ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 498, № 1, с. 52–57

МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 549.31

ГЕНЕЗИС СУЛЬФИДНОЙ И ПЛАТИНОМЕТАЛЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ХУДОЛАЗОВСКОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2021 г. И. Р. Рахимов[1, *], член-корреспондент РАН В. Н. Пучков[2]

Поступило 02.06.2020 г.
После доработки 23.06.2020 г.
Принято к публикации 01.02.2021 г.

Проведены минералого-геохимические исследования сульфидно-платинометалльных ассоциаций худолазовского комплекса, позволившие впервые обосновать их полигенную природу. Выделены 3 типа сульфидных ассоциаций, формирование которых связано с сегрегацией и фракционированием сульфидного расплава, дальнейшим замещением первичных сульфидов на ранней гидротермальной стадии и частичным переотложением сульфидов на поздней гидротермальной стадии. При помощи ЛА–ИСП–МС-анализа показано, что в процессе преобразования первичных сульфидов происходит вынос элементов платиновой группы (ЭПГ) с частичным концентрированием их в новообразованных сульфидах. Методом сканирующей электронной микроскопии изучена структурная позиция зерен платинометалльных минералов (МПГ). Кристаллизация МПГ происходила в 3 стадии: 1) из остаточных высокофракционированных сульфидных расплавов, либо самостоятельных металлоидных расплавов, захваченных сульфидами; 2) за счет сегрегации изоморфных примесей ЭПГ и халькофильных элементов при распаде твердых сульфидных растворов; 3) при взаимодействии изменяющихся сульфидов с обогащенными сурьмой флюидами.

Ключевые слова: генезис, сульфиды, минералы элементов платиновой группы, тип ассоциации

DOI: 10.31857/S2686739721050133

Худолазовский ультрабазит-базитовый комплекс (U–Pb-возраст 325–329 млн лет), объединяющий множество рудоносных интрузий, развит в центральной части Южного Урала. Он специализирован на сульфидное Cu–Ni-оруденение [1], природа которого долгое время являлась предметом дискуссий [2]. Породы, слагающие рудоносные массивы комплекса (роговообманковые плагиоперидотиты, оливиновые и безоливиновые роговообманковые габбро), испытали неравномерное гидротермально-метасоматическое преобразование, выраженное в замещении первичных породообразующих минералов (оливина, роговой обманки, плагиоклаза, пироксена) низкотемпературными постмагматическими (серпентином, хлоритом, альбитом, глинистыми минералами). При этом влияние гидротермально-метасоматических процессов на сульфидные руды не изучалось. В сульфидных рудах худолазовского комплекса нами впервые были обнаружены минералы палладия и платины [3]. В соответствии с этим вопросы генезиса сульфидной и платинометалльной минерализации являются весьма актуальными.

В сообщении приводятся результаты исследований сульфидной и платинометалльной минерализации пород рудоносных массивов худолазовского комплекса (Западный Карасаз, Кусеево-2, Кусеево-3, Малютка, Северный Бускун, Ташлы-Тау) и предлагается обобщенная модель ее формирования.

Морфология и состав сульфидов и минералов платинометалльной группы (МПГ) изучалась на оптическом микроскопе Axioskop 40 A (ИГ УФИЦ РАН, Уфа) и сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3 (МИИ СО РАН, Новосибирск, аналитик М.В. Хлестов). Макро- и микроэлементный состав сульфидных минералов определялся также с помощью электронно-зондового микроанализа (МИИ СО РАН, Новосибирск, аналитик Е.Н. Нигматулина) и лазерной абляции с масс-спектрометрией и индуктивно-связанной плазмой (ЛА–ИСП–МС) (масс-спектрометр Agilent 7700x с приставкой для лазерной абляции New Wave Research UP-213, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитик Д.А. Артемьев). Температуры формирования сульфидов оценива-

[1] *Институт геологии Уфимского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия*

