

О. Ю. Плотинская
*Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, г. Москва*
plotin@igem.ru

Рений в медно-порфировых месторождениях Южного Урала

Введение. Месторождения Cu(Mo)-порфирового типа являются не только основным источником Cu и Mo (около 75 % и 50 % мировой добычи, соответственно), но также содержат целый ряд других элементов, которые становятся промышленно значимыми из-за больших объемов руды [Sillitoe, 2010]. Наиболее важными попутными компонентами являются Re (почти 100 % мировой добычи) и Au (около 20 %), также присутствуют Ag, Pd, Te, Se, Bi, Zn и Pb. Чаще всего рением (и зачастую другими редкими и благородными металлами) обогащены руды месторождений, связанных с островодужным магматизмом [Seedorf et al., 2005], и одной из причин тому являются повышенные содержания рения в островодужных магмах с большой долей мантийной составляющей [Sun et al., 2003].

В связи с этим, медно-порфировые месторождения Урала представляют несомненный интерес. Подавляющее большинство из них приурочено к вулканогенным зонам, которые представляют собой разновозрастные вулканические дуги [Грабежев, Белгородский, 1992], и связано с кварцевыми диоритами известково-щелочной серии островодужного типа. Sm-Nd изотопные характеристики также указывают на заметную долю мантийного вещества [Грабежев, 2009]. В данной работе мы подробно рассмотрим два наиболее крупных объекта Южного Урала: обрабатываемое Михеевское месторождение и Томинское рудное поле с Томинским и Калиновским месторождениями, отработка которых планируется в ближайшее время.

Краткая геологическая характеристика месторождений. Михеевское месторождение (Новониколаевский рудный узел) расположено примерно в 200 км к югу от Биргильдинско-Томинского узла, в Варненской вулканогенной зоне девон-позднекаменноугольного возраста, которая считается переходной между Восточно-Уральской и Зауральской мегазонами.

В геологическом строении территории Михеевского месторождения принимают участие вулканогенно-осадочные породы позднедевонско-раннекаменноугольного (D_3-C_1) и каменноугольного (C_{1-2}) возрастов. Первые представлены переслаивающимися песчаниками, туфопесчаниками, андезибазальтами и их туфами и туфобрекчиями при подчиненной роли алевролитов, углисто-кремнистых пород, базальтов и пр. Интрузии комагматичного Ульяновского комплекса (D_3-C_1) представлены штоками и дайками диоритовых порфиритов и андезитов, реже дацитами, риодацитами, плагиогранодиоритами и диабазами. Верхняя вулканогенная пачка сложена лавами и лавокластитами афировых базальтов с прослоями песчаников, силицитов и углисто-кремнистых пород. В ней часто встречаются тела серпентинитов.

Промышленное оруденение приурочено к поясу даек кварцевых диоритов и их порфировых разностей общей площадью примерно 0.5×3 км, который протягивается субмеридионально между двумя крупными (~1 км в диаметре) штоками диоритов. Предполагается, что на глубине дайки и штоки соединяются в единый материнский плутон [Шаргородский и др., 2005]. По данным [<http://www.allmetals.ru/index.php?id=2091>],

запасы Михеевского месторождения по кодексу JORC оценены в 1.42 млн т меди (373.5 млн т руды, при 0.38 % Cu).

Томинское рудное поле (Биргильдинско-Томинский рудный узел) расположено в северной части Кособродско-Брединской вулканогенной зоны. Последняя сложена вулканитами возрастом от ордовика до раннего карбона. Образование месторождений обычно связывают с позднедевонско-раннекаменноугольным островодужным магматизмом, хотя многие полагают, что они связаны с силурийским магматизмом в островной дуге, которая является южным продолжением Тагильской островной дуги. Образование этой островной дуги связывают с субдукцией Палеоуральского океана на запад под Уральский микроконтинент [Пучков, 2010 и др.].

Рудное поле включает Калиновское и Томинское месторождения, которые приурочены к изометричным штокам, сложенным диоритами, кварцевыми диоритами и их порфировыми разностями Биргильдинско-Томинского комплекса (D₃-C₁). Оба штока имеют сложную форму (при общих размерах около 2 км) с многочисленными апофизами и реликтами вмещающих пород. Последние представлены ордовикскими бимодальными вулканитами саргазинской толщи. В районе месторождений это афировые базальты, их туфы, кластолавы, ксенотуфы с прослоями риодацитов. Ресурсы Томинского месторождения составляют 331.1 млн т руды со средним содержанием Cu 0.46 % [<http://rmk-group.ru/ru/enterprises/tominskiy>].

