

Konopelko D., Klemm R., Petrov S.V., Apayarov F., Nazaraliev B., Vokueva O., Scherstin A., Sergeev S. Precambrian gold mineralization at Djamgyr in the Kyrgyz Tien Shan: tectonic and metallogenic implications // *Ore Geology Reviews*. 2017a. Vol. 86. P. 537–547.

Konopelko D., Seltmann R., Mamadjanov Y., Romer R.L., Rojas-Agramonte Y., Jeffries T., Fidaev D., Niyozov A. A geotraverse across two paleo-subduction zones in Tien Shan, Tajikistan // *Gondwana Research*. 2017b. Vol. 47. P. 110–130.

Konopelko D., Wilde S.A., Seltmann R., Romer R.L., Biske Yu.S. Early Permian intrusions of the Alai range: Understanding tectonic settings of Hercynian post-collisional magmatism in the South Tien Shan, Kyrgyzstan // *Lithos*. 2018. Vol. 302–303. P. 405–420.

Yakubchuk A., Schloderer J., Woodcock J., Wurst A. Taldybulak Au–Cu–Mo deposit: a new >5 Moz Au (11.7 Moz Au eq) Ordovician porphyry hosted gold system in Kyrgyzstan, Central Asia // *Applied Earth Science. Transactions of Institute of Mining and Metallurgy*. 2010. B 119 (2), 84.

**О.Ю. Плотинская<sup>1</sup>, В.Д. Абрамова<sup>1</sup>, Й. Найорка<sup>2</sup>, Д.Б. Бондарь<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> – *Институт геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии РАН, г. Москва*  
*plotin@igem.ru*

<sup>2</sup> – *Музей естественной истории, г. Лондон, Великобритания*

<sup>3</sup> – *Университет г. Байрейт, г. Байрейт, Германия*

## **Типоморфизм молибденита медно-порфировых рудообразующих систем Урала**

Изучены типоморфные характеристики молибденита (особенности химического состава и политипные модификации) из семи медно- и молибден-порфировых месторождений и рудопроявлений Южного и Среднего Урала. Эти месторождения сформировались в различных геотектонических обстановках: от островодужных до коллизионных [Plotinskaya et al., 2017] и характеризуются различным геохимическим профилем руд [Грабежев, Белгородский, 1992].

Химический состав молибденита изучен при помощи масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором (ЛА ИСП МС) на квадрупольном масс-спектрометре Thermo Xseries с лазерной приставкой New Wave 213 (ЦКП «ИГЕМ-аналитика»). Параметры анализа: частота – 20 Гц, плотность энергии – 4–7 Дж/см<sup>2</sup>, скорость – 5 мкм/сек, диаметр лазера 30–65 мкм. В качестве внешних стандартов использовались ро\_стc (ИГЕМ РАН) и MASS1C, в качестве внутреннего – <sup>33</sup>S [Плотинская и др., 2018; Plotinskaya et al., 2018]. Политипные модификации молибденита определялись *in situ* в полированных препаратах на микрорентгеновском дифрактометре Rigaku Rapid II (Музей естественной истории, г. Лондон). Соотношения политипов определялись по соотношению интенсивностей пиков 39.5 и 41.1 2 $\theta$  для 2H и 3R-политипа, соответственно; область анализа составляла 70–100 мкм [Plotinskaya et al., 2019].

Большинство элементов-примесей, установленных в молибдените (Si, Ti, Ca, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Ag, Sb, Te, Au, Pb, Bi), входят в состав минеральных включений – силикатов, карбонатов, галенита, теллуридов и различных сульфосолей. В качестве

изоморфных примесей в структуру молибденита могут входить Re и W, которые замещают Mo, и Se, замещающий S [Newberry, 1979]. Тем не менее, корреляционный анализ и анализ спектров ЛА ИСП МС показали, что Se чаще всего входит в состав минеральных включений сульфидов и сульфосолей, а в некоторых случаях в состав включений силикатов может входить и W [Плотинская и др., 2018; Plotinskaya et al., 2018]. Поэтому наиболее удобно обсуждать состав молибденита в координатах Re–W (рис. 1).

*Месторождения Восточно-Уральской вулканогенной зоны.* Молибденит Томинского медно-порфирового месторождения, образовавшегося в океанической дуге силурийского возраста, характеризуется наиболее высокими содержаниями Re (8.7–5800 г/т, ср. геом. 938 г/т) и W до 5.8 г/т (по трем образцам) [Plotinskaya et al., 2018]. Молибденит обычно представлен смесью 3R и 2H политипов. Молибденит месторождения Зеленодольское (два образца) по содержанию Re (1400–3900 г/т, ср. геом. 2140 г/т) близок томинскому, но отличается более высокими содержаниями W (25–107 г/т, ср. геом. 50 г/т), что, скорее всего, вызвано захватом силикатов с примесями W. Молибденит представлен исключительно 2H-политипом. Руды обоих месторождений характеризуются высоким отношением Cu/Mo: 150 на Томинском и 220 на Зеленодольском (здесь и далее приведены данные из [Грабежев, Белгородский, 1992]).

*Месторождения Магнитогорской мегазоны.* Вознесенское медно-порфировое месторождение девонского возраста образовалось в островодужной обстановке. Отношение Cu/Mo в рудах составляет около 250. Молибденит характеризуется высокими

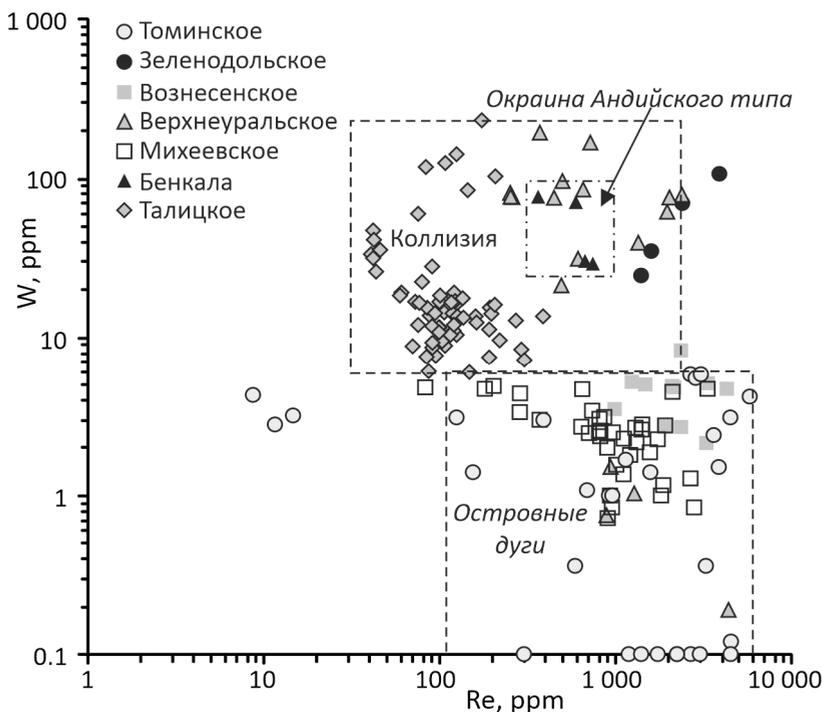


Рис. 1. Диаграмма Re–W для молибденита изученных месторождений по данным ЛА ИСП МС.

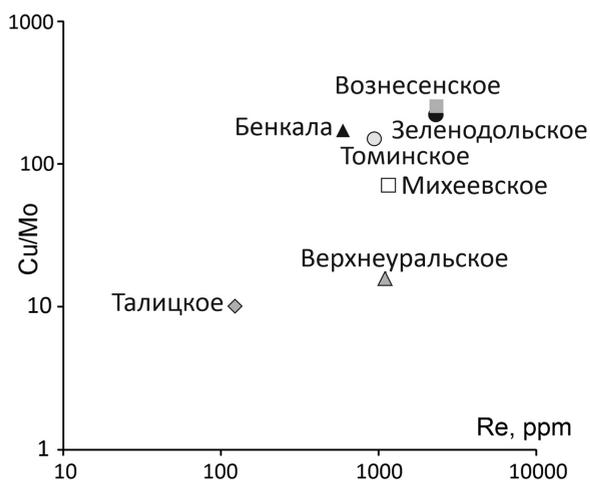
содержаниями Re (990–4300 г/т, ср. геом. 2133 г/т) и низкими – W (2–8 г/т, ср. геом. 4 г/т) и представлен 2Н-политипом (по трем образцам). Позднедевонское Верхнеуральское молибден-порфировое рудопоявление образовалось в период коллизии Магнитогорской вулканической дуги и Восточно-Европейского континента. Отношение Cu/Mo составляет 15. Молибденит характеризуется заметными содержаниями Re (253–4400 г/т, ср. геом. 782 г/т) и W (до 194 г/т, ср. геом. 28 г/т) и представлен исключительно 2Н-политипом (по трем образцам).

*Месторождения Зауральской мезазоны.* Михеевское и Западное медно-порфировые месторождения также связаны с островодужным магматизмом (D<sub>3</sub>–C<sub>1</sub>). Отношение Cu/Mo в рудах составляет 71. Молибденит (по трем образцам) также обогащен Re (83–3340 г/т, ср. геом. 906 г/т) и обеднен W (до 4.9 г/т). Агрегаты молибденита представлены срастаниями 3R и 2Н политипов [Plotinskaya et al., 2019]. Раннекаменноугольное медно-порфировое месторождение Бенкала образовалось в обстановке активной континентальной окраины. Отношение Cu/Mo в рудах составляет 167. Молибденит (один образец) характеризуется значительно более низкими содержаниями Re (364–744 г/т, ср. геом. 574 г/т) и более высокими – W (29.2–76.8 г/т, ср. геом. 46.9 г/т), чем молибденит месторождений океанических островных дуг, и представлен 2Н-политипом.

*Месторождения Восточно-Уральской мезазоны.* Талицкое молибден-порфировое месторождение (C<sub>2</sub>–P<sub>1</sub>) образовалось в обстановке коллизии Казахстанского и Восточно-Европейского континентов. Отношение Cu/Mo в рудах составляет 10. Молибденит (по пяти образцам) характеризуется невысокими содержаниями Re (40.8–388 г/т, ср. геом. 109 г/т) и повышенными – W (6.0–232 г/т, ср. геом. 17.4 г/т) и представлен исключительно 2Н-политипом.

Высокореиновый молибденит может быть представлен как смесью 3R и 2Н политипов (Михеевское, Томинское месторождения), так и исключительно 2Н-политипом (месторождения Зеленодольское, Верхнеуральское, Вознесенское). Низкорейновый молибденит представлен 2Н-политипом (месторождения Бенкала и Талицкое).

Как видно на рисунке 2, среднее геометрическое содержание Re в молибдените практически не зависит от отношения Cu/Mo в рудах. На Талицком месторождении с



наиболее низким Cu/Mo = 10 отмечаются низкие содержания Re в молибдените. Однако на Верхнеуральском рудопоявлении с близким Cu/Mo = 15 содержания Re в молибдените выше на один порядок. На месторождении Бенкала содержания Re в молибдените примерно на порядок ниже, чем на других медно-порфировых месторождениях с близким отношением Cu/Mo в рудах.

Рис. 2. Диаграмма Re–Cu/Mo для молибденита изученных месторождений по данным ЛА ИСП МС.

На рисунке 1 видно, что содержания элементов-примесей в молибдените варьируют в зависимости от геотектонических обстановок формирования месторождений. Наиболее высокие содержания Re и низкие – W чаще характерны для месторождений, образовавшихся в обстановках океанических островных дуг, тогда как для месторождений, формировавшихся на активной континентальной окраине (Бенкала) и в коллизионных обстановках (Талицкое) содержания Re понижены, а концентрации W повышены. Это позволяет рассматривать молибденит как один из возможных индикаторов геотектонических обстановок формирования медно- и молибден-порфировых месторождений.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00254).*

### Литература

*Грабежев А.И., Белгородский Е.А.* Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфировых месторождений. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 1992. 199 с.

*Плотинская О.Ю., Бондарь Д.Б., Абрамова В.Д.* Элементы-примеси в молибдените Cu- и Mo-порфировых месторождений Урала (по данным ЛА ИСП МС): методические подходы и первые результаты // Металлогения древних и современных океанов–2018. Вулканизм и рудообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 115–120.

*Newberry R.J.J.* Polytypism in molybdenite (I): a nonequilibrium impurity induced phenomenon // *American Mineralogist*. 1979. Vol. 64. P. 758–767.

*Plotinskaya O.Y., Abramova V.D., Groznova E.O., Tessalina S.G., Seltmann R., Spratt J.* Trace element geochemistry of molybdenite from porphyry Cu deposits of the Birgilda-Tomino ore cluster (South Urals, Russia) // *Mineralogical Magazine*. 2018. Vol. 82 (S1). P. S281–S306.

*Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Tessalina S., Seltmann R., Groznova E.O., Abramov S.S.* Porphyry deposits of the Urals: geological framework and metallogeny // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 85. P. 153–173.

*Plotinskaya O.Y., Shilovskikh V.V., Najorka J., Kovalchuk E.V., Seltmann R., Spratt J.* Grain-scale distribution of molybdenite polytypes versus rhenium contents:  $\mu$ XRD and EBSD data // *Mineralogical Magazine*. 2019. Vol. 83. P. 639–644.

**М.А. Юдовская**

*Институт геологии рудных месторождений,  
минералогии, петрографии и геохимии РАН, г. Москва  
Университет Витватерсранд, г. Йоханнесбург, ЮАР  
maiya@igem.ru*

### **Химические и физические процессы трансформации хромита и его индикаторная роль в расшифровке условий сульфидного магматического рудообразования**

Хромит кристаллизуется из расплавов широкого диапазона составов от коматитовых и пикритовых до толеитовых и щелочных базальтовых. При всех условиях хромит кристаллизуется как один из первых ликвидусных минералов, и его состав, в целом, может быть использован для диагностики состава его родительского расплава. Однако несколько факторов влияют на химический состав хромита и затрудняют прямое сопоставление: (1) изменения самого расплава в ходе кристаллизационной