской системой энергодисперсионного микроанализа Quantax американской корпорации Bruker (СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитик О.Т. Соцкая). Исследование текстурного строения губчатого и “горчичного” золота выполнено на сканирующем электронном микроскопе EVO-50 (аналитик О.Т. Соцкая) и растровом электронном микроскопе SIGMA HD (ННЦМБ ДВО РАН, ЦКП “Дальневосточный центр электронной микроскопии”, г. Владивосток, аналитик Д.В. Фомин) при увеличениях до 10 тыс.

Микроэлементный состав (на 10 примесных элементов) золота изучался в смонтированных аншлифах на микронзондовом анализаторе Camebax SX 1000 (ГЕОХИ РАН, г. Москва, аналитик Н.Н. Кононкова).

### ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ НИЖНЕ-МЯКИТСКОГО РУДНО-РОССЫПНОГО УЗЛА

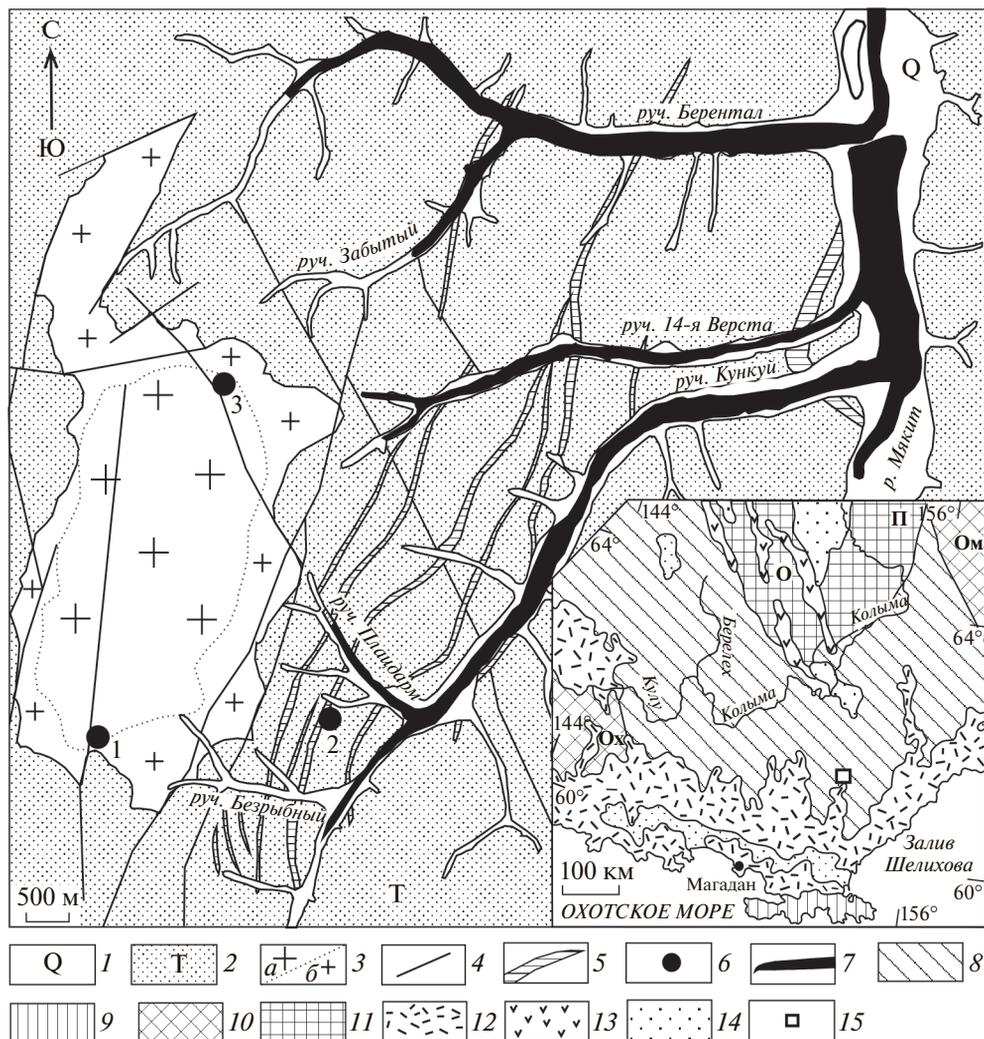
Нижне-Мякитский рудно-россыпной узел входит в состав Хурчан-Оротуканской золотоносной зоны на юго-восточном фланге Яно-Колымского золотоносного пояса. В тектоническом отношении он расположен в зоне юго-восточного замыкания Яно-Колымской складчатой системы Верхояно-Чукотской складчатой области вблизи ее границы с Охотско-Чукотским вулканогенным поясом (рис. 1).

Рудно-россыпной узел приурочен к Берентальскому штоку и восточному крылу одноименной интрузивно-купольной структуры (рис. 1). Берентальский шток сложен лейкократовыми гранитами, относящимися к позднеюрско-раннемеловой гранодиорит-гранитной ассоциации I типа (Goryachev, Goncharov, 1995). На восточном крыле Берентальской структуры развиты раннетриасовые отложения, представленные глинистыми и песчано-глинистыми сланцами, алевролитами и аргиллитами с горизонтами песчаников.

В пределах Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла установлено около 60 точек минерализации и мелких рудных проявлений. Исследованные минералы золота изучались на рудопроявлениях Фронт, Плацдарм и Берентал, связанных с Берентальской гранитной интрузией (рис. 1). Развитое на них оруденение соответствует типу месторождений золота, связанных с восстановленными интрузивами (Thompson, Newberry, 2000; Lang, Baker, 2001; Hart, 2007, и др.). В англоязычной литературе этот тип месторождений обозначается аббревиатурой RIRGD (Reduced Intrusive Related Gold Deposit).

**Рудопроявление Фронт** располагается в южной части Берентальского штока. Оно представлено пологозалегающей рудной зоной сульфидно-кварцевого прожилкования и березитизации. Богатая золоторудная минерализация связана с кварцевыми жилами и прожилками. В них выделяются две ассоциации рудных минералов: сульфидно-арсенидная и сульфотеллуридно-висмутовая (Горячев, Колесниченко, 1990). Сульфидно-арсенидная ассоциация представлена арсенопиритом, лёллингитом (с примесью самородного висмута и золота), пиритом, пирротином, сфалеритом. В составе сульфотеллуридно-висмутовой ассоциации выявлены висмутин, жозеит *A* и *B*, хедлейит, самородное золото и висмут (Горячев, Колесниченко, 1990).

В исследованной авторами штучной пробе сульфотеллуридно-висмутовая ассоциация представлена самородным висмутом, висмутином, сульфотеллуридами висмута переменного состава, мальдонитом, самородным золотом, теллуридом золота (?). Золото преимущественно весьма мелкое (0.1–0.25 мм) и тонкое (менее 0.1 мм). Отмечаются две разновидности золотин: монолитные и губчатые с включениями оксидов висмута. Монолитные золотины в количественном отношении преобладают. Пробность их колеблется от 866 до 1000‰ (в основном 890–950‰). Губчатые зерна сложены золотом с пробностью около 1000 ‰. Оруденение отнесено к висмут-сульфотеллурид-



**Рис. 1.** Геологическая схема Нижне-Мьякитского рудно-россыпного узла. Составлена на геологической основе В.В. Буржайкина (1995 г.) с дополнениями и упрощениями. 1 – четвертичные аллювиальные отложения речных долин; 2 – триасовые терригенные и вулканогенно-терригенные отложения Балыгычанского поднятия Яно-Кольмской складчатой системы; 3 – раннемеловые среднезернистые (а) и мелкозернистые (б) биотитовые граниты Берентальского штока; 4 – разрывные нарушения; 5 – минерализованные зоны дробления с прожилково-жильным окварцеванием и вкрапленно-прожилковой рудной минерализацией; 6 – золоторудные проявления (1 – Фронт, 2 – Плащдар, 3 – Берентал); 7 – россыпи золота; 8–14 – геологические структуры на врезке: 8, 9 – Верхояно-Чукотская (8) и Корякско-Камчатская (9) складчатые области; 10 – Охотский (Ох) и Омолонский (Ом) срединные массивы; 11 – Омулевское (О) и Приколымское (П) поднятия; 12, 13 – Охотско-Чукотский (12) и Уяндино-Ясачненский (13) вулканогенные пояса; 14 – наложенные кайнозойские впадины; 15 – местоположение Нижне-Мьякитского рудно-россыпного узла.

**Fig. 1.** Geological scheme of the Nizhne-Myakitsky mineral district (after V. V. Burzaikin, 1995 year with additions and simplifications).

ному минеральному типу (зона с Au–Bi–Te ± W “стилем” минерализации RIRGD-систем; Hart, 2007).

**Рудопроявление Плацдарм** локализовано в триасовых терригенных породах на восточном крыле Берентальской интрузивно-купольной структуры (рис. 1). Рудные тела представляют собой протяженные зоны смятия, сопровождающиеся прожилково-жильным окварцеванием и вкрапленно-прожилковой сульфидизацией.

В исследованной протолочной пробе из сульфидно-кварцевой жилы в днище долины руч. Плацдарм среди рудных минералов преобладает арсенопирит при подчиненной роли пирита и очень небольшом количестве сфалерита и самородного золота. В качестве микровключений в самородном золоте установлены серебро- и висмутсодержащий галенит (содержания Bi достигают 7.83 мас. %), ютенбогаардит, сульфоарсениды серебра. Размер золотин не превышает 1.0 мм. Преобладают зерна с пробностью 700–750 и 800–850‰ (средняя – 799‰). В протолочной пробе из развитой здесь же серии сульфидно-кварцевых прожилков присутствуют пирит, в значительно меньшем количестве арсенопирит и халькопирит. Установлены два типа золота. Первый тип представлен зернами крупностью до 0.5 мм в сростках с сульфидами и кварцем. Пробность золотин колеблется от 727 до 900‰, средняя – 818‰. В низкопробных золотинах выявлен ютенбогаардит. Второй тип включает золотины в сростках с кварцем и породой. Крупность золотин достигает 2.0 мм, пробность колеблется от 670 до 788‰, средняя – 713‰. В качестве включений в низкопробном золоте, помимо пирита и арсенопирита, установлены селенистый галенит, акантит, ютенбогаардит, пирротин.

В опробованной авторами системе сульфидных прожилков на междуречье Плацдарм–Безрыбный мощность прожилков достигает 3–5 см. Сложены они арсенопиритом с вкрапленностью халькопирита, сфалерита и ковеллина. Арсенопирит несет следы выщелачивания, разбит на отдельные слабосвязанные между собой обломки, замещенные с поверхности оксидами и гидроксидами мышьяка и железа. Размер выделенных из штуфной пробы зерен золота менее 0.1 мм. Пробность их колеблется от 640 до 843‰ (при преобладании зерен с пробностью от 650 до 800‰), средняя пробность составляет 724‰. Около 20% зерен находятся в сростках с “горчичным” золотом.

По минеральному составу охарактеризованное оруденение отнесено к сульфидно-сульфоарсенидному минеральному типу (зона с As–Au “стилем” минерализации RIRGD-систем; Hart, 2007).

В исследованной штуфной пробе из системы карбонатно-кварцевых прожилков на междуречье Плацдарм–Безрыбный масса рудных минералов составила около 10%. В основном это арсенопирит, в единичных зернах – вольфрамит. Примерно в равных пропорциях выявлены зерна самородного золота и мальдонита (или его сростки с самородным золотом). Самородное золото представлено зернами размером менее 0.1 мм. Пробность золотин колеблется от 896 до 1000‰, средняя – 949‰. По аналогии с рудопроявлением Фронт данное оруденение можно отнести к висмут-сульфотеллуридному минеральному типу.

**Рудопроявление Берентал** представлено зонами сульфидно-кварцевого прожилкования в березитизированных гранитах в северной части Берентальского штока. Рудная минерализация в кварцевых жилах и прожилках составляет 5–30%. В протолочке из кварцевой жилы обнаружены магнетит и пирит, в небольшом количестве – арсенопирит, галенит, сфалерит, акантит, самородное золото; в аншлифах – арсенопирит, пирит, галенит, кобеллит и галеновисмутит (Кузнецов и др., 2011).

В исследованной авторами шлиховой пробе, отобранной из окисленных руд в минерализованной тектонической зоне, основная масса тяжелой фракции представлена сульфатом свинца в виде самостоятельных зерен и псевдоморфоз по галениту. В подчиненном количестве присутствуют оксиды и гидроксиды свинца, железа и марганца, выветрелые зерна биотита, галенит; небольшую долю составляют пирит, арсенопирит, гранат, ковеллин, самородные золото и свинец. В обломках рудного материала

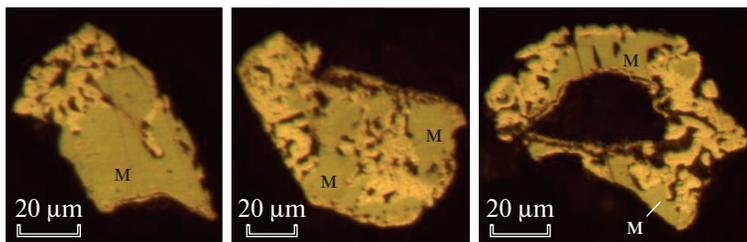


Рис. 2. Сростки мальдонита (М) с губчатым золотом. Изображения в отраженном свете.

Fig. 2. Maldonite (M) intergrowths with sponge native gold. Reflected light images.

установлены галенит, сфалерит, халькопирит, пирит, арсенопирит, лёллингит, пирротин. Среди выделений золота в массовом отношении преобладают зерна класса 0.1–0.25 мм. Установлены две разновидности золотины: монолитные и микропористые. Монолитные золотины составляют 44.8%. Пробность золота в них колеблется от 499 до 934‰, средняя – 759‰. На микропористые выделения (“горчичное” золото), приходится 55.2%. Сложены такие зерна высокопробным (около 1000‰) золотом. Широкий интервал колебания пробности самородного золота указывает на связь оруденения с различными стадиями развития RIRGD-системы.

#### ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И СОСТАВА МАЛЬДОНИТА, ЮТЕНБОГААРДТИТА, ГУБЧАТОГО И “ГОРЧИЧНОГО” ЗОЛОТА

Исследованные в рудных проявлениях Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла минералы золота представлены мальдонитом, ютенбогаардтитом, губчатым и “горчичным” золотом.

**Мальдонит** выявлен на рудных проявлениях Фронт и Плацдарм в висмут-сульфотеллуридном минеральном типе оруденения. Помимо микровключений в самородном золоте, установлены две разновидности его выделений. Первая – это очень мелкие самостоятельные зерна, иногда фрагментарно покрытые с поверхности тонкой оболочкой высокопробного самородного золота. Ко второй относятся выделения мальдонита в сростках (в различных пропорциях) с очень высокопробным ветвисто-пористым самородным золотом, получившим в минералогическом обиходе название губчатого или золота с ветвисто-петельчатой, петельчатой “мозговидной” текстурой (Нестеренко, 1991) (рис. 2). В межпетельном пространстве присутствуют оксиды висмута. Характер таких сростков указывает на замещение мальдонита губчатым самородным золотом и находящимися с ним в мирмекитовых сростаниях оксидами висмута.

Если учесть и самостоятельные губчатые золотины, образовавшиеся в результате полного замещения зерен мальдонита, то можно констатировать, что на ранней стадии рудообразования выделения мальдонита среди минералов золота играли существенную роль. На рудном проявлении Фронт они составляли примерно 25% от общего количества выделений мальдонита и самородного золота, на Плацдарме – около 45%. В дальнейшем произошло замещение части мальдонита губчатым золотом с оксидами висмута.

Состав мальдонита по данным микрозондовых анализов, как в различных проявлениях и отмеченных разновидностях, так и по площади среза зерен достаточно однороден и в целом отвечает теоретическому составу стехиометрического интерметаллического соединения  $Au_2Vi$  (табл. 1). В качестве микропримесей отмечают серебро (до 0.3 мас. %) и теллур (до 0.4 мас. %). Пробность выделений самородного золота, находящихся в сростках с мальдонитом, близка к 1000‰.

