

**ТИПОМОРФИЗМ ПИРИТА КАК МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОРУДЕНЕНИЯ  
НА ПРИМЕРЕ ЭПИТЕРМАЛЬНОГО АU-АG МЕСТОРОЖДЕНИЯ СВЕТЛОЕ  
(ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)**

Ерофеев А.Е.<sup>1</sup> Левочская Д.В.<sup>2</sup>, Якич Т.Ю.<sup>1</sup>

Научный руководитель доцент, к.г.-м.н. Т.Ю. Якич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Хабаровский филиал АО «Полиметалл УК», г. Хабаровск, Россия

Наиболее распространенным сульфидом, особенно в месторождениях золота, традиционно считается пирит [7–9]. Характер концентрирования элементов в составе пирита зачастую представляет не только фундаментальный, но и практический интерес, так как отдельные зоны этого минерала могут являться концентраторами наноразмерного [6, 10–11] или микронного [4] золота. Происхождение этого явления в эпитеpмальных месторождениях истолковано [6] как результат неравновесных процессов, связанных со смешиванием гидротермальных флюидов разного состава и/или растворением-перерождением пирита в более благоприятных кинетических условиях [6]. Так, например, проведенные исследования в местах современной геотермальной и активной гидротермальной деятельности (Чили) показали прямую связь между обогащением зон мышьяком и медью в пирите и изменениями, происходящими в составе рудообразующего флюида [12]. Степень захвата пиритом элементов примесей зависит от положения кристаллов к поступающему раствору, степени контакта с другими минералами, от того, какие это минералы и др. Форма кристаллов пирита зависит от кристаллохимических его особенностей, физико-химических условий среды минералообразования, характера ассоциирующих с ним минералов и др [3 – 4]. Так, например, в нейтральной среде атомы железа и гантели серы энергетически становятся равноправными и наиболее плотные сетки в структуре отвечают граням куба, поэтому кристаллы кубического габитуса предпочтительнее кристаллизуются из нейтральных растворов, а октаэдрические из кислых или щелочных [3 – 4]. Исследователи морфологии пирита приходят к выводу о том, что при развитии рудоносных метасоматических ореолов происходит последовательное усиление интенсивности развития пентагондодекаэдрических граней на кубических кристаллах, вплоть до комбинаций (100) + (210) с преобладанием граней пентагондодекаэдра и появления, собственно, пентагондодекаэдрических кристаллов [1].