Методика исследования. Содержания Re в рудах были определены кинетическим методом в лаборатории Уральского геологического управления и в ИМГРЭ, г. Москва (аналитик Е. В. Поплавко). Предел обнаружения Re составлял 0.01 г/т ± 15 отн. %. Анализ содержаний Re в индивидуальных выделениях молибденита проводился на микрозонде Cameca SX-100 в ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, аналитики В. Г. Гмыра и В. В. Хиллер) и в Музее Естественной истории (г. Лондон, Великобритания, аналитик Дж. Спратт). Сначала были получены карты распределения интенсивностей характеристического рентгеновского излучения для аналитических линий *ReLa*, *ReMa*, *MoLa*, *SKa*, *CaKa*, *SiKa*, *FeKa*, *ZnKa*, затем выбирались участки для точечного анализа. Диаметр пучка составляет 1–2 мкм, ускоряющее напряжение 20–25 кэВ, ток 20–50 нА. Стандарты – металлические рений, молибден, сфалерит. Предел обнаружения Re (1σ) составлял 0.03 мас. %. Время экспозиции составляло 30 с для S, 60 с – для Mo и 240 с – для Re. Вводилась коррекция на перекрытие пиков Mo/S – 0.002 и S/Mo – 0.04 %.

Особенности распределения рения. Особенности распределения Re на порфировых месторождениях Урала описаны в работе [Грабежев, 2013], а более детально месторождения Михеевское и Томинское охарактеризованы в работах [Плотинская и др., 2015] и [Грабежев, Хиллер, 2015], соответственно. В рудах содержания Re обычно составляют 0.01–0.1 г/т, а его средние содержания в молибдените по разным оценкам – от первых сотен до первых тысяч г/т. Наиболее детально (40 проб) изучено распределение Re на Михеевском месторождении. Его содержания составляют от 0.01 до 2.72 г/т, хотя обычно не превышают 0.5 г/т. Выявлена высокая положительная корреляция между содержаниями Re и Mo ($r = 0.94$), которая объясняется тем, что Re входит в молибденит в качестве изоморфной примеси, и слабая положительная корреляция между Re и Cu ($r = 0.52$). Расчетные содержания Re в молибдените составляют от 231 до 3598 г/т. Близкие содержания установлены и на Томинском рудном поле (по четырем пробам Re в рудах 0.09–1.45 г/т, расчетные содержания Re в молибдените – 440–3140 г/т) [Грабежев, 2013].

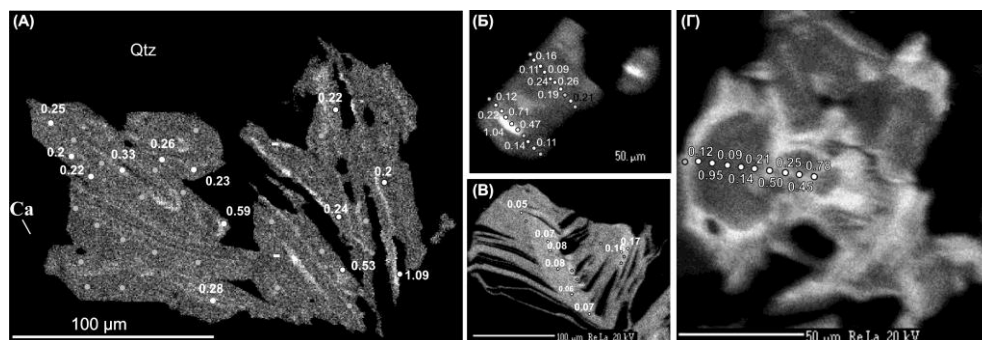


Рис. 1. Распределение рения в молибдените в характеристическом излучении *ReLa* Михеевского (а, б) и Калиновского (в, г) месторождений.

В пределах индивидуальных зерен молибденита Re всегда распределен неравномерно. В рудах Михеевского месторождения зерна молибденита характеризуются его равномерным и низким содержанием (не более 0.1 мас. %), обычно – ниже предела обнаружения (0.03–0.05 мас. %). В зернах наблюдается множество участков с повышенным содержанием Re, которое иногда достигает 1 мас. %. Встречается линейное, концентрически-зональное (рис. 1а) и точечное (рис. 1б) распределение. Часто наблюдается деформация таких зон с частичным перераспределением Re [Грабежев, 2013].

На Калиновском месторождении в наиболее крупных зернах молибденита центральные части сложены молибденитом-1 с содержаниями Re не более 0.15 мас. %, распределение которого в них почти равномерное и меняется очень плавно. Молибденит-1 обрастается каймами молибденита-2, в котором содержания Re достигают 1 мас. % и понижаются к краям зерен до 0.1 мас. % и ниже. Характерно, что при деформации чешуек молибденита с низким содержанием Re происходит его перераспределение и возникновение участков с содержаниями до 0.2 мас. % при фоновом содержании порядка 0.5 мас. % (рис. 1в, г).

Обсуждение результатов и выводы. Причины возникновения повышенных содержаний Re на Cu(Mo)-порфировых месторождениях мира обобщены в работе [Berzina et al., 2005]. Наиболее важным фактором считается влияние окислительно-восстановительного потенциала на растворимость Re во флюиде. В экспериментальных работах [Xiong et al., 2006] показано, что растворимость Re в окисленном флюиде выше, чем в восстановленном, т. е. для формирования обогащенного рением месторождения на ранних стадиях должны господствовать окислительные условия, благоприятные для его привноса, а затем – восстановительные, которые вызовут его осаждение.

Ранее было показано, что заметные примеси Re характерны для 3R политипа молибденита, тогда как структура наиболее широко распространенного 2H политипа молибденита неблагоприятна для вхождения в нее Re [Newberry, 1979 и др.]. Поэтому часто рениеносность молибденита объясняют включением политипов 3R. Однако экспериментальные исследования системы Re–Mo–S [Drabek et al., 2010] показали, что вхождение значительных количеств Re (до 2.2 мас. % при 400 °C) возможно и в 2H-молибденит. Кроме того, на месторождениях Пагони Рачи, Греция (до 4.7 мас. % Re в молибдените) и Хилтоп, США (более 1000 г/т Re в молибдените по данным

LA-ICP-MS) присутствие 3R-политипа вообще не установлено [Voudoris et al., 2009; Ciobanu et al., 2013]. Поэтому нередко повышенные концентрации рения объясняются наличием дефектов в кристаллической решетке 2H-молибденита. Дефекты в структуре ренийсодержащего молибденита описаны и в работах [Ciobanu et al., 2013; Куликова, Максимюк, 2013]. При этом Re может входить в молибденит не только как изоморфная, но и как механическая примесь в виде включений рениита. Например, микронные вроски рениита в молибдените установлены на месторождении Пагони Рачи [Voudoris et al., 2009]. Нельзя исключать и возможность присутствия в молибдените наноразмерных включений рениита, не различимых под электронным микроскопом.

Таким образом, содержания Re в рудах медно-порфировых месторождений Южного Урала обычно не превышают 0.5 г/т и коррелируют с повышенными содержаниями Mo и, в меньшей степени, Cu. Рений распределен неравномерно как в рудах, так и в отдельных чешуйках молибденита. Причины такого распределения, как и форма нахождения рения, являются предметом дальнейших исследований.

Исследования выполнены при частичной поддержке РФФИ (проекты №№ 13-05-00622а и 14-05-00725а), программы Президиума РАН № 5 и Музея Естественной Истории (программа CERCAMS).

Литература

Грабежев А. И. Sr-Nd-C-O-H-S изотопно-геохимическая характеристика медно-порфировых флюидно-магматических систем Южного Урала: вероятные источники вещества // Литосфера. 2009. № 6. С. 66–89.

Грабежев А. И. Рений в медно-порфировых месторождениях Урала // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 1. С. 16–32.

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

Грабежев А. И., Хиллер В. В. Рений в молибдените Томинского медно-порфирового месторождения (Южный Урал, Россия): результаты микрозондового изучения // Записки РМО. 2015. Ч. CXLIV. № 1. С. 81–93.

Куликова И. М., Максимюк И. Е. Морфологические исследования формы вхождения примесных атомов в кристаллическую структуру молибденита // Новые данные о минералах. 2013. № 48. С. 71–81.

Плотинская О. Ю., Грабежев А. И., Зелтманн Р. Рений в рудах Михеевского Мо-Cu-порфирового месторождения, Южный Урал // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 2.

Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2010. 280 с.

Шаргородский Б. М., Новиков И. М., Аксенов С. А. Михеевское месторождение медно-порфировых руд на Южном Урале // Отечественная геология. 2005. № 2. С. 57–61.

Berzina A. N., Sotnikov V. I., Ekonomou-Eliopoulos M. et al. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia // Ore Geology Reviews. 2005. Vol. 26. P. 91–113.

Ciobanu C. L., Cook N. J., Kelson C. R. et al. Trace element heterogeneity in molybdenite fingerprints stages of mineralization // Chemical Geology. 2013. Vol. 347. P. 175–189.

Drabek M., Rieder M., Bohmova V. The Re-Mo-S system: new data on phase relations between 400 and 1200°C // European Journal of Mineralogy. 2010. Vol. 22. P. 479–484.

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

Seedorff E., Dilles J. H., Proffett J. M. Jr. et al. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features // Economic Geology. 2005. Vol. 100. P. 251–298.

Sillitoe R. H. Porphyry copper systems // Economic Geology. 2010. Vol. 105. P. 3–41.

Sun W., Bennet V. C., Eggins S. M. et al. Enhanced mantle-to-crust rhenium transfer in undegassed arc magmas // *Nature*. 2003. Vol. 422. P. 294–297.

Voudouris P. C., Melfos V., Spry P. G. et al. Rhenium-rich molybdenite and rheniite in the Pagoni Rachi Mo-Cu-Te-Ag-Au prospect, Northern Greece: Implication for the Re geochemistry of porphyry-style Cu-Mo and Mo mineralization // *Canadian Mineralogist*. 2009. Vol. 47. P. 1013–1036.

Xiong Y. Wood S., Kruszewski J. Hydrothermal transport and deposition of rhenium under subcritical conditions revisited // *Economic Geology*. 2006. Vol. 101. P. 471–478.