**Таблица 1.** Химический состав мальдонита (мас. %)  
**Table 1.** The chemical composition of maldonite (wt %)

Рудопроявление	Форма выделений мальдонита	№ зерна	Элемент				Сумма	
			Au	Ag	Bi	Te		
Фронт	Самостоятельные зерна с фрагментарной каймой монолитного самородного золота	148-1	67.70	0.27	30.98	н. о.	98.65	
			67.31	0.05	32.28	н. о.	99.64	
		147-12	65.78	н. о.	33.14	н. о.	98.92	
			65.30	н. о.	33.57	н. о.	98.87	
	Реликты в губчатом золоте	148-21	67.63	—	31.42	н. о.	99.05	
			67.04	—	32.47	н. о.	99.51	
		147-7	65.17	н. о.	33.40	н. о.	98.57	
			147-9	65.77	н. о.	33.38	н. о.	99.15
		147-17	65.66	н. о.	33.84	н. о.	99.5	
		147-24	66.04	н. о.	33.24	н. о.	99.28	
			65.31	н. о.	33.36	н. о.	98.66	
		147-19	65.67	н. о.	32.93	н. о.	98.60	
	Плацдарм	Самостоятельные зерна	156-10	67.99	0.04	33.47	0.01	101.51
				67.36	0.04	33.56	—	100.96
67.86				0.04	32.92	0.04	100.86	
156-11			66.86	0.14	33.99	—	100.99	
			66.40	0.07	32.25	—	98.72	
			65.71	0.31	33.52	—	99.54	
154-2			65.94	0.16	33.11	0.02	99.24	
			65.94	0.09	33.22	—	99.25	
154-5			65.84	0.32	33.83	—	99.98	
154-16			66.70	0.24	32.53	—	99.47	
Самостоятельные зерна с фрагментарной каймой монолитного самородного золота			154-14	66.28	0.17	33.34	—	99.75
			154-24	65.80	0.13	33.17	—	99.11
Самостоятельное зерно с прожилком “горчичного” золота			154-6	66.00	0.18	33.44	0.02	99.64
				65.71	0.22	32.46	—	99.39
Самостоятельные зерна с фрагментарной каймой “горчичного” золота	154-8	66.08	0.14	31.64	—	99.87		
	154-15	66.19	0.13	33.33	0.03	99.68		
Сросток с монолитным самородным золотом	154-17	65.37	0.19	32.33	0.40	97.94		

Примечание. Прочерк — элемент не обнаружен, н. о. — элемент не определялся.

Во всех классах крупности преобладают изометричные и уплощенно-изометричные образования мальдонита со ступенчатой, реже гладкой поверхностью (рис. 3). Они представлены интерстициальными выделениями, среди которых преобладают комковидно-угловатые и комковидно-гнездовые (без угловатых выступов) разновидности. При больших увеличениях на сканирующем электронном микроскопе видна трещиноватость зерен мальдонита, указывающая наряду со ступенчатостью сколов на хрупкость этого минерала, считавшегося некоторыми исследователями ковким (Минералы, 1960).

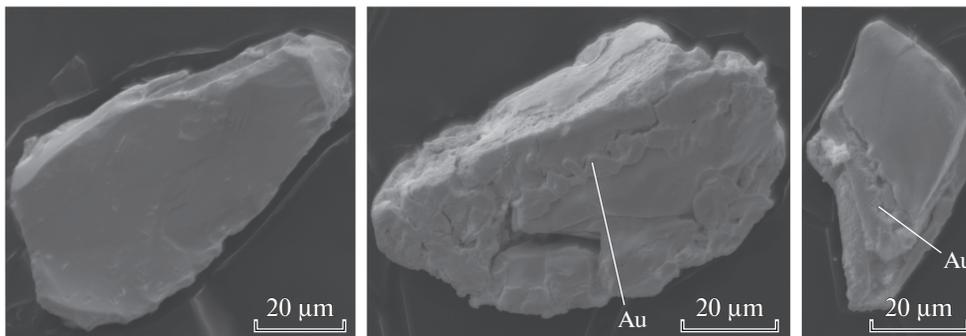


Рис. 3. Морфология выделений мальдонита. Au – губчатое (ветвисто-петельчатое) самородное золото.

Fig. 3. Maldonite morphology. Au – spongy (branched-looped) native gold.

**Ютенбогаардит** был установлен совместно с самородным золотом в протолочных пробах из кварцево-сульфидной жилы и системы кварцево-сульфидных прожилков с сульфидно-сульфоарсенидным типом оруденения на рудопроявлении Плацдарм. В монтированных аншлифах он наблюдался в виде микровключений и фрагментарных кайм серого цвета на золотилах с пробностью 708–798‰ в ассоциации с галенитом и акантитом.

Химический состав ютенбогаардита сильно варьирует. В ряде анализов концентрации элементов отвечают теоретическому составу ютенбогаардита (табл. 2). В большинстве других анализов установлены пониженные содержания золота и избыточные концентрации серебра. По представлениям Г.А. Пальяновой и Н.Е. Саввы (2009), которые наблюдали золото-серебряные сульфиды подобного состава на месторождении Юное, это могут быть выделения ютенбогаардита с субмикроскопическими включениями акантита. Анализы с избыточными концентрациями золота, вероятно, характеризуют выделения ютенбогаардита с микровключениями самородного золота. Изменчивый состав ютенбогаардита, характерный и для других рудных месторождений и проявлений, может быть связан с присутствием сростаний с ним минеральных образований состава  $Ag_{2-x}Au_xS$  (Пальянова и др., 2011).

В россыпных месторождениях узла низкопробное самородное золото, поступившее из серебро-полисульфидного минерального типа руд, играет существенную роль. При преобладании в нем микровключений галенита микровключения ютенбогаардита имеют такой же уровень распространенности, как включения пирита, арсенопирита, сфалерита, акантита, самородного висмута и висмутовых сульфосолей свинца (Литвиненко, Шилина, 2017), что указывает на достаточно широкую распространенность ютенбогаардита в золоторудных проявлениях Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла.

**Губчатое золото** установлено в висмут-сульфотеллуридном минеральном типе руд на рудопроявлениях Фронт и Плацдарм. Как уже отмечалось, оно встречается как в виде самостоятельных зерен, так и в сростках в различных пропорциях с мальдонитом.

Губчатые золотины имеют преимущественно комковидный облик (рис. 4). Текстурное строение губчатых золотин, представляющих собой агрегат петельчатых выделений самородного золота, очень разнообразно. Во-первых, они различаются размером “петелек” самородного золота и межпетельного пространства, заполненного оксидом висмута (рис. 5). По этому признаку можно говорить о макро- и микроветвисто-петельчатой текстуре таких золотин (соответственно макро- и микрогубчатое золото). Более крупные золотины, как правило, характеризуются макроветвисто-петельчатой текстурой. Во-вторых, такие золотины различаются по соотношению суммарного

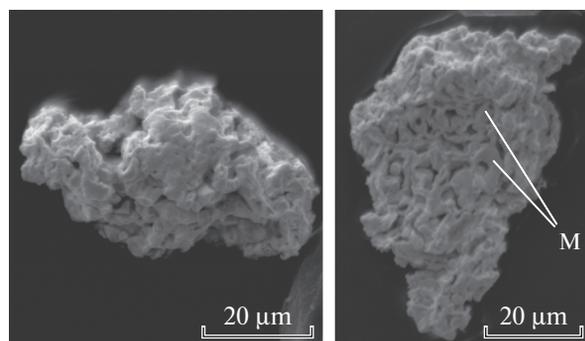
**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) золото-серебряных сульфидов на рудопроявлении Плацдарм**Table 2.** Chemical composition (wt %) of gold silver sulphides in the Platsdarm ore occurrence

Номер зерна	Элемент						Минеральные соединения
	Au	Ag	Te	Se	Fe	S	
170-30-1	14.1/6	70.8/56	—	0.6/1	0.9/1	13.5/36	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
170-30-2	3.3/11	65.1/55	—	—	—	11.7/34	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
171-19-5	16.0/7	71.9/59	—	—	—	12.1/34	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
171-19-1	18.5/9	66.8/56	2.1/1	0.5/1	—	11.8/33	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
171-19-1	18.5/8	67.7/57	1.4/1	0.9/1	—	11.5/33	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
171-19-4	19.3/9	68.7/57	—	—	—	12.0/34	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
171-19-6	19.4/9	66.9/54	—	—	—	13.7/37	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
	20.4/9	67.3/56	—	—	—	12.3/35	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
171-19-2	24.0/11	63.0/53	—	—	—	13.0/36	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
171-19-3	31.4/16	58.2/52	—	—	—	10.3/32	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub>
171-19-7	31.7/16	58.4/53	—	—	—	10.0/31	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub>
171-33-1	38.1/19	50.2/45	—	—	—	11.7/36	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + (Au,Ag)
171-33-1	34.6/17	53.6/48	—	—	—	11.8/35	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub>
	39.9/20	49.5/46	—	—	—	10.6/34	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + (Au,Ag)
171-33-2	24.5/11	62.9/53	—	—	—	12.6/36	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S
171-33-2	27.0/13	60.9/52	—	—	—	12.1/35	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub> + Ag <sub>2</sub> S

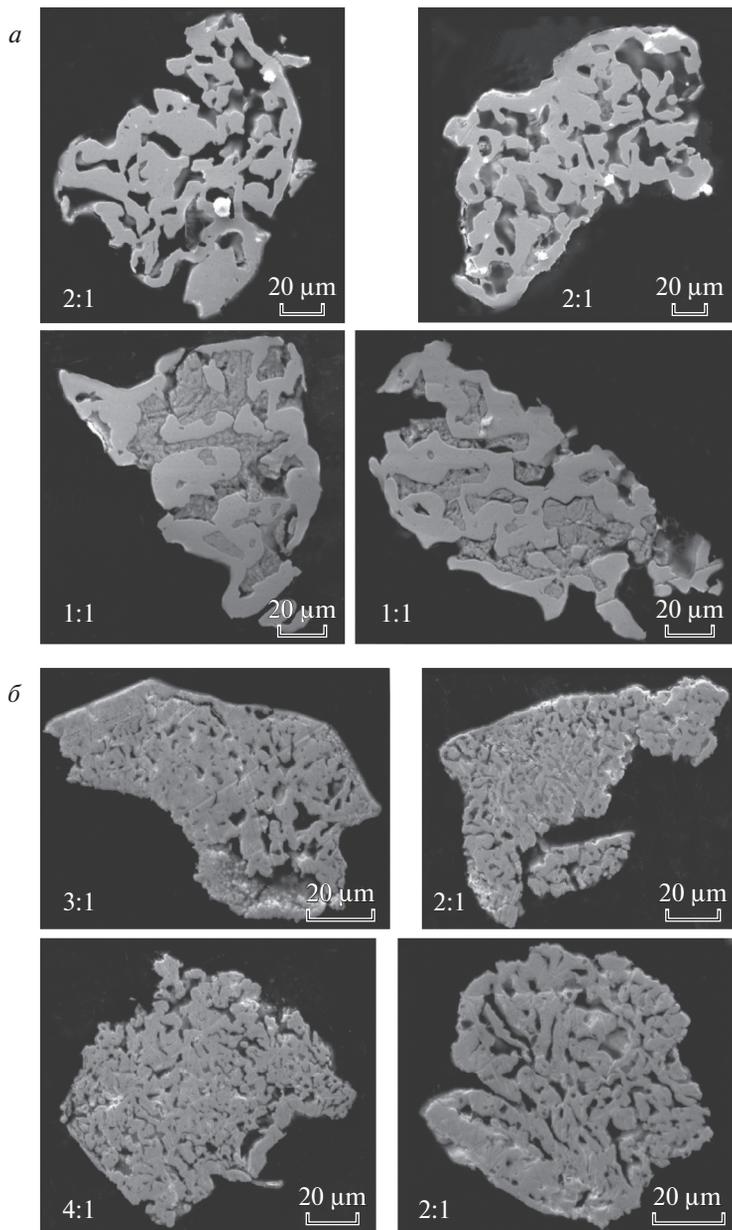
Примечание. Содержания элементов пересчитаны на сумму 100%. После наклонной черты жирным шрифтом дана концентрация элементов в ат. %. Прочерк — элемент не обнаружен.

объема (в плоскости среза таких золотин — суммарной площади) самородного золота, оксидов висмута и пустот. В исследованных зернах отношение суммарного объема самородного золота к суммарному объему пустот и оксидов висмута составляет от 1 : 1 до 4 : 1 (рис. 5).

В разных зернах взаимоотношения губчатого золота с реликтами мальдонита, в результате разложения которого оно образовалось, различаются. В одних случаях граница между губчатым золотом и мальдонитом резкая (рис. 2), в других — расплывчатая

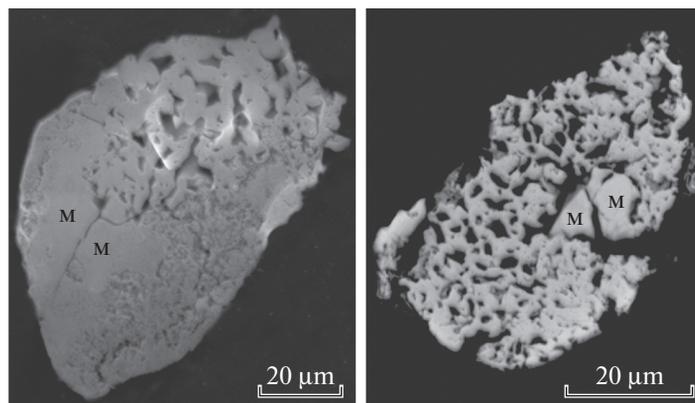


**Рис. 4.** Морфология выделений губчатого золота. М — мальдонит. Изображения во вторичных электронах.  
**Fig. 4.** The morphology of spongy gold grains. M — maldonite. SE images.



**Рис. 5.** Макро- (а) и микрогубчатое (б) самородное золото (светло-серое) с чистым (темно-серое) и заполненным оксидами висмута (серое) поровым пространством. На фотографиях указаны соотношения суммарных площадей “петелек” самородного золота и оксидов висмута и пустот.

**Fig. 5.** Macro- (a) and micro-sponge (b) native gold (light gray) with free pore spaces (dark gray) and bismuth oxides (gray). Summarized areas of native gold “reticules” vs. bismuth oxides and voids are shown.



**Рис. 6.** Характер взаимоотношений реликтов мальдонита (М) с губчатым золотом. Левое изображение во вторичных, правое – в обратно-рассеянных электронах.

**Fig. 6.** Maldonite relics (M) vs. sponge gold. Secondary-electron (left) and backscattered-electron (right) images.

(рис. 6, левое изображение). Порой наблюдается неплотность границ губчатого золота с реликтами мальдонита (рис. 6, правое изображение).

Пробность самородного золота, слагающего “петельки” в макрогубчатых зернах, близка к 1000‰ (табл. 3). В качестве микровключений отмечаются выделения мальдонита. У половины исследованных макрогубчатых выделений межпетельное пространство полностью или частично заполнено минеральным веществом зеленовато-бурого цвета. Пустые поры покрыты пленкой зеленовато-бурого и бурого цвета. В химическом составе минерального вещества в порах преобладают висмут и кислород (табл. 3). Очевидно, это оксиды висмута ряда бисмита.

В микрогубчатых выделениях в поровом пространстве минеральные образования наблюдаются реже, но так же, как и в макрогубчатом золоте, на поверхности “петелек” зачастую отмечается бурый (зеленовато-бурый) налет. Микрогубчатые зерна сложены золотом с пробностью близкой к 1000‰ (табл. 4). Присутствие в одном из анализов повышенного содержания висмута (см. табл. 4), очевидно, связано с наличием на “микрорепельках” золота налета оксидов висмута.

**Таблица 3.** Химический состав макрогубчатых золотин (мас. %)

**Table 3.** The chemical composition of macroscopic gold grains (wt %)

Элемент	Зерно 2-18						Зерно 2-15				
	“Петельки” золота		Минеральное вещество в межпетельном пространстве				“Петельки” золота		Минеральное вещество в межпетельном пространстве		
Au	98.7	99.8	0.8	—	2.6	—	100.5	98.5	—	—	0.4
Ag	0.5	0.4	—	—	—	—	0.1	0.3	—	—	—
Bi	—	—	83.7	82.7	79.4	83.6	—	—	73.2	85.1	79.4
As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.9
Th	—	—	0.3	0.3	—	—	—	—	—	—	—
O	—	—	2.8	2.4	2.5	2.9	—	—	3.8	1.8	2.9
Сумма	99.2	100.2	87.6	85.4	84.5	86.5	100.6	98.8	77.0	86.9	83.7

Примечание. Прочерк – элемент не обнаружен.

**Таблица 4.** Микроэлементный состав (мас. %) самородного золота рудных проявлений Фронт и Плацдарм  
**Table 4.** Chemical composition (wt %) of native gold in Front and Platsdarm ore occurrences

Рудопроявление	Разновидность золотин по текстурно-мустроению	№ зерна	Элемент											Сумма		
			Au	Ag	Fe	As	Zn	Pb	Cu	Bi	Te	Sb	Hg		Se	
Фронт	Монолитные	22	89.14	10.25	0.03	0.04	0.06	0.03	0.02	—	0.07	0.04	0.36	—	100.05	
		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	
		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	8.30	0.08	—	—	—	0.07	—	0.12	0.01	0.19	0.03	99.81	
		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	
		Плацдарм	Монолитные	5	69.21	29.29	0.04	—	—	0.05	0.08	—	—	0.31	—	99.18
				13	65.56	34.14	—	—	0.03	0	—	0.05	0.05	—	0.03	99.87
				16	93.48	5.63	0.01	—	—	—	0.04	0.09	0.06	0.04	—	99.35
				15	82.51	16.42	—	0.06	0.03	—	0.03	—	0.06	—	—	99.12
2	60.79			37.09	0.06	0.03	0.03	—	0.03	0.1	—	—	0.14	0.01	98.28	
1	68.87			29.46	0.06	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.11	—	0.35	0.02	98.00	
	Микропористые (“горчичное” золото)	14	74.86	3.96	0.07	—	—	0.02	0.18	0.03	0.03	2.07	0.07	81.29		
		12	86.24	1.87	0.01	—	0.05	—	—	—	—	—	—	88.17		
		15	85.36	4.00	—	—	—	—	—	0.02	0.08	—	—	89.49		

Примечание. Прочерк — элемент не обнаружен.

**“Горчичное” золото.** В рудных проявлениях Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла выделены две разновидности “горчичного” золота: макропористое и микропористое.

К макропористому “горчичному” золоту отнесены выделения золота, пористое строение которых отчетливо наблюдается в сканирующем электронном микроскопе при увеличениях 500–1000. Макропористое “горчичное” золото в виде кайм на единичных зернах мальдонита и тонких прожилков в них установлено в висмут-сульфотеллуридном типе руд на рудопроявлении Плацдарм. В монтированных аншлифах “горчичное” золото характеризуется желто- и красно-бурым цветом. Оно имеет бессистемный разноразмерный сотовый каркас из практически чистого самородного золота (табл. 5). Повышенные содержания в анализах висмута указывают на возможность присутствия в порах его оксидов.

Микропористое “горчичное” золото в небольшом количестве выявлено в выветрелых рудах сульфидно-сульфоарсенидного минерального типа на рудопроявлении Плацдарм и в реликтах зоны окисления руд с полиметаллической минерализацией (предположительно серебро-полисульфидный минеральный тип оруденения) на рудопроявлении Берентал, где оно имеет широкое распространение.

При оптических исследованиях в монтированных аншлифах микропористое “горчичное” золото имеет вид монолитных выделений темно-бурого цвета. Под электронным микроскопом при увеличениях около 10 тыс. раз установлено, что они сложены сросшимися между собой в точках соприкосновения микрочастицами (глобулами) самородного золота, размер которых составляет десятые доли микрометра и менее (рис. 7). Микропористое “горчичное” золото выявлено в виде самостоятельных выделений и в сростках с монолитным низкопробным самородным золотом.

Самостоятельные выделения микропористого “горчичного” золота представлены массивными комковидными зернами менее 0.1 мм с остроугольно-угловатыми очертаниями и мелкоямчатой поверхностью. С поверхности они имеют желтый, а на срезе в монтированном аншлифе – темно-бурый цвет. Желтый цвет их поверхности обусловлен наличием на ней тонкой пленки монолитного самородного золота с пробностью около 1000‰.

По текстурному строению выделяются три разновидности микропористого “горчичного” золота.

Наиболее распространена первая разновидность, которая представлена “массивными” однородными выделениями “горчичного” золота, сложенными глобулами с пробностью около 1000‰, и относительно чистым поровым пространством. Иногда они имеют зернистое строение, с прожилками монолитного самородного золота по границам зерен (рис. 8).

Вторая разновидность характеризуется наличием трещин “усыхания”. Одна группа трещин протягивается от поверхности вглубь зерен, разбивая их на блоки. Другая группа трещин располагается субпараллельно поверхности (рис. 7, зерно 175-19). На их границах развиваются тонкие прожилки монолитного самородного золота. В химическом составе таких зерен установлено только золото (табл. 5, зерно 175-19).

Третья разновидность микропористого “горчичного” золота имеет неоднородное строение. В таких зернах, наряду с участками и зонами, в которых по данным микронзондовых анализов отмечается только золото, присутствуют участки и зоны, в которых, помимо золота, устанавливаются невысокие содержания серебра и хлора, а пористая текстура затушевана (табл. 5 и рис. 7, зерна 175-23 и 175-32). Поскольку в одном из зерен “горчичного” золота отмечалось его срастание с кераргиритом (табл. 5, зерно 175-26), то можно предположить, что в отмеченных выше участках и зонах поровое пространство в “горчичном” золоте заполнено именно кераргиритом, который образуется совместно с “горчичным” золотом при распаде ютенбогаардита (Справочник-определитель..., 1988). В золотилах с концентрически-зональным строением на гра-

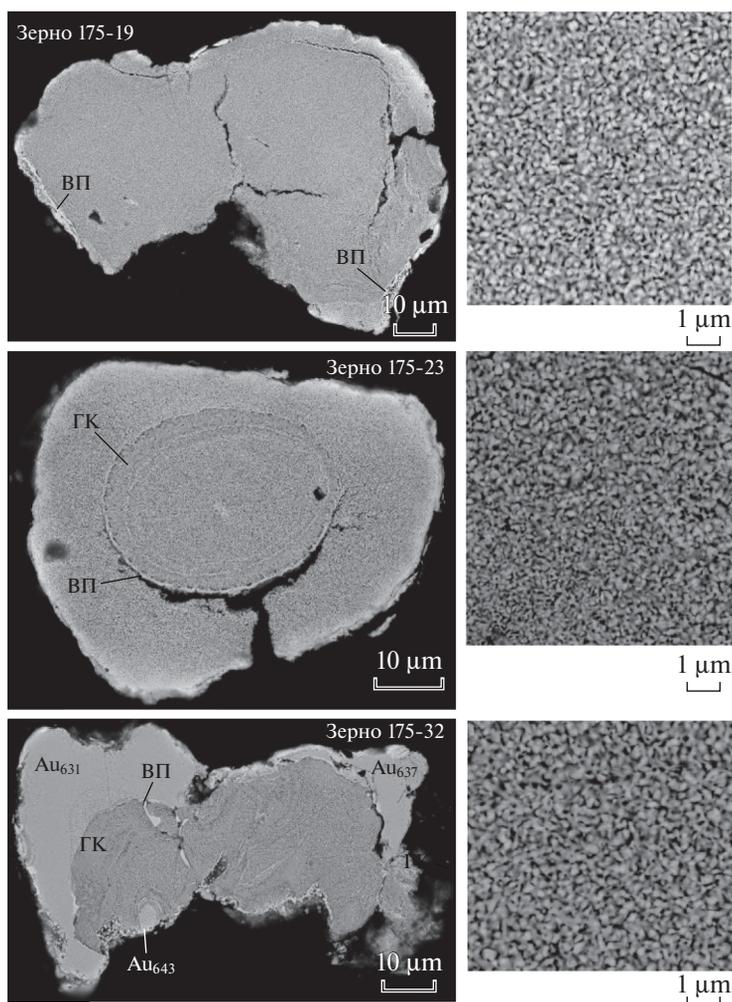
**Таблица 5.** Химический состав “горчичного” золота (мас. %)**Table 5.** The chemical composition of “mustard” gold (wt %)

Рудное проявление	№ зерна	Форма выделения	Элемент							Сумма
			Au	Ag	Bi	Te	S	Cl	O	
Плацдарм	154-6	Прожилок в мальдоните	86.94	0.01	0.92	0.01	0.03	—	—	87.92
			76.38	0.09	0.77	—	0.04	—	—	77.28
Берен-тал	154-8	Кайма на мальдоните	92.22	0.03	1.82	0.04	0.07	—	—	94.82
	175-6	Самостоятельное зерно (неоднородное)	82.43	9.20	—	—	—	2.05	—	93.68
			85.68	7.07	—	—	—	1.99	—	94.74
			94.90	3.12	—	—	—	—	—	98.02
			97.75	—	—	—	—	—	—	97.75
			96.03	—	—	—	—	—	—	96.03
	175-11	Самостоятельное зерно	98.70	—	—	—	—	—	—	98.70
	175-12	Самостоятельное зерно	96.68	—	—	—	—	—	—	96.68
			Оболочка самородного Au	102.70	—	—	—	—	—	—
	175-13	Самостоятельное зерно	99.91	—	—	—	—	—	—	99.91
			100.26	—	—	—	—	—	—	100.26
			Прожилки самородного золота	99.75	—	—	—	—	—	—
	175-15	Самостоятельное зерно	101.97	—	—	—	—	—	—	101.97
			99.02	—	—	—	—	—	—	99.02
	175-18	Самостоятельное зерно	100.43	—	—	—	—	—	—	100.43
			99.95	—	—	—	—	—	—	99.95
	175-19	Самостоятельное зерно	98.51	—	—	—	—	—	—	98.51
			98.78	—	—	—	—	—	—	98.78
	175-23	Самостоятельное зерно	101.45	—	—	—	—	—	—	101.45
			100.56	—	—	—	—	—	—	100.56
Оболочка самородного Au			100.21	1.86	—	—	—	—	—	102.07
Внешняя зона			98.79	—	—	—	—	—	—	98.78
97.12			—	—	—	—	—	—	—	97.12
175-26	Самостоятельное зерно	Средняя зона	88.77	6.81	—	—	—	1.83	—	97.41
		77.75	13.78	—	—	—	3.57	—	95.10	
		Центральная зона	98.91	—	—	—	—	—	—	98.91
175-32	Сросток с самородным золотом	98.99	—	—	—	—	—	—	98.99	
		102.11	—	—	—	—	—	—	102.11	
175-32	Сросток с самородным золотом	Кераргирит (сросток)	2.91	61.29	—	—	—	18.10	3.86	86.16
		92.51	5.83	—	—	—	—	—	—	100.18
			92.51	5.83	—	—	—	—	—	98.34

Примечание. Прочерк – элемент не обнаружен.

нищах зон отмечаются тонкие прожилки монолитного самородного золота (рис. 7, зерно 175-23).

В микропористом “горчичном” золоте из сульфидно-сульфоарсенидного типа руд на рудопроявлении Плацдарм помимо серебра (до 4.0 мас. %) в отдельных случаях отмечается повышенное содержание ртути (табл. 4).

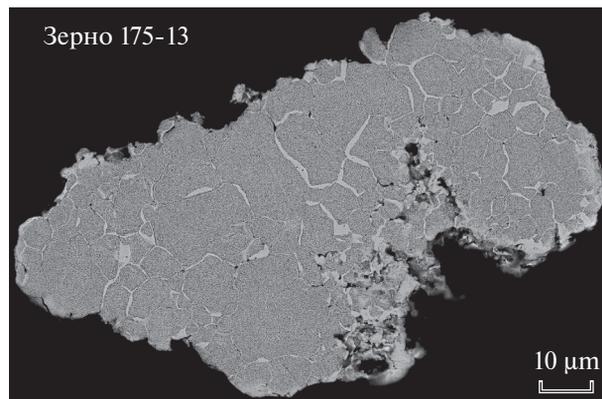


**Рис. 7.** Выделения микропористого “горчичного” золота с трещинами “усыхания” (зерно 175-19) и неоднородным строением (зерна 175-23, 175-32). Справа показано глобулярное строение выделений. Изображения в обратно-отраженных электронах. Au – монолитное выделение самородного золота (нижний индекс – проба), ГК – “горчичное” золото с кераргиритом, ВП – высокопробные прожилки монолитного самородного золота.

**Fig. 7.** Micropore “mustard” gold with desiccation cracks (grain 175-19) and zoning patterns (grains 175-23, 175-32). Globule textures of gold are shown on the right. BSE images. Au – solid native gold, fineness is indicated; ГК – “mustard” gold with cerargyrite; ВП – high-finesness rim and stringers of solid native gold.

## ВОПРОСЫ ГЕНЕЗИСА ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

По вопросу о генезисе мальдонита нет единого мнения. Некоторые исследователи (Громова и др., 1978; Сахарова и др., 1983) полагают, что он образуется в раннюю, высокотемпературную стадию гидротермального процесса “при воздействии золотоносных растворов на ранее отложенный самородный висмут, возможно, также и на теллуриды, обогащенные висмутом, типа хедлейита” (Сахарова и др., 1983. с. 960). Другая



**Рис. 8.** Выделение микропористого “горчичного” золота (серое) с прожилками монолитного золота (светло-серое). Изображение в обратно-отраженных электронах.

**Fig. 8.** Micropore “mustard” gold (gray) with stringers of solid gold (light gray). BSE images.

группа исследователей (Гамянин и др., 1986; Некрасов, 1991) считает, что мальдонит кристаллизуется одновременно с сульфотеллуридами висмута и самородным золотом непосредственно из гидротермальных поликомпонентных малосернистых теллуридных растворов.

В исследованных зернах мальдонита реликтов самородного висмута или висмутовых минералов не выявлено. Это, а также наличие выделений мальдонита непосредственно в силикатной матрице и теллурическая специализация самородного золота (табл. 4) позволяют предполагать, что мальдонит отлагался непосредственно из гидротермальных растворов. Постоянное присутствие в мальдоните серебра, низкие концентрации (на пределе чувствительности анализа) в самородном золоте висмута могут указывать на несколько более раннее отложение мальдонита, чем самородного золота.

О происхождении ютенбогаардтита также нет единого мнения. Согласно разным авторам он образуется: 1) при окислении в корах выветривания Au(Ag)-содержащих пирита и арсенопирита (Barton et al., 1978; Castor, Sjöberg, 1993; Greffié et al., 2002; Савва, Пальянова, 2007, и др.); 2) в результате низкотемпературных гидротермальных процессов (Некрасов, 1991; Warmada et al., 2003; Пальянова, Савва, 2009; Пальянова и др., 2011, и др.); 3) при метаморфизме руд (Barton, 1980; Савва, 1995, и др.). Присутствие в рудных проявлениях Нижне-Мякитского узла микровключений ютенбогаардтита в золотилах явно гипогенного происхождения дает основание предполагать его гидротермальный генезис.

Полученные в ходе проведенных исследований материалы позволяют высказать ряд соображений по поводу процесса образования губчатого золота в результате разложения мальдонита. Губчатая ветвисто-петельчатая текстура выделений самородного золота обычно характерна для его гипергенных образований в окисленных рудах (Мурзин, Малюгин, 1987; Нестеренко, 1991, и др.). В то же время ряд исследователей считает, что замещение мальдонита самородным золотом и оксидами висмута может происходить в результате его разложения в гипогенных условиях (Гамянин и др., 1986; Некрасов, 1991).

Поскольку в штучные пробы, из которых был извлечен мальдонит, попал рудный материал с очень слабыми следами химического выветривания, можно предположить, что процесс образования губчатого золота протекал в гипогенных условиях. Анализы ассоциирующего с мальдонитом макропористого “горчичного” золота, сформировав-

**Таблица 6.** Схема образования минералов золота в золоторудной системе, связанной с Берентальским интрузивом**Table 6.** Scheme of the formation of gold minerals in the Berental intrusion-related gold system

Минеральный тип оруденения	Гипогенный этап	Гипергенный этап
Серебро-полисульфидный (зона Ag–Pb–Zn минерализации)	Монолитное самородное золото пробностью 350–700‰, ютенбогаардтит	Микропористое “горчичное” золота
Сульфидно-сульфоарсенидный (зона As–Au минерализации)	Монолитное самородное золото пробностью 700–850‰, ютенбогаардтит	Микропористое “горчичное” золота
Висмут-сульфотеллуридный (зона Au–Bi–Te±W минерализации)	Мальдонит, монолитное самородное золото пробностью 850–1000‰, губчатое золото	Макропористое “горчичное” золота

шегося по нашим представлениям в результате гипергенного разложения губчатого золота, содержат не только висмут, но и серу (табл. 5), которая не отмечалась в мальдоните (табл. 1). Механизм трансформации мальдонита в губчатое золото, очевидно, включал в себя описанный в работе К.Л. Чобану с соавторами (Ciobanu et al., 2010) распад мальдонита на золото и висмутин по реакции



и последующее окисление висмута до оксидов висмута<sup>1</sup>. На рудном проявлении Фронт разложение затронуло 90% выделений мальдонита, при этом 53% выделений разложилось полностью. Зерна мальдонита в кварце оказались полностью разложившимися. Среди мальдонита, выделенного из сульфидов, такой стадии разложения достигло 26% зерен. На рудном проявлении Плацдарм разложению подверглось около 30% зерен мальдонита, половина их разложилась полностью.

По результатам исследований Г.Н. Гамянина с соавторами (1986) и И.Я. Некрасова (1991) сохранность мальдонита в гипогенных условиях определяется скоростью охлаждения рудной системы. При резком охлаждении мальдонит хорошо сохраняется, а при постепенном падении температуры легко разлагается на самородное золото и минералы висмута. Поскольку рудное проявление Фронт располагается непосредственно в Берентальском гранитном штоке, т.е. испытывало более медленное охлаждение, чем руды рудопроявления Плацдарм, находящегося на удалении от выходов штока, то процесс разложения мальдонита на рудном проявлении Фронт имел большие масштабы и интенсивность. Скоростью охлаждения, очевидно, объясняется и тот факт, что подвергшиеся разложению зерна мальдонита, как правило, более крупные (они менее резко охлаждались), чем сохранившиеся в виде самостоятельных выделений. С более крупным размером зерен связана и полная разложенность зерен мальдонита в кварце.

Образование макропористого и микропористого “горчичного” золота, очевидно, имело свои особенности (табл. 6).

Макропористое “горчичное” золото в виде прожилков и кайм отмечалось на выделениях мальдонита, извлеченных из штучной пробы, отобранной из висмут-сульфотеллуридного типа руд на рудопроявлении Плацдарм. Присутствие на рудопроявлении Плацдарм реликтов коры химического выветривания эпохи планации рельефа и гипергенный генезис выявленных в россыпных месторождениях узла аналогичных выделений “горчичного” золота (Литвиненко, Шилина, 2017) позволяют предполагать гипергенное происхождение макропористого “горчичного” золота. Вероятно, его образование происходило на участках, где мальдонит в гипогенных условиях подвергся распаду с образованием субграфических сростаний самородного золота с минералами висмута. В процессе формирования коры выветривания происходило выщелачи-

<sup>1</sup> Отсутствие в губчатом золоте минеральных образований висмута может быть связано с их удалением в процессе растворения штучных проб в кислотах.

вание из образовавшихся агрегатов минералов висмута с постепенным перераспределением возникающих пустот и частичной перекристаллизацией самородного золота.

Микропористое “горчичное” золото выявлено в подвергшихся активному химическому выветриванию рудах с сульфидно-сульфоарсенидной и полиметаллической минерализацией. Его гипергенное происхождение, связанное с формированием коры химического выветривания, не вызывает сомнения. В сростках с “горчичным” золотом установлены кераргирит и низкопробное самородное золото. Это позволяет предполагать, что исследованное микропористое “горчичное” золото образовалось преимущественно в результате разложения ютенбогаардтита, который, как уже отмечалось, в процессе выветривания замещается “горчичным” золотом и кераргиритом (Справочник-определитель..., 1988). Особенности строения высокосеребристого золота (Сахарова и др., 1982) свидетельствуют о том, что распаду с образованием “горчичного” золота могло подвергаться и весьма низкопробное самородное золото.

Выявленное в ходе проведенных исследований глобулярное строение микропористого “горчичного” золота говорит о том, что его образование не связано с простым перераспределением вакансий, возникших в результате выщелачивания атомов Ag и S из кристаллической решетки исходного минерала. Оно указывает на отложение микропористого “горчичного” золота в результате осаждения атомов Au из водного раствора, включавшее нуклеацию и рост кристаллов. Очевидно, этот процесс протекал аналогично образованию “горчичного” золота при разложении калаверита, освещенному в работе Дж. Чжао с соавторами (Zhao et al., 2009). В случае присутствия в растворах хлора, в поровом пространстве формирующегося “горчичного” золота происходило отложение кераргирита. Наличие среди микропористого “горчичного” золота выделений с трещинами “усыхания” и полигональными структурами позволяет предполагать отложение части “горчичного” золота из коллоидных растворов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили получить новые данные о распространенности мальдонита и ютенбогаардтита в рудных проявлениях на Северо-Востоке России, расширить известное ранее видовое разнообразие в них выделений золота, получить представления о генетических особенностях его губчатых и “горчичных” образований.

Показано, что на Северо-Востоке в связанных с восстановленными гранитоидными интрузивами золоторудных системах (RIRGD-системах) мальдонит является не экзотическим, а достаточно распространенным минералом. В Нижне-Мякитском рудно-россыпном узле на ранних стадиях формирования висмут-сульфотеллуридного типа оруденения в центральных частях RIRGD-системы, связанной с Берентальским интрузивом, мальдонит кристаллизовался совместно с самородным золотом и висмутовыми минералами. В последующем, в результате гипогенного разложения, значительная его часть была замещена практически беспримесным губчатым (ветвистой-пелльчатой текстуры) самородным золотом, ассоциирующим с оксидами висмута. Размерность выделений мальдонита и положение оруденения относительно магматического очага определяли масштабы и глубину проявления данного процесса. Наибольшему разложению подверглись относительно крупные выделения мальдонита в рудном проявлении Фронт, расположенном непосредственно в гранитном штоке. Предположительно в дальнейшем в результате гипергенных преобразований мальдонита и продуктов его гипогенного разложения в коре выветривания эпохи планации рельефа сформировалась макропористая разновидность “горчичного” золота.

Сульфидно-сульфоарсенидный и серебро-полисульфидный минеральные типы оруденения в средней и периферийной частях Берентальской RIRGD-системы характеризуются достаточно широким развитием в них ютенбогаардтита. Его разложение в

ходе формирования коры выветривания эпохи планации рельефа сопровождалось переводом золота в раствор с последующим образованием микропористого “горчичного” золота, представляющего собой срастания глобул практически чистого самородного золота размером десятые и сотые доли микрометра, в поровом пространстве которых присутствует керагарит.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гамянин Г.Н., Некрасов И.Я., Самусиков В.П. Мальдонит из золоторудных проявлений Восточной Якутии // Минерал. журн. **1986**. Т. 8. № 3. С. 65–71.
- 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: Хабар. политехн. ин-т, **1990**. С. 41–53.
- Громова Е.И., Завьялова Л.Л., Готов А.М. Находки редко встречающихся минералов золота в рудах месторождения Зармитан (Чармитан) Западного Узбекистана // Зап. Узб. отд. ВМО. **1978**. Вып. 31. С. 38–40.
- 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.
- Литвиненко И.С., Шилина Л.А. Гипергенные новообразования золота из россыпных месторождений Нижне-Мякитского рудно-россыпного поля (Северо-Восток России) // Руды и металлы. **2017**. № 1. С. 75–90.
- Минералы. Справочник / под ред. Ф.В. Чухрова. М.: Изд-во АН СССР, **1960**. Т. 1. 616 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.
- Пальянова Г.А., Кох К.А., Сереткин Ю. В. Образование сульфидов золота и серебра в системе Au–Ag–S // Геолог. и геофиз. **2011**. Т. 52. № 4. С. 568–576.
- Пальянова Г.А., Савва Н.Е. Особенности генезиса сульфидов золота и серебра месторождения Юное (Магаданская область, Россия) // Геолог. и геофиз. **2009**. Т. 50. № 7. С. 759–777.
- Савва Н.Е. Принцип эволюционной систематики минералов серебра. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, **1995**. 49 с.
- Савва Н.Е., Пальянова Г.А. Генезис сульфидов золота и серебра на месторождении Улахан (Северо-Восток России) // Геолог. и геофиз. **2007**. Т. 48. № 10. С. 1028–1042.
- Сахарова М.С., Горшков А.И., Ряховская С.К., Трубкин Н.В. Новые данные об изоморфной смесимости золота и серебра в самородном золоте и его синтетических аналогах // ДАН СССР. **1982**. Т. 264. № 2. С. 457–460.
- Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н., Спиридонов Э.М. и др. Первая находка мальдонита в Сибири // ДАН СССР. **1983**. Т. 270. № 4. С. 960–962.
- Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете / Т.Н. Чвилева, М.С. Безсмертная, Э.М. Спиридонов и др. М.: Недра, **1988**. 504 с.

### Maldonite, Uytnebogaardtit and Varieties of Native Gold in Lodes of the Nizhne-Myakitsky Mineral District, North-East Russia

I. S. Litvinenko<sup>a,\*</sup> and L. A. Shilina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>N. A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, FEB RAS, Magadan, Russia

\*e-mail: litvinenko@neisri.ru

This paper contains diagnostic descriptions of ore minerals as maldonite, uytnebogaardtit, and sponge and “mustard” native gold from ore occurrences of the RIRGD class in the south-east of the Yana-Kolyma gold belt. Maldonite is identified from Front and Platsdarm lodes characterized by bismuth-sulfotelluride mineral type, and uytnebogaardtit from sulfide-sulfoarsenide ores of Platsdarm. Maldonite is present both as microinclusions in native gold and very small individual grains. It is also found as fragmentary rims around high-fineness native gold and grains intergrown with very high-fineness sponge gold containing bismuth

oxides. Early mineralization stages were characterized by a joint crystallization of maldonite, native gold, and bismuth minerals. Maldonite usually deposited in interstitial pores and cracks in recrystallized quartz and sulfide-sulfoarsenide grains. Due to the hypogene transformation, maldonite was in part substituted by sponge gold of very-high fineness in association with bismuth oxides. The decomposition of maldonite included its substitution into native gold and bismuthine and the subsequent oxidation of bismuthine to bismuth oxides. Besides maldonite, uytenbogaardite associated with galena and acanthite is observed as microinclusions and rims around fine gold grains with low fineness. In most cases, “mustard” native gold is present in chemical weathering products associated with base metal mineralization at the Berental lode. Globular particles of “mustard” gold are particles of almost pure native gold of tenths and hundredths of a micrometer. Pore-hosted cerargyrite may be sometimes present. Presumably, “mustard” gold has been due to hypogene alterations of uytenbogaardite.

**Keywords:** gold mineralization, maldonite, uytenbogaardite, sponge and “mustard” gold

## REFERENCES

- Barton M.D., Kieft C., Burke E.A.J., Oen I. S. Uytenbogaardite, a new silver-gold sulfide. *Canad. Miner.* **1978**. Vol. 16. P. 651–657.
- Barton P.B. The Ag–Au–S system. *Econ. Geol.* **1980**. Vol. 75. P. 303–316.
- Castor S.B., Sjöberg J.J. Uytenbogaardite, Ag<sub>3</sub>AuS<sub>2</sub>, in the Bullford mining district, Nevada. *Canad. Miner.* **1993**. Vol. 31. P. 89–98.
- Ciobanu C.L., Birch W. D., Cook N.J., Pring A., Grundler P.V. Petrogenetic significance of Au–Bi–Te–S associations: the example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia. *Lithos.* **2010**. Vol. 116. P. 1–17.
- Gamyani G.N., Nekrasov I.Y., Samusikov V.P. Maldonite in gold lodes of East Yakutia. *Mineral. J.* **1986**. Vol. 8. N 3. P. 65–71 (in Russian).
- Goryachev N.A., Goncharov V.I. Late Mesozoic granitoid magmatism and related gold and tin mineralization of North-East Asia. *Resource Geology. Special Issue.* Tokyo. **1995**. N 18. P. 111–122.
- Goryachev N.A., Kolesnichenko P.P. Granites and greisens of the Myakit intrusion as an example of a local ore-magmatic system. In: Ore-Magmatic Systems of the North-East USSR. Eds. N.A. Shilo, V.I. Goncharov. Khabarovsk: Khabarovsk Polytechn. Institute, **1990**. P. 41–53 (in Russian).
- Greffié C., Bailly L., Milési J.-P. Supergene alteration of primary ore assemblages from low-sulfidation Au–Ag epithermal deposits at Pongkor, Indonesia, and Nazareño, Perú. *Econ. Geol.* **2002**. Vol. 97. N 3. P. 561–571.
- Gromova E.I., Zayjalova L.L., Glotov A.M. Rare gold minerals reported from Zarmitan (Charmitan) deposit in West Uzbekistan. *Proc. Uzbekistan Branch of the USSR Miner. Soc.* **1978**. N 31. P. 38–40 (in Russian).
- Handbook of ore minerals in reflected light. Eds: T.N. Chvilyova, M.Z. Bezsmertnaya, E.M. Spiridonov et al. Moscow: Nedra, **1988**. 504 p. (in Russian).
- Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems. In: Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. *Geol. Ass. Canada. Miner. Deposits Division. Spec. Publ.* **2007**. N 5. P. 95–112.
- Kuznetsov V.M., Goryachev N.A., Zhigalov S.V., Savva N.E. The structure and ore minerals of Myakit–Khurchansky mineral district. *Bulletin of the North-East Scientific Center FEB RAS.* **2011**. N 4. P. 37–51 (in Russian).
- Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. *Miner. Deposita.* **2001**. Vol. 36. P. 477–489.
- Litvinenko I.S., Shilina L.A. Hypogenous gold from placer deposits of Nizhne-Myakitsky mineral district, North-East Russia. *Ores and Metals.* **2017**. N 1. P. 75–90.
- Minerals. Reference Book. Ed. F.V. Chukhrov. Moscow: USSR Acad. Sci., **1960**. Vol. 1. 645 p. (in Russian).
- Murzin V.V., Malyughin A.A. Typomorphism of gold in hypergenesis zone, the Urals. Sverdlovsk: Ural SC USSR Acad. Sci., **1987**. 96 p. (in Russian).
- Nekrasov I.Y. Geochemistry, mineralogy and genesis of gold lodes. Moscow: Nauka, **1991**. 302 p. (in Russian).
- Nesterenko G.V. Inferred gold ores in placers, South Siberia. Novosibirsk: Nauka, **1991**. 191 p. (in Russian).
- Pal'yanova G.A., Kokh K.A., Seryotkin Yu.V. Formation of gold and silver sulfides in the System Au–Ag–S. *Russian Geol. Geophys.* **2011**. Vol. 52. N 4. P. 443–449.

*Pal'yanova G.A., Savva N.E.* Specific genesis of gold and silver sulfides at the Yunoe Deposit (Magadan Region, Russia). *Russian Geol. Geophys.* **2009**. Vol. 50. N 7. P. 587–602.

*Savva N.E.* The principle of evolutionary systematics of silver minerals. Magadan: North-East Scientific Center FEB RAS, **1995**. 49 p. (in Russian).

*Savva N.E., Pal'yanova G.A.* Genesis of gold and silver sulfides at Ulakhan deposit (northeastern Russia). *Russian Geol. Geophys.* **2007**. Vol. 48. N 10. P. 799–810.

*Sakharova M.S., Gorshkov A.I., Ryakhovskaya S.K., Trubkin N.V.* New data about gold and silver isomorphic miscibility in native and synthesized gold. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1982**. Vol. 264. N 2. P. 457–460 (in Russian).

*Sakharova M.S., Krivitskaya N.N., Spiridonov E.M. et al.* The first maldonite finding in Siberia. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1983**. Vol. 270. N 4. P. 960–962 (in Russian).

*Thompson J.F.H., Newberry R.J.* Gold deposits related to reduced granitic intrusions. *Soc. Econ. Geol. Rev. Econ. Geol.* **2000**. Vol. 13. P. 377–400.

*Warmada I.W., Lehmann B., Simandjuntak M.* Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor-epithermal gold-silver deposit, West Java, Indonesia. *Canad. Miner.* **2003**. Vol. 41. N 1. P. 185–200.

*Zhao J., Brugger J., Grundler P.V., Xia F., Chen G., Pring A.* Mechanism and kinetics of a mineral transformation under hydrothermal conditions: Calaverite to metallic gold. *Amer. Miner.* **2009**. Vol. 94. P. 1541–1555.