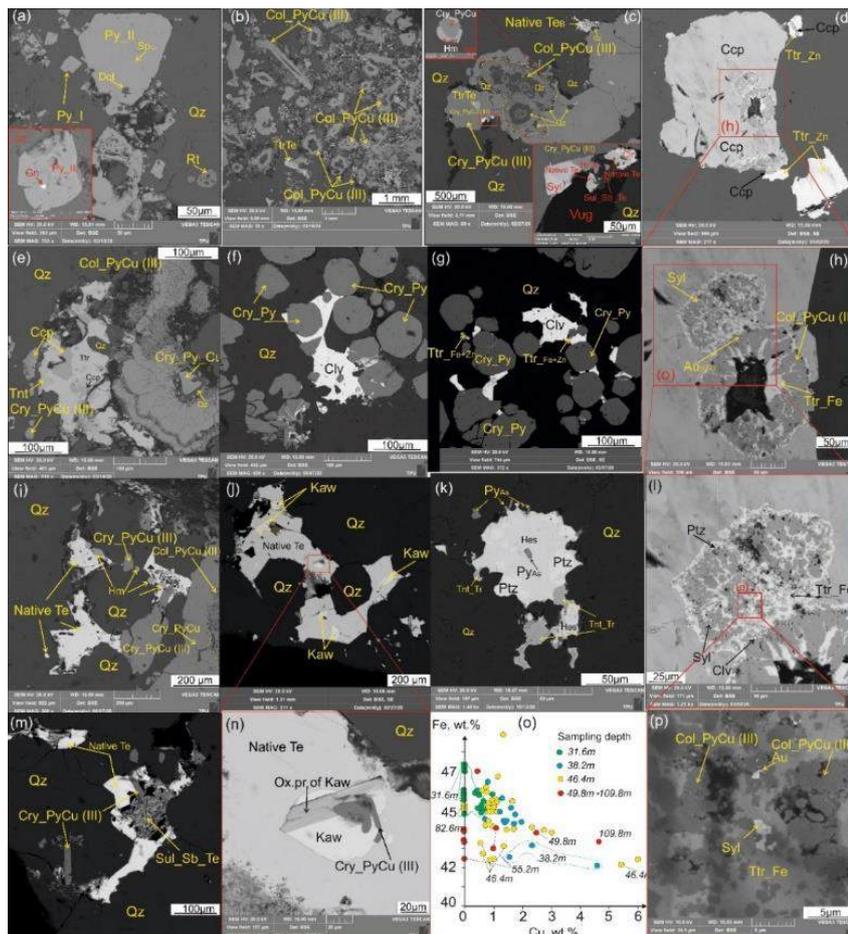


Рис. Микрофотографии (изображения SEM-BSE), демонстрирующие парагенезис сульфидов, сульфосолей и теллуридов рудной зоны Эми

Объектом настоящего исследования является изучение типоморфизма наиболее распространенного минерала эпитермального месторождения Светлое рудной зоны Эми – *пирита* в качестве минералогического поискового критерия золотого оруденения Au-Ag-Te типа. Ранее в пределах эпитермального месторождения Светлое, частью которого является рудная зона Эми, авторами установлено два типа золотого оруденения: Au-Ag и Au-Ag-Te [13]. Рудная зона Эми локализована в пределах Ульяновского прогиба Охотско-Чукотского вулканогенно-плутонического пояса, сложенного меловыми вулканогенно-осадочными отложениями [2]. При исследовании 120 аншлифов установлено несколько генераций пирита. (I) Дорудный пирит (I) кубического габитуса, мелкозернистый, со средним размером кристаллов 20–50 мкм, соответствует ранней метасоматической стадии (рис. а). (II) Рудогенный пирит полиметаллической стадии (II), который крупнее раннего пирита (I), также демонстрирует признаки выщелачивания вследствие действия следующих ступеней гидротермального этапа. Он содержит сингенетичные включения галенита и сфалерита (рис. 3а), и эпигенетические включения глин, блеклых руд II, карбонатов, кварца, заполняющих пустоты в процессе дальнейшего минералообразования. (III) Рудогенный пирит теллуридной стадии представлен двумя морфологическими разновидностями – колломорфной (IIIа) (рис. b-c), более ранней, которая обрастает кристаллическим (идиоморфным) пиритом (IIIб) (рис. c). Обе морфологические разновидности содержат значимую примесь Cu (0,06–6,03 мас. %). Пирит этой стадии встречается в ассоциации с блеклыми рудами II (рис. d-e), теллуридами золота и серебра (рис. f-g, k-l, p), хемуситом (рис. i) и кавачулитом (рис. n). В некоторых образцах этот пирит (IIIб) имеет признаки растворения (рис. n), обусловленного замещением при притоке более поздних флюидов, отлагающих различные теллуриды Cu, Sb, Bi, Ni, Hg, Au, Ag, самородного теллура (рис. m-n), «нормальные» блеклые руды (твердые растворы теннантит-тетраэдрита) и халькопирит. Пирит этой стадии имеет идиоморфный облик кристаллов, отклоняющийся от кубического в зависимости от глубины образования. На более глубоких горизонтах рудогенный пирит IIIб представлен пентагондодэкаэдрическими разновидностями (рис. f-g), тогда как по направлению к поверхности и ближе к более окисленным поверхностным состояниям он приобретает преимущественно призматическую форму и обогащается мышьяком (рис. k-m). Пирит IIIб также демонстрирует химическую неоднородность по глубине образования. На самых глубоких горизонтах он не обогащён значимыми примесями, которые легко определяются малочувствительными методами, на средней глубине обогащён примесью меди, а в приповерхностных условиях обогащён мышьяком.

*Исследования выполнены в рамках Государственного задания Наука № FSSWW–2023–0010, тема "Комплексные исследования на базе природных геологических лабораторий".*

#### Литература

1. Коробейников А.Ф., Пшеничкин А.Я. Геохимические особенности пирита золоторудных месторождений // *Геохимия*. – 1985. – №1. – С. – 93–104.
2. Мишин Л.Ф. Вторичные кварциты и их связь с золоторудной минерализацией месторождения Светлое (Россия) (Ульяновский прогиб, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс) // *Тихоокеанская геология*. – 2011. – Т. 30. – № 4. – С. 32–48.
3. Новгородова, М.И., Гамянин, Г.Н., Цепин, А.М., Кортман, Р.В., Чижова, И.А. Типоморфизм золотоносных сульфидов и их минеральных ассоциаций // *Новые данные о типоморфизме минералов*. – М.: Наука, 1980.
4. Попов, А.Б. Оценка уровня эрозионного среза золоторудных месторождений восточной части Гонжинского выступа // *Генезис месторождений золота и методы добычи благородных металлов (Материалы Международной научной конференции, посвященной 300-летию геологической службы России)*. – Благовещенск: АмурКНИИ АмурНЦ ДВО РАН, 2001. – С. 107–109.
5. Прохоров, В.Г. Элементы-примеси в пиритах и возможности использования пиритов при поисках рудных месторождений // *Геология и геофизика*. – 1965. – № 9. – С. 67–74.
6. Deditius, A. P. Reich, M., Kesler, S. E., Utsunomiya, S., Chryssoulis, S. L., Walshe, J., Ewing, R. C. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits / A. P. Deditius, M. Reich, S. E. Kesler, S. Utsunomiya, S. L. Chryssoulis, J.Walshe, R. C. Ewing // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2014. – V.140. – P. 644–670.
7. Keith, M.; Smith, D.J.; Jenkin, G.R.T.; Holwell, D.A.; Dye, M.D. A Review of Te and Se Systematics in Hydrothermal Pyrite from Precious Metal Deposits: Insights into Ore-Forming Processes. *Ore Geology Reviews*. – 2018. – 96. – 269-282. – doi:10.1016/j.oregeorev.2017.07.023.
8. Keith, M.; Smith, D.J.; Jenkin, G.R.J.; Holwell, D.A. Global Se and Te Systematics in Hydrothermal Pyrite from Different Ore Deposits: A Review. *Appl. Earth Sci.* – 2017. – Vol. 126. – P. 70–71. doi:10.1080/03717453.2017.1306265.
9. Keith, M.; Börner, F.; Keith, M.; Smith, D.J.; Barry, T.L.; Neumann, T.; Klemd, R. Epithermal Pyrite as Target for Tellurium Exploration in Vatukoula , Fiji Epithermal Pyrite as Target for Tellurium Exploration in Vatukoula , Fiji. *Abstr. DMG virtual poster Sess.* – 2020. – P. 2–3.
10. Kesler, S. E. Ewing, R. C, Deditius, A.P., Reich, M. M, Utsunomiya, S., Chryssoulis, S. Role of arsenian pyrite in hydrothermal ore deposits: A history and update. // *Great Basin Evolution and Metallogeny, Vols I and II in Conference: 6th Geological Society of Nevada on Great Basin Evolution and Metallogeny: Reno*. – 2011. – P. 233–243.
11. Simon, G., Huang, H., Penner-Hahn, J.E., Kesler, S.E., Kao, L.S. Oxidation state of gold and arsenic in gold-bearing arsenian pyrite / G. Simon, H. Huang, J.E. Penner-Hahn, S.E. Kesler, L.S. Kao // *American Mineralogist*. – 1999. – V. 84. – P. 1071–1079.
12. Tardani, D., Reich, M., Deditius, A. P., Chryssoulis, S., Sánchez-Alfaro, P., Wrage, Ja., Roberts, M. P. Copper–arsenic decoupling in an active geothermal system: A link between pyrite and fluid composition / D. Tardani, M. Reich, A. P. Deditius, S. Chryssoulis, P. Sánchez-Alfaro, Ja. Wrage, M. P. Roberts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2017. – V. 204. – P. 179–204.
13. Yakich, T.Y., Ananyev Y.S., Ruban A.S., Gavrilov, R.Y., Lesnyak, D.V., Levochskaia, D.V., Savinova, O.V., and Rudmin M.A. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration / T.Y.Yakich, Y.S.Ananyev, A.S.Ruban, R.Y.Gavrilov, D.V.Lesnyak, D.V. Levochskaia, O.V.Savinova, and M.A. Rudmin // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – V.136. 104257 DOI:10.1016/j.oregeorev.2021.104257