

## Дендритовидное золото Au-Ag-эпитермального месторождения Аметистовое (Камчатка)

О.Ю. Плотинская<sup>1</sup>, В.В. Шиловских<sup>2</sup>, Е.О. Грознова<sup>3</sup>, Л.Ю. Крючкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИГЕМ РАН, Москва, Россия.

<sup>2</sup>СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт экспериментальной минералогии РАН, Черногоровка, Россия

Дендритовидное самородное золото и ассоциирующие с ним сфалерит и кварц из руд Au-Ag-эпитермального месторождения Аметистовое (Камчатка) исследованы при помощи комплекса методов: рентгеноспектрального микроанализа, термобарогеохимии, дифракции обратно-рассеянных электронов и рентгеновской томографии. Предложена модель их формирования и последующей перекристаллизации.

**Ключевые слова:** самородное золото, дендриты, сфалерит, эпитермальное, Камчатка

## Electrum Dendrites from the Ametistovoe Epithermal Au-Ag Deposit (Kamchatka)

Olga Y. Plotinskaya<sup>1</sup>, Vladimir V. Shilovskikh<sup>2</sup>, Elena O. Groznova<sup>3</sup>, Ludmila Y. Kruchkova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IGEM RAS, Moscow, Russia

plotin@igem.ru

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Institute of experimental mineralogy RAS, Chernogolovka, Russia

Dendrite-like electrum in association with quartz and sphalerite from ores of the Ametistovoe epithermal Au-Ag deposit (Kamchatka) were investigated by microprobe, fluid inclusion study, electron backscattered diffraction, and X-ray tomography. A model of their formation and farther recrystallization was proposed.

**Keywords:** electrum, dendrites, sphalerite, epithermal, Kamchatka

### Введение

Месторождения эпитермального семейства нередко характеризуются ураганными содержаниями полезного компонента, прежде всего, золота и серебра. В таких участках нередки колломорфные и крустификационные текстуры руд, обусловленные последовательным отложением халцедоновидного кварца, а также дендритовидные выделения рудных минералов. Особенно часто это наблюдается на объектах низкосульфидизированного типа с низким содержанием сульфидов в рудах (*Sillitoe, Hedenquist, 2003* и цитируемая литература). В данной работе охарактеризовано дендритовидное самородное золото из руд месторождения Аметистовое.

### Геологическое строение месторождения

Эпитермальное Au-Ag месторождение Аметистовое расположено на севере полуострова Камчатка и принадлежит к Тклаваямскому рудному полю Ичигин-Уннейваямского вулканогенного района, который входит в состав Корякско-Центрально-Камчатского вулканического пояса. Оруденение приурочено к палеогеновым породам ичигинского комплекса (лавы, реже туфы дацитов, андезито-дацитов и субвулканические тела диоритовых порфириров, андезитов, дацитовых порфириров). По классификации (*Sillitoe, Hedenquist, 2003*) месторождение может быть отнесено к промежуточно-сульфидизированному типу (intermediate sulfidation). Запасы месторождения (C1 + C2) на 1995 г. составили 52.5 т Au со средним содержанием 13.62 г/т (*Nedradv.ru*). Выделено 4 стадии минералообразования (*Грановский, 1993*): I – пирит-кварцевая, II – сульфидно-

кварцевая, III – золото-каолинит-хлорит-сульфидно-кварцевая, IV – карбонат-кварцевая. Текстуры руд полосчатые вкрапленные, прожилковые, массивные. В данной работе была изучена минерализация золото-каолинит-хлорит-сульфидно-кварцевой стадии.

### Методы исследования

Состав рудных минералов изучался на электронном микроскопе Jeol JSM-5300 с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром «Link-ISIS», аналитик Н.В. Трубкин, ИГЕМ РАН. Микротермометрия флюидных включений выполнена на термокриокамере Linkam-THMSG-600, ИГЕМ РАН. Томографические исследования проводились на микротомографе Bruker SkyScan-1172, Бельгия, в ресурсном центре СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования»; ускоряющее напряжение 100 кВ; сила тока 100 мА, фильтр Al + Cu, разрешение 2 мкм; угол поворота образца 0.2°; экспозиция 3.8–5 сек, при повороте на 180° и на 360°. Данные о распределении элементов и ориентировки кристаллов были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N, оснащенного энерго-дисперсионным спектрометром Oxford X-Max 20 и детектором дифракции обратнорассеянных электронов Oxford NordLys Nano в ресурсном центре СПбГУ «Геомодель»; ускоряющее напряжение 30 кВ, ток 2–5 нА, биннинг 4×4 пикселя, усреднение 2-3 кадра и суммарная выдержка 30-60 мкс на пиксель.

### Результаты

В изученных образцах минерализация золото-каолинит-хлорит-сульфидно-кварцевой стадии представлена крупными агрегатами сфалерита с пиритом, галенитом, халькопиритом и самородным золотом, окруженными кварц-хлоритовым агрегатом. Содержание Fe в сфалерите от 3 до 8 мас.%, обычно не более 5 мас.%. И сфалерит, и кварц, реже халькопирит густо насыщены включениями самородного золота размером от 10 до 40-50 мкм. В кварце золото образует ксеноморфные выделения, неправильной формы, часто с извилистыми или угловатыми границами. В сфалерите в отраженном свете золото имеет правильную округлую или вытянутую овальную форму (рис. 1А) и в проходящем свете видно, что это дендритовидные образования размером от 0.1 до 1-2 мм (рис. 1Б). Пробность золота не зависит от минерала-матрицы и составляет 621–649. Золотые дендриты распределены в сфалерите довольно равномерно и имеют относительно простое строение: осевой кристалл длиной не более 1 мм и отходящие от него более короткие эпитактические наросты (Рис. 1В). Исследование флюидных включений показало, что минимальные температуры кристаллизации кварца составляют 205 – 245 °С, соленость – от 4.2 до 6.0 мас.%-экв. NaCl; во флюиде преобладал NaCl. Сфалерит кристаллизовался при близких температурах (230–255 °С), из более разбавленных растворов (0.9 – 1.7 мас.%-экв. NaCl), также Na-хлоридного состава (*Грознова, Плотинская, 2010*). Ранее близкие температуры для золото-сульфидно-хлорит-кварцевой ассоциации были ранее получены А.Г. Грановским (1993 г.).

Изучение образцов при помощи дифракции обратно-рассеянных электронов (рис. 2) показало, что для кварца характерна довольно низкая степень кристалличности (рис. 2А, Б). В некоторых случаях для кварца наблюдается глобулярная форма, сложенная радиально-лучевыми двойниками, характерная для образования из силикатного геля. Агрегаты сфалерита сложены хорошо раскристаллизованными хаотично ориентированными субгедральными кристаллами с полисинтетическими двойниками (рис. 2Б, В). Самородное золото в кварце также имеет низкую степень кристалличности, тогда как в сфалерите его степень кристалличности довольно высокая, т.е. дефектность структуры существенно ниже. В плоскости шлифа выделения самородного золота расположены кластерами, в каждом из которых ориентировка кристаллов одинаковая (рис. 2Г) и, по-видимому, каждый такой кластер соответствует отдельному дендриту.

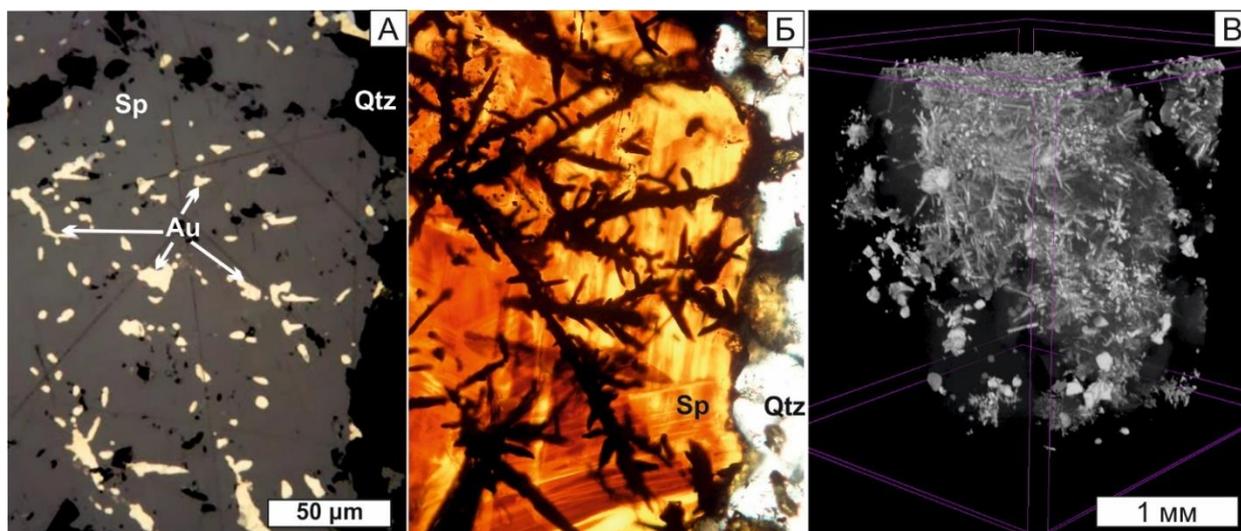


Рисунок 1 – Дендритовидное самородное золото в сфалерите. А, Б– пластинка толщиной 0.5 мм в отраженном (А) и в проходящем (Б) свете; В – распределение дендритов в сфалерите, полученное методом рентгеновской микротомографии. Qtz – кварц, Sp – сфалерит, Au – самородное золото

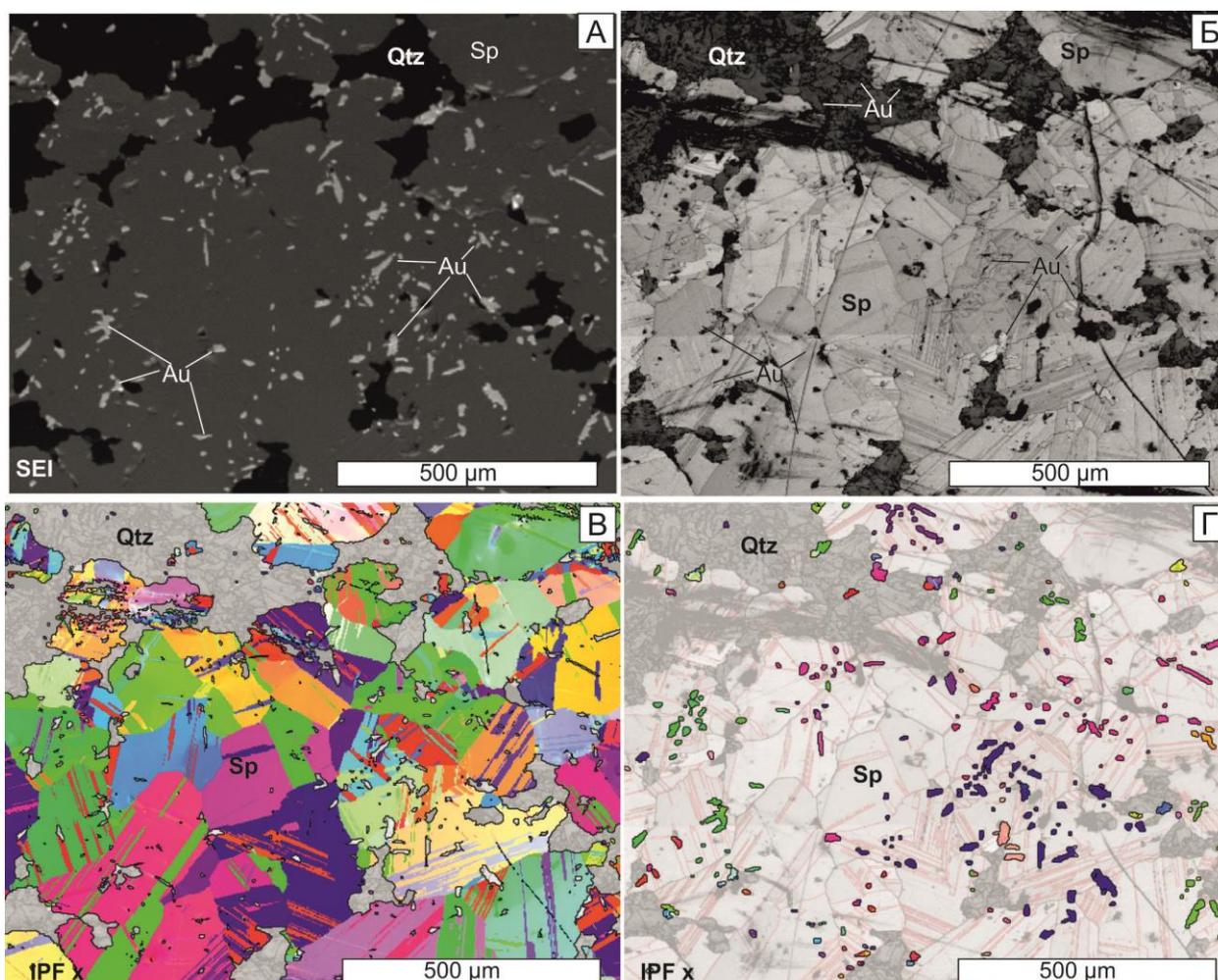


Рисунок 2 – Исследование агрегата кварца, сфалерита и самородного золота при помощи дифракции обратно-рассеянных электронов. А – изображение в обратно-рассеянных электронах; Б – контраст полос; В и Г – карты ориентировок осей IPF x: для сфалерита (В) и для самородного золота (Г), наложенные на карту контраста полос

### Обсуждение результатов

В литературе дендритовидные формы выделений минералов традиционно связывают с быстрой кристаллизацией (Рамдор, 1962 и др.). Чаще всего золотые дендриты встречаются

среди халцедоновидного кварца в рудах низкосульфидизированных эпитеpmальных месторождений, где также описаны дендриты теллуридов, селенидов и сульфидов (*Tharalson et al., 2023*). Развитие же золотых дендритов внутри кристаллов сфалерита зафиксировано впервые. Для объяснения формирования дендритов на эпитеpmальных месторождениях чаще всего привлекают модель осаждения из коллоидного раствора, причем кристаллизация дендритов происходит одновременно с осаждением силикагеля, который позднее перекристаллизовывается в халцедон и кварц (*Tharalson et al., 2023* и цитируемая литература). Низкая степень кристалличности кварца, наблюдаемая в образцах с месторождения Аметистовое, может быть результатом его перекристаллизации из силикагеля или халцедона. По-видимому, одновременно происходила и перекристаллизация самородного золота, находящегося в кварце и это объясняет низкую степень кристалличности этого золота. Соотношение самородного золота со сфалеритом не вполне однозначно. Одновременный рост золотых дендритов и хорошо образованных кристаллов сфалерита маловероятен. Замещение сфалерита самородным золотом по трещинам также можно исключить, т.к. выделения самородного золота не приурочены ни к границам зерен, ни к плоскостям двойникования или спайности сфалерита (рис. 2В, Г). Наиболее вероятной версией является образование золотых дендритов частично в силикагеле, частично в открытом пространстве, и последующее выполнение открытого пространства сфалеритом при одновременной перекристаллизации силикагеля. Это согласуется с тем, что сфалерит кристаллизовался из более разбавленного флюида чем кварц.

### **Заключение**

В рудах месторождения Аметистовое впервые установлено дендритовидное самородное золото, которое приурочено к агрегатам сфалерита. Кристаллизация золотых дендритов происходила частично в силикагеле, частично в открытом пространстве, затем последнее было заполнено сфалеритом с одновременной перекристаллизации силикагеля.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГЕМ РАН*

### **Список литературы**

1. Грановский А.Г. Золото-серебряное месторождение Аметистовое (Камчатка) – термобарогеохимия и локальный прогноз / А.Г. Грановский // Руды и металлы. 1993. № 1–2. С. 87–97.
2. Грознова Е.О. Условия образования дендритовидного золота на эпитеpmальном золото-серебряном месторождении Аметистовое (Камчатка) / Е.О. Грознова, О.Ю. Плотинская // Современная минералогия: от теории к практике. Материалы докладов XI Съезда РМО, СПб: 2010. С. 175–176.
3. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания / П. Рамдор // М.: Изд-во ил. 1962. 1132 с.
4. NEDRADV сетевое издание <https://nedradv.ru/nedradv/invetsp?obj=37cbccbf7c0d2e5d6f9ac69feaf1efebef#about> (Дата обращения: 20.07.2024).
5. Sillitoe R.H. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits / R.H. Sillitoe, J.W. Hedenquist // Society of Economic Geologists Special Publication. 2003. V. 10. P. 315–343.
6. Tharalson E.R. Textural characteristics of ore mineral dendrites in banded quartz veins from low-sulfidation epithermal deposits: implications for the formation of bonanza-type precious metal enrichment / E.R. Tharalson, T. Taksavasu, T. Monecke, T.J. Reynolds, N.M. Kelly, K. Pfaff, A.S. Bell, R. Sherlock // Mineralium Deposita. 2023. V. 58. N. 8. P. 1395–1419.