[2] *Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия*

**E-mail: rigel92@mail.ru*

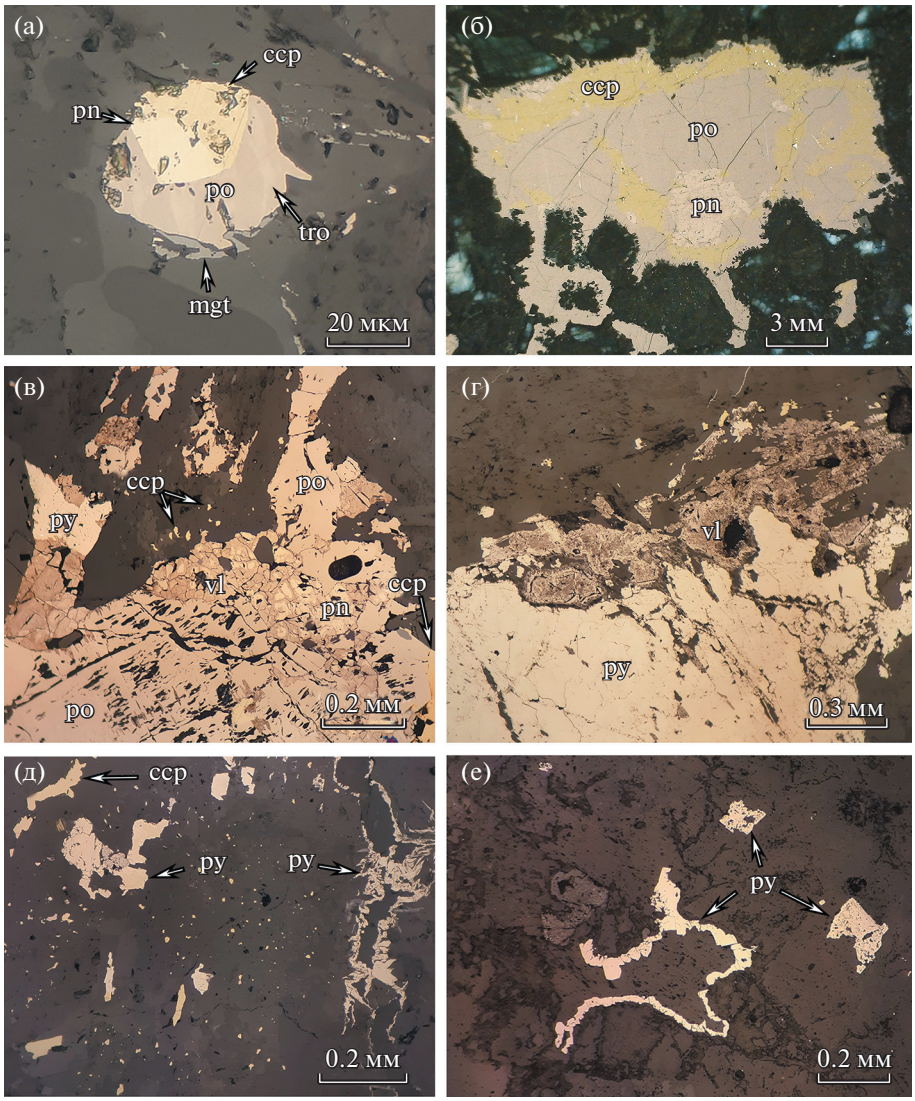

Рис. 1. Типы сульфидных ассоциаций худолазовского комплекса (отраженный свет): (а) и (б) пентландит-халькопирит-пирротиновые выделения – 1-й тип; (в) виоларит-пиритовый агрегат с остаточными халькопиритом, пентландитом, пирротином и (г) виоларит-пиритовая псевдоморфоза – 2-й тип; (д) совместные халькопирит-пиритовые и (е) самостоятельные пиритовые агрегаты – 3-й тип. Примечание: ccp – халькопирит, mgt – магнетит, pn – пентландит, po – пирротин, py – пирит, tro – троилит, vl – виоларит.

лись по данным экспериментальных работ, а также на основе срастаний минералов по эмпирическим оливин-шпинелевому, плагиоклаз-амфиболовому, магнетит-ильменитовому и хлоритовому геотермометрам.

По результатам детальных исследований морфологии и минерального состава сульфидных агрегатов были выделены 3 типа ассоциаций: 1) первичные пентландит-халькопирит-пирротиновые срастания, 2) вторичные халькопирит-виоларит-пиритовые псевдоморфозы с остаточными пентландитом и пирротином, 3) новообразованные халькопирит-пиритовые выделения.

Сульфидные агрегаты *первого типа* ассоциаций представлены интерстициальными вкраплениями, а также глобулярными или эллипсоидальными сростками (рис. 1а, 1б). Они кристаллизовались непосредственно из сульфидного расплава, выделившегося на раннемагматической стадии.

Второй тип ассоциаций сложен продуктами частичного или полного замещения сульфидов первой ассоциации вторичными сульфидными и силикатными минералами на ранней гидротермальной стадии (рис. 1в, 1г). Пирротин замещался пиритом, пентландит – виоларитом, халькопирит – в основном силикатами (хлоритом, амфиболом и др.). При этом происходило уменьшение исходных размеров сульфидных агрегатов. Реликтовый пирротин в этой ассоциации

Таблица 1. Средние концентрации сидерофильных и халькофильных элементов (г/т) в сульфидах из разных типов ассоциаций

	Сульфид (тип ассоциации)									
	po (1) $n = 29$	po (2) $n = 29$	py (2) $n = 10$	py (3) $n = 7$	ccp (1) $n = 26$	ccp (2) $n = 30$	ccp (3) $n = 3$	pn (1) $n = 19$	pn (2) $n = 14$	vl (2) $n = 11$
Co	138	306	330	10	1.2	1.5	3	14900	20200	24470
Ni*	7200	10600	9300	334	55	87	53	323400	325850	289520
Zn	7	12	6	10	499	500	395	4	50	58
As	15	36	14	15	64	40	18	123	72	69
Ru	0.03	<	<	<	<	<	<	0.05	<	<
Rh	0.01	<	<	<	0.02	<	<	0.05	0.03	0.02
Pd	0.01	<	<	<	0.03	<	<	4	1	0.5
Sb	0.03	0.09	0.03	0.2	0.05	0.3	0.5	0.07	0.08	0.8
Te	9	2	0.1	0.7	19	5	1.7	7	4	1.7
Os	0.04	<	<	<	0.02	<	<	0.03	<	<
Ir	0.03	<	<	<	0.03	0.02	<	0.02	<	0.03
Pt	0.01	<	<	0.06	0.05	0.02	0.08	0.1	0.03	0.03
Bi	0.6	1.7	0.3	<	0.5	0.8	1.2	0.4	6	9

Примечание: *содержания Ni в пентландите и виоларите определены микрозондом, остальные элементы ЛА–ИСП–МС; сокращения минералов см. в подписи к рис. 1; *n* – количество определений; < ниже предела обнаружения.

часто обладает пластинчатой структурой, а пентландит характеризуется трещиноватостью.

Третий тип ассоциаций представлен прожилковидными и тонкодисперсными выделениями пирита и халькопирита (рис. 1д, 1е), формировавшихся за счет переотложения растворенного рудного вещества из первичных сульфидов. Кристаллизация этих агрегатов, судя по ассоциации с глинистыми минералами, происходила на поздней гидротермальной стадии.

Минералы платинометалльной группы в сульфидах 1-го типа ассоциаций представлены майчнеритом (PdBiTe), фрудитом ($PdBi_2$), сперрилитом ($PtAs_2$), мончеитом ($Pt(Te,Bi)_2$). Они приурочены к границам сульфидных минералов, либо располагаются в однородной матрице без видимых нарушений зерен сульфидов (рис. 2а, 2б). Также встречаются кристаллы МПГ, приуроченные к ламелям распада твердых сульфидных растворов или к трещинам в сульфидах, по которым развивается магнетит (рис. 2в, 2г). В сульфидах 2-го типа ассоциаций были найдены лишь сурьмянистые минералы палладия: Sb-майчнерит (Pd(Bi,Sb)Te), садбериит (PdSb) и боровскит (Pd_3SbTe_4) (рис. 2д). Иногда зерна МПГ обнаруживаются во вторичной силикатной матрице, заместившей сульфиды (рис. 2е).

Результаты изучения микроэлементного состава показали, что одни и те же сульфидные минералы, находящиеся в разных типах ассоциаций, существенно различаются по уровню концентраций халькофильных и сидерофильных элементов (табл. 1).

В пирротине из 1-го типа ассоциаций концентрации элементов платиновой группы (ЭПГ) находятся на уровне сотых долей г/т. Пирротин из 2-го типа ассоциаций отличается повышенным содержанием Ni, Co, Sb, а также более низкими концентрациями ЭПГ (ниже предела обнаружения). Пирит, псевдоморфно замещающий пирротин, также характеризуется высокой примесью Ni и Co, что четко отличает его от переотложенного пирита.

В халькопирите из 1-го типа ассоциаций ЭПГ также определены на уровне сотых долей г/т, а в халькопирите из ассоциаций 2-го и 3-го типов концентрации ЭПГ снижаются (кроме Pt). При этом наблюдается постепенное увеличение содержаний Sb.

Пентландит из 1-го типа ассоциаций характеризуется наибольшими средними концентрациями ЭПГ, в особенности – Rh, Pt и Pd. В пентландите 2-го типа ассоциаций и замещающем его виоларите концентрации ЭПГ постепенно снижