

Н.Д. Толстых
Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия
tolst@igm.nsc.ru

Минеральные ассоциации эпитермальных Au-Ag месторождений Камчатки

N.D. Tolstykh
Sobolev Institute of Geology and
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Mineral assemblages of epithermal Au-Ag deposits of Kamchatka

Abstract. The epithermal deposits of Kamchatka are reviewed: Baranyevskoe and Rodnikovoe of adularia-sericite type and Maletoyvayam of acid-sulfate type. At the Baranyevskoe deposit, the Ag minerals and low-fineness gold are associated with pyrite. The ore-forming system evolved as follows: Au-Ag → Au-Ag-Cu; S-Te → Bi-S-Sn-Pb; Ag-Sb-As → Cu-Sb-Bi-As. At the Rodnikovoe deposit, the formation of Ag selenosulfides and Ag sulfosalts with dominant As is replaced by the formation of Ag-Au sulfides and Ag sulfosalts with dominant Sb. The system evolved as follows: Fe → Cu, Ag → Au, S → Se, As → Sb. The Maletoyvayam deposit contains Au sulfoselenotellurides, Au selenides and Au selenotellurides, which form at very high activity of Se and Te in acidic fluids. In this case, high fO_2 is responsible for the formation of overprinted parageneses including complex Au oxides. The physicochemical conditions, composition of fluids and fractionation of elements during the evolution affect the type of ore-forming systems of epithermal deposits of Kamchatka.

Введение. Эпитермальные месторождения являются продуктами гидротермальных конвектирующих систем в металлогенических поясах. Эпитермальные месторождения формируются в приповерхностной (1–2 км) среде, являющейся частью протяженной гидротермальной системы. Восходящие кислые флюиды мигрируют вверх по проницаемым зонам, смешиваясь с метеорными водами. За счет реакции с вмещающими породами происходит их нейтрализация и кипение с образованием зон метасоматитов различного состава и благородной минерализации [White, Hedenquist, 1995; Sillitoe, 1999; Simmons et al., 2005]. Нами предлагается использовать раннюю классификацию (адуляр-серицитовый и кислотно-сульфатный типы) [Heald et al., 1987] вместо низко- и высокосульфидизированных типов, поскольку она в большей степени отражает особенности минеральной среды [Бортников, Толстых, 2023]. Реализация того или иного типа обусловлена разными физико-химическими условиями формирования Au-Ag руд, которые и определяют типоморфные особенности каждого из них: в адуляр-серицитовом типе вмещающими породами являются кварц-кальцит-адуляровые жилы, в кислотно-сульфатном – вторичные кварциты и кварц-алунитовые метасоматиты. В первом случае, рудообразующие растворы являются восстановительными и имеют нейтральный pH, тогда как во втором типе – они окислительные и имеют кислый pH [White, Hedenquist, 1995]. Рассмотрим минеральные ассоциации и эволюцию рудоформирующих систем трех месторождений Камчатки, расположенных в олигоцен-миоценовом Центрально-Камчатском вулканогенном поясе: Бараньевского и Родникового адуляр-серицитового типа и Малетойваям кислотно-сульфатного типа.

Бараньевское месторождение расположено в центре Камчатского полуострова в Балхачской вулканотектонической структуре, вмещается миоценовыми базальтами и андезириолитами. Золото-серебряное оруденение приурочено к эрозионно-тектонической кальдере Балхачского палеовулкана [Большаков и др., 2010]. Золото-карбонат-адуляр-кварцевые

**Геохимическая специализация минеральных ассоциаций
эпitherмальных месторождений Камчатки**

Бараньевское месторождение адуляр-серицитового типа
<i>Золото-пирит-кварцевая ассоциация (стадия I)</i>
Система Au-Ag – S-Te: (Au,Ag), Ag ₂ S, Ag ₂ Te, Ag ₃ AuTe ₂ , Ag ₃ AuS ₂
Система Au-Ag – Sb-As: Ag ₁₀ (Sb,As)S ₅ , Ag ₁₇ (Sb,As) ₂ (S,Se) ₁₀ , (Ag,Au) ₂ (S,Sb,As,Se), Ag(Fe,Cu)S ₂
<i>Золото-сульфосолюно-кварцевая ассоциация (стадия II)</i>
Система Au-Ag-Cu(Fe) – Sn-S: (Au,Ag), Cu ₈ Fe ₃ Sn ₂ S ₁₂ , Cu ₆ Fe ₂ SnS ₈
Система Au-Ag-Cu(Fe) – Bi-Pb-S: (Au,Ag), PbCuBiS ₃ , CuBiS ₂ , Bi ₂ Te ₂ S, Cu ₁₂ (Sb,Bi,As) ₄ S ₁₃ , Cu ₃ Fe ₃ PbS ₇ , (Cu,Fe,Ag)PbBi(S,Se) ₃ , Cu ₃ Bi(S,Se) ₃ , Cu ₈ S ₃ , PbS, Cu
Родниковое месторождение адуляр-серицитового типа
<i>Серебро-агвиларит-акантитовая ассоциация (стадия I)</i>
Система Ag – S-Se: Ag(Au), Ag, Ag ₂ (S,Se)
Система Ag-Cu – As-Sb-S: Ag ₉ CuS ₄ (Ag,Au,Cu) ₆ (As,Sb) ₂ S ₇ , Ag ₃ CuS ₂ , Ag ₃ AsS ₃ , Cu(Ag,Cu) ₆ Ag ₉ (As,Sb) ₂ S ₁₁
<i>Золото-ютенбогардтит-акантитовая ассоциация (стадия II)</i>
Система Ag-Au – S-Se: Au(Ag), Ag ₂ (S,Se), Ag ₃ AuS ₂ , Ag ₃ CuS ₂ , AgFeS ₂
Система Ag-Cu – Sb-As-S: Cu ₃ SbS ₃ , (Cu,Ag) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃ , Ag ₉ CuS ₄ (Ag,Au,Cu) ₆ (Sb,As) ₂ S ₇
Месторождение Малетойваям кислотно-сульфатного типа
<i>Золото-малетойваямитовая ассоциация</i>
Система Au – Se-Te-S: Au, Au ₃ (Se,S) ₄ Te ₆ , Au(Te,Se), AuTe ₂ , AuSe, (Te,Se)
Система Cu – Sb-As: Cu ₃ AsS ₄ , Cu ₃ SbS ₄ , Cu ₁₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃ ; Cu ₁₂ (Te,Sb) ₄ S ₁₃
<i>Серебро-ютенбогардтит-толстыхитовая ассоциация</i>
Система Au-Ag – Se-Te-S: Au, AuAgS, Ag ₃ AuS ₂ , Ag ₃ AuSe ₂ , Au ₃ S ₄ Te ₆ ;
Система Au-Ag – Sb-As: (Ag,Au)(Sb,As)S ₂
<i>Поздняя висмутовая ассоциация</i>
Система Bi-Se-Sb-S: (Bi,Sb) ₂ Se ₃ , (Bi,Sb) ₂ (S,Se) ₃ , Bi ₂ (Se,Te) ₃ , Bi ₂ S ₃
<i>Наложенная оксидная ассоциация</i>
Система Au – Bi-Sb-As-O: Au горчичное, Bi ₂ O ₃ , BiAsO ₄ , FeSbO ₄ , (Sb,Bi,Te,As,Fe) ₂ O ₅ , (Au,Ag,Sb,As,Te,S)-O, Fe(Sb,Te) ₂ O ₆

жилы сопровождаются серицит-иллитовыми метасоматитами. По минералого-геохимическим особенностям выделено две рудных стадии, характеризующиеся различными ассоциациями (табл.). В первой золото-пирит-кварцевой ассоциации преобладают пирит и электрум Au₅₂₋₇₅, распространены соединения Ag: акантит, гессит и Ag сульфосоли (рис. 1а, б). Во второй золото-сульфосолюно-кварцевой ассоциации преобладают Au-Ag сплавы Au₈₇₋₉₅ в сростании с сульфидами Cu и сульфосолями Bi (мавсонит, эмплектит, виттехинит, тетрадимит) (рис. 1в, г). При этом тетраэдрит также значительно обогащен Bi.

Родниковое месторождение относится к действующей Мутновско-Асачинской геотермальной системе. Кварц-адуляровые и кварц-карбонатные жилы внедрены в диориты и габбродиориты. Околорудные метасоматиты представлены пропилитами и аргиллизитами

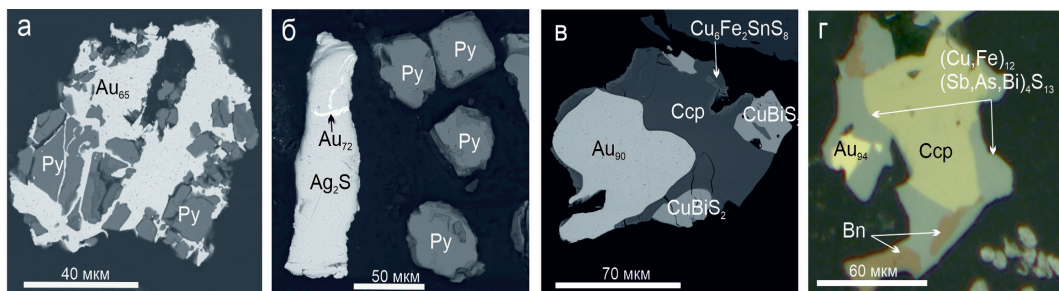


Рис. 1. Минеральные ассоциации Бараньевского месторождения: золото-пирит-кварцевая (а, б) и золото-сульфосоляно-кварцевая (в, г) ассоциации.

Здесь и далее: нижний индекс рядом с Au обозначает атомное содержание в составе Au-Ag сплавы. Py – пирит, Ccp – халькопирит, Bn – борнит, Ag_2S – акантит, $CuBiS_2$ – эмплектит, $Cu_6Fe_2SnS_8$ – мавсонит, $(Cu,Fe)_{12}(Sb,As,Bi)_4S_{13}$ – Ви-тетраэдрит. Фото а-в – СЭМ, г – отраженный свет.

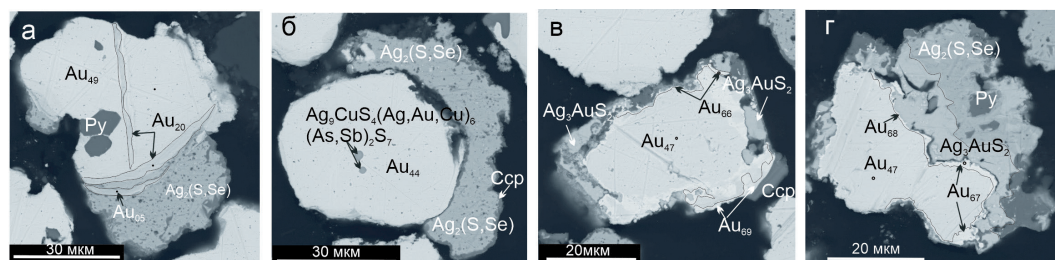


Рис. 2. Минеральные ассоциации Родникового месторождения: серебро-акантитовая (а, б) и золото-ютенбогаардтитовая (в, г) ассоциации.

$Ag_2(S,Se)$ – акантитовый твердый раствор, Ag_3AuS_2 – ютенбогаардтит, $Ag_3CuS_4(Ag,Au,Cu)_6(As,Sb)_2S_7$ – твердый раствор полибазит-пирсеит. СЭМ фото.

[Takahashi et al., 2002]. Нами выделены две рудные ассоциации, соответствующие стадиям рудообразования: серебро-акантитовая и золото-ютенбогаардтитовая (табл.). В первой ассоциации первичные Au-Ag сплавы (Au_{40-65}) замещаются самородным серебром (тонкие каймы и прожилки), затем Se-содержащим акантитом или минералами серии акантит-авгиларит $Ag_2(S,Se)$ (рис. 2а, б). Во второй ассоциации Au-Ag сплавы аналогичного состава замещаются более высокопробным золотом Au_{62-70} (тонкие каймы), затем ютенбогаардтитом Ag_3AuS_2 и далее акантитовым твердым раствором (рис. 2в, г).

Месторождение Малетойваям приурочено к Ветровянской вулканотектонической структуре и связано с кварцевыми жилами и вторичными кварцитами среди андезитов, туфов и туфопесчаников. Месторождение сопровождается каолинит-кварцевыми метасоматитами, аргиллизитами и пропилитами [Мелкомуков и др., 2010]. Халькогениды Au (Ag)-Te-Se-S системы являются ведущими минералами рудных ассоциаций. На ранней стадии выделяются две рудные ассоциации: первая представлена твердыми растворами малетойваямит-голстыхит $Au_3(Se,S)_4Te_6$, высокопробным золотом, калаверитом, самородным теллуром и сульфосолями энרגитовой группы. Уникальные минералы золота ауроселенид $AuSe$ и гачингит $Au(Te,Se)$ также выявлены здесь (рис. 3а, б). Вторая ассоциация включает Ag-содержащие минералы ютенбогаардтит, петровскаит и Au миаргирит (рис. 3в, г). Более поздняя стадия представлена висмутовой ассоциацией. Наложенная стадия включает многочисленные сложные оксиды золота переменного состава $(Au,Fe,Sb,Te,Se)-O$, образованные по первичному калавериту $AuTe_2$, а также (Sb,Bi,Te) -оксиды, образованные по висмутиниту $(Bi,Sb,Te)_2(S,Se)_3$ в сростании с энргитом и другими сульфосолями (таблица).

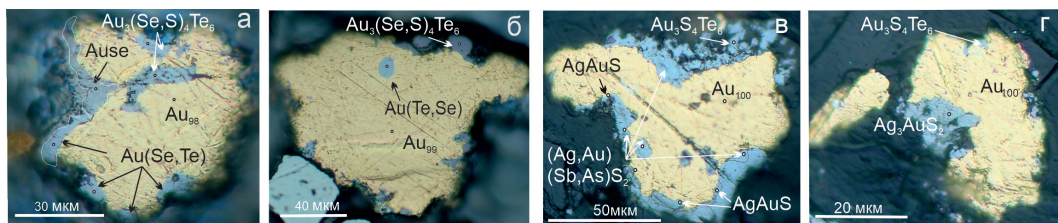


Рис. 3. Минеральные ассоциации месторождения Малотойваям: золото-малотойваямитовая (а, б) и серебро-ютенбогардит-толстыхитовая (в, г) ассоциации.

AuSe – ауроселенид, Au(Se,Te) – неназванная фаза, Au(Te,Se) – гачингит, Au₃(Se,S)₄Te₆ – малотойваямит, Au₃S₄Te₆ – толстыхит, AgAuS – петровскит, (Ag,Au)(Sb,As)S₂ – Au-миаргрит (?), Ag₃AuS₂ – ютенбогардит. Отраженный свет.

Обсуждение и выводы. Адуляр-серцитовые месторождения Камчатки обладают сходством, обусловленным близостью физико-химических условий образования: 1) сростания с сульфидами; 2) преобладание Ag над Au в рудных ассоциациях; 3) увеличение Au/Ag отношений в ходе эволюции рудных систем. Но они разнообразны по геохимической специализации: сульфиды и теллуриды Ag распространены на Бараньевском месторождении, и сульфиды и селениды Ag – на Родниковом.

На Бараньевском месторождении первичная минерализация сростается с пиритом, золото является низкопробным, характерны минералы Ag. Система развивается следующим образом: Au-Ag → Au-Ag-Cu, S-Te → Bi-S-Sn-Pb, Ag-Sb-As → Cu-Sb-Bi-As. Низкопробное золото сменяется более высокопробным. На Родниковом месторождении минерализация ранней стадии сложена селеносульфидами и сульфосолями Ag с преобладанием As над Sb, на поздней стадии формируются Ag-Au халькогениды и сульфосоли Ag с преобладанием Sb, обе в ассоциации с пиритом. Система развивается следующим образом: Fe → Cu, Ag → Au, S → Se, As → Sb. Выраженный S/Se изоморфизм (акантитовый твердый раствор) происходит в нейтральных условиях при $f\text{Se}_2/f\text{S}_2 < 1$ [Yuningsih et al., 2016]. Для кислотно-сульфатного месторождения Малотойваям характерны сульфоселенотеллуриды, селениды и селенотеллуриды Au, которые образуются при высокой активности Se и Te, что возможно только в кислых растворах при высокой $f\text{O}_2$. Сульфосоли энаргитовой группы и продуктивная ассоциация оторваны от пирита по времени.

Таким образом, физико-химические условия, составы растворов (геохимическая специализация) и фракционирование элементов в ходе эволюции определяют специализацию рудоформирующих систем эпитермальных месторождений.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда РНФ № 23-27-00258.

Литература

- Большаков Н.М., Фролов А.И., Минеев С.Д. и др. Геологическое строение золоторудного месторождения Бараньевское (Центральная Камчатка) // Отечественная геология. 2010. Т. 4. С. 15–22.
- Бортников Н.С., Толстых Н.Д. Эпитермальные месторождения Камчатки, Россия // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 7. С. 722–752.
- Мелкомуков В.Н., Разумный А.В., Литвинов А.Ф., Лопатин В.Б. Новые высокоперспективные золоторудные объекты Корьякии // Горный вестник Камчатки. 2010. Т. 4. № 14. С. 17–29.
- Heald P., Foley N.K., Hayba D.O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits; acid-sulfate and adularia-sericite types // Economic Geology. 1987. Vol. 82. No. 1. P. 1–26.

Sillitoe R.H. Styles of high sulfidation gold, silver and copper mineralization in the porphyry and epithermal environments // *Pacrim '99 Congress Proceedings: Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 1999. P. 29–44.

Simmons S.F., White N.C., John D.A. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits // *Economic Geology*. 2005. Vol. 100th Anniversary. P. 485–522.

Takahashi R., Matsueda H., Okrugin V.M. Hydrothermal gold mineralization at the Rodnikovoe deposit in South Kamchatka, Russia // *Resource Geology*. 2002. Vol. 52. P. 359–369.

White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration // *SEG Newsletter*. 1995. Vol. 23. P. 9–13.

Yuningsih E.T., Matsueda H., Rosana M.F. Diagnostic genesis features of Au-Ag selenide-telluride mineralization of Western Java deposits // *Indonesian Journal on Geoscience*. 2016. Vol. 3. No.1. P. 67–76.

Ю.М. Телегин¹, Н.Д. Толстых²

¹ – ООО Проспектор, г. Екатеринбург, Россия
yuritegin@mail.ru

² – Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Особенности локализации аномальных концентраций платины в пироксенит-дунитовых интрузиях Среднего Урала

Yu.M. Telegin¹, N.D. Tolstykh²

¹ – Prospector Company, Yekaterinburg, Russia

² – Sobolev Institute of Geology and
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Peculiarities of occurrence of anomalous Pt content of pyroxenite-dunite intrusions of Central Urals

Abstract. The anomalous Pt content of pyroxenite-dunite intrusions of Central Urals is due to the complex fault zones filled with later dikes. The origin of anomalous Pt content is a result of post-magmatic tectonic activation, which was responsible for the remobilization of primary magmatic platinum and its following precipitation in structural traps.

Зона Главного Уральского разлома – уникальная тектоническая структура на границе Русской платформы и уральских структур. Типоморфным для нее является пояс пироксенит-дунитовых интрузий, с которым связаны крупнейшие в мире россыпи платины, отрабатываемые с 1824 г. Общепринятыми являются представления, что источниками платины в уральских россыпях являются дунитовые ядра пироксенит-дунитовых интрузий. Большинство исследователей признают два основных типа платиновой минерализации: хромититовый и дунитовый. Известны многочисленные мелкие проявления обоих типов, которые даже эксплуатировались (Госшахта, Авроринское), но до сих пор не выявлены коренные месторождения платины, сопоставимые с россыпями по платиновому потенциалу.

Крупнейшим россыпным платиновым районом Урала является Исовско-Туринский, в пределах которого из россыпей добыто не менее 200 т платины. Коренными источниками этих россыпей являются Светлоборская и Вересовоборская пироксенит-дунитовые интрузии. Именно здесь, в 2000-е гг. активизировались поиски коренных месторождений платины. В результате этих работ наметился определенный прогресс. Данная работа рассматривает