

Сначев А. В., Пужаков Б. А., Сначев В. И., Рыкус М. В. Перспективы углеродистых отложений центральной части Зауральского поднятия на благородные и редкие металлы // Нефтегазовое дело. 2015. № 2. С. 123–142.

Сначев В. И., Сначев А. В. Закономерности размещения золоторудных проявлений в углеродистых отложениях Белорецкого метаморфического комплекса (Южный Урал) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2014. № 2. С. 79–87.

Ферштатер Г. Б., Краснобаев А. А., Беа Ф., Монтеро П., Бородина Н. С. Интрузивный магматизм ранних стадий развития Уральского эпикоеанического орогена: U-Pb-геохронология (LA ICPMS, NORDSIM, SHRIMP-II), геохимия, закономерности эволюции // Геохимия. 2009. № 2. С. 150–170.

**И. Р. Рахимов<sup>1</sup>, А. В. Вишневский<sup>2,3</sup>, Д. Е. Савельев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> – Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа  
rigel92@mail.ru

<sup>2</sup> – Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск

<sup>3</sup> – Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

### **Роль гидротермально-метасоматических изменений в формировании полигенной сульфидной и благороднометалльной минерализации габброидов худолазовского комплекса, Южный Урал**

Худолазовский дифференцированный комплекс развит в одноименной мульде и частично за ее пределами в Западно-Магнитогорской зоне. С ним связано сульфидное Cu-Ni оруденение, локализованное в высокомагнезиальных породах – шригеймитах и оливин-роговообманковых габбро, а также благороднометалльная минерализация, представленная сперрилитом, фрудитом, майчнеритом, самородным золотом, гесситом [Rakhimov et al., 2018]. Актуальность настоящих исследований связана, во-первых, с дискуссионным взглядом на происхождение сульфидного оруденения худолазовского комплекса, и, во-вторых, с неизученным генезисом благороднометалльной минерализации и вмещающих пород. Исследования включали оптическую микроскопию (Carl Zeiss Axioskop 40), электронно-микроскопический анализ (СЭМ Tescan Mira 3, Tescan Vega 3), рентгеноспектральный микроанализ (микророзонды JEOL JXA-8230, JEOL JXA-8100) и рентгенофлуоресцентный анализ (прибор VRA-30). Были исследованы образцы керна и обнаженных участков трех массивов: Ташлы-Тау, Малютка и Северный Бускун-II. Целью работы было изучение распределения минералов Ni, Cu и элементов платиновой группы (ЭПГ) в глубинных и приповерхностных частях интрузивов, а также во вмещающих породах.

Установлено, что большая часть пород этих массивов претерпела постмагматическое изменение, связанное с существованием локальных долгоживущих гидротермальных систем. Свидетельством продолжительного гидротермального воздействия служит метасоматическая переработка с сульфидизацией некоторых дайковых тел улугуртауского комплекса, прорывающих рудоносные массивы худолазовского комплекса. Абсолютный возраст пород улугуртауского комплекса –  $321 \pm 15$  млн лет (Sm-Nd изохрона [Rakhimov et al., 2014]), худолазовского комплекса –  $328.9 \pm 0.78$ – $324.78 \pm 0.46$  млн лет (U-Pb конкордии циркона и бадделеита [Салихов и др., 2012]).

В зоне гидротермального воздействия оказались вмещающие породы массивов, в которых обнаружены кварц-кальцитовые жилы с сульфидами и сульфоарсенидами. Во всех случаях источником халькофильных и сидерофильных элементов, на наш взгляд, служили сульфидоносные породы худолазовского комплекса. В результате изучения морфологии и химического состава минералов установлен полигенный характер формирования сульфидных скоплений и выделено семь типов ассоциаций сульфидов.

Геологоразведочными работами [Бучковский и др., 1971ф] установлено, что в указанных массивах сплошные руды залегают в придонных высокооливиновых частях, образуя типичные формы «сульфидного дождя» расслоенных тел, представленного редкими магматическими скоплениями (моносльфидный и промежуточный твердые растворы, МТР и ПТР) пирротина–пентландита–халькопирита (Po–Pn–Csp) (тип 1а). Чаще встречается ассоциация Po–Pn–Csp + Mgt (магнетит) ± Py (пирит) типа 1б, возникающая за счет незначительного позднемагматического преобразования типа 1а. Срастания сульфидов размером до нескольких сантиметров в типах 1а и 1б часто имеют округлую форму (результат коалесценции отдельных мелких капель), границы с силикатной матрицей нередко ровные и четкие (с роговой обманкой). В верхних зонах этих массивов сульфидные вкрапления (тип 1б) имеют амебовидные формы (размерами не более нескольких миллиметров), изредка формируя прожилки. В пирротине отмечаются многочисленные ламеллы пентландита – продукты распада МТР. В халькопирите нередко встречаются включения сфалерита.

Измененные породы, для которых гидротермально-метасоматическое преобразование не столь существенно, содержат ассоциацию Py–Po–Csp–Pn–Vl (виоларит) + Mgt типа 2а. Пирит и виоларит являются продуктами замещения пирротина и пентландита, соответственно. Пирит наследует примесь Ni из пирротина, но почти не удерживает Co, а виоларит полностью сохраняет Co, содержащийся в пентландите. Замещение пирротина пирритом начинается по параллельным трещинкам отдельно-сти, виоларит замещает пентландит в виде петелек и каемок. Существенно гидротермально-переработанные габброиды содержат сульфидную ассоциацию Py±Po–Csp–Pn–Vl + Mgt типа 2б (пирротин иногда полностью замещен пирритом). Сульфиды присутствуют в виде амебовидных, вытянутых или тонкодисперсных агрегатов, ассоциируя с хлоритом, актинолитом, эпидотом, альбитом и кварцем. Встречаются своеобразные микротекстуры «меланжа», в которых фрагменты пирротина окружены жилковидным магнетитом. Пиррит присутствует как в виде прожилков совместно с кварцем и кальцитом, в сульфидных агрегатах, так и в виде колломорфных зерен. В таких породах сульфиды часто заполняют структуры распада титаномагнетита, замещая титанит и облекая ламеллы ильменита.

В некоторых интенсивно метасоматизированных породах (вплоть до сплошных метасоматитов, где первичные силикаты полностью замещены), сульфидная ассоциация представлена Po-2–Csp-2 (тип 3). В пирротине и халькопирите новой генерации (переотложенные?), в отличие от первичных, ничтожны примеси Ni. Формы выделения – жилы и текстурно-ориентированные вкрапления в силикатной матрице, сложенной хлоритом, калишпатом, альбитом, кальцитом, эпидотом, кварцем.

Во вмещающих породах и дайках, пересекающих вышеуказанные массивы, отмечаются два типа сульфидных ассоциаций: Py–Csp (тип 4а) и Csp–Apy\* (тип 4б).

\* – неидентифицированный Co-Ni-Fe сульфоарсенид с примесью Rh и Pd, потенциальная разновидность арсениопирита (Co, Ni, Fe)AsS [Smith, Nickel, 2007].

Предполагается, что это наиболее низкотемпературные ассоциации сульфидов, в которых отсутствуют пирротин и пентландит. В типе 4а пирит обычно образует идиоморфные кубические и октаэдрические кристаллы, а халькопирит – вытянутые зерна, часто в сростании с пиритом. Сульфиды типа 4б ассоциируют с кварц-кальцитовыми жилами в экзокотактовых зонах.

Ряд массивов худолазовского комплекса, не претерпевших гидротермально-метасоматические изменения, несмотря на их насыщенность гидроксилсодержащими минералами (роговая обманка – до 40 %, биотит – до 5 %), отличается практически полным отсутствием сульфидной минерализации. Примером служат массивы Лира (оливин-роговообманковые габбро), Бускун-II (габбро-троктолиты), Талкаский (габбродиориты) – авторами изучались их верхние 10–20 м. В них могут присутствовать лишь продукты «автономных» флюидонасыщенных порций остаточного расплава, кристаллизовавшиеся в виде округлых диорит-пегматитовых обособлений в габбро.

Проведенные исследования показали, что ЭПГ минерализация связана исключительно с сульфидными фазами в пределах интрузивных тел – пирротинном, халькопиритом и пентландитом. Основным минералом-хозяином платиноидов является халькопирит. Минералы Au, Ag, Bi, Te, Sb и As встречены как в сульфидах, так и в метасоматических силикатах. В частности, большое количество зерен гессита (Ag<sub>2</sub>Te) обнаружено в кварц-кальцитовой жиле во вмещающих интрузии метапесчаниках. Также стоит отметить, что в Co-Ni-Fe-S-As минерале из вмещающих метапесчаников обнаружены изоморфные примеси Rh (до 0.17 %) и Pd (до 0.1 %). Этот факт не согласуется с тем, что Pd и Rh демонстрируют противоположное поведение в гидротермальных процессах: Rh отличается стабильностью, оставаясь *in situ* во вторичных сульфидных фазах, а Pd часто переходит вместе с Cu, Fe, S и Ni во флюид [Holwell et al., 2017].

Сульфиды и вторичные силикаты содержат многочисленные включения минералов Bi (цумоит, пильзенит, фрудит, майчнерит). В экзокотактовых сульфидизированных метапесчаниках Bi-содержащие минералы не обнаружены, поэтому вопрос об источнике Bi остается неясным. Во всех сульфидных фазах присутствует примесь Se (до 600 мкг/г в главных сульфидах, до 1.6 % в галените), но минералы Se не найдены. В пирротине массива Северный Бускун-II с увеличением степени метасоматической переработки пород снижается среднее S/Se отношение (в 2–3 раза), что характерно для гидротермально измененных Cu-Ni-PGE руд [Smith et al., 2016].

Миллерит, характерный для многих Cu-Ni сульфидных руд и замещающий пентландит при низкотемпературных процессах [Holwell et al., 2017], в образцах худолазовского комплекса не обнаружен, что свидетельствует о температуре гидротермальной системы, явно превышающей 200 °C [Nozaki et al., 2007]. Дополнительным для оценки температуры гидротермального режима является тот факт, что растворимость пентландита при температурах <250 °C увеличивается в условиях повышенной хлористости флюида и высокой фугитивности кислорода [Liu et al., 2012]. В нашем случае пентландит как в слабо, так и в сильно измененных породах обычно присутствует в сопоставимых количествах по отношению к остальным сульфидам в разных типах скоплений, при этом апатит этих пород характеризуется повышенными концентрациями Cl (до 1.7 %) [Холоднов и др., 2015; неопубликованные данные авторов]. Необходимо отметить, что мезотермальные гидротермы (до 300 °C), харак-

теризующиеся повышенной хлористостью и сильно окислительными условиями флюида, вызывают значительную мобилизацию Pt и Pd [Mountain, Wood, 1988].

Таким образом, из вышесказанного следует, что сульфидная минерализация габброидов из массивов Ташлы-Тау, Малютка и Северный Бускун-II имеет полигенный характер, связанный с различной степенью преобразования гидротермально-метасоматическими процессами. Минералы ЭПГ присутствуют в различных генетических типах сульфидных скоплений, локализуясь при этом исключительно внутри сульфидных фаз. Минералы Ag и Au присутствуют как в сульфидах внутри интрузии, так и во вмещающих породах, встречаясь и среди вторичной силикатной матрицы.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-35-00391).*

### Литература

*Бучковский Э. С., Перминов Г. М., Калташов А. П., Караваев И. Н.* Оценка никеленосности основных интрузий Худолазовского комплекса // Отчет о результатах работ, проведенных Худолазовской геолого-поисковой партией в северной части Баймакского и южной части Абзелиловского районов БАССР. Т. 1. Уфа: ГосГеолФонд, 1971ф. 163 с.

*Салихов Д. Н., Беликова Г. И., Пучков В. Н., Эрнст Р., Седерлунд У., Камо С., Рахимов И. Р., Холоднов В. В.* Никеленосный интрузивный комплекс на Южном Урале // Литосфера. 2012. № 6. С. 66–72.

*Холоднов В. В., Салихов Д. Н., Шагалов Е. С., Коновалова Е. В., Рахимов И. Р.* Роль галогенов и серы в апатитах при оценке потенциальной рудоносности позднепалеозойских габброидов Западно-Магнитогорской зоны (Ю. Урал) на Cu-Ni, Fe-Ti и Au оруденение // Минералогия. 2015. № 3. С. 45–61.

*Holwell D. A., Zeinab A., Warda L. A., Smith D. J., Graham S. D., McDonald I., Smith J. W.* Low temperature alteration of magmatic Ni-Cu-PGE sulfides as a source for hydrothermal Ni and PGE ores: A quantitative approach using automated mineralogy // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 91. P. 718–740.

*Liu W., Migdisov A., Williams-Jones A.* The stability of aqueous nickel (II) chloride complexes in hydrothermal solutions: results of UV-visible spectroscopic experiments // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2012. No. 94. P. 276–290.

*Mountain B. W., Wood S. A.* Chemical controls on the solubility, transport, and deposition of platinum and palladium in hydrothermal solutions: a thermodynamic approach // Economic Geology. 1988. No. 83. P. 492–510.

*Nozaki H., Onoda M., Kosuda K.* Crystal structures and galvanomagnetic properties of epitaxial films in a Ni-S system // Progress in solid state chemistry research (ed.) R. W. Buckley. Nova Science Publishers, Inc. 2007. P. 239–284.

*Rakhimov I. R., Saveliev D. E., Puchkov V. N., Salikhov D. N., Vishnevskiy A. V., Vladimirov A. G.* First finds of platinum and palladium minerals in sulfide ores of the Khudolaz intrusive complex (Southern Urals) // Doklady Earth Sciences. 2018. Vol. 479. P. 2. P. 439–442.

*Rakhimov I. R., Salikhov D. N., Puchkov V. N., Ronkin Yu. L., Kholodnov V. V.* Bashkirian Sr-Nd Age of the terminal stage of collisional magmatism in the Western Magnitogorsk Zone of the South Urals // Doklady Earth Science. 2014. Vol. 457. P. 2. P. 921–925.

*Smith D.G.W., Nickel E.H.* A system of codification for unnamed minerals: report of the subcommittee for unnamed minerals of the IMA commission on new minerals, nomenclature and classification // Canadian Mineralogist. 2007. Vol. 45. P. 983–1055.

*Smith J. W., Holwell D. A., McDonald I., Boyce A. J.* The application of S isotopes and S/Se ratios in determining ore-forming processes of magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposits: a cautionary case study from the northern Bushveld Complex // Ore Geology Reviews. 2016. No. 73. P. 148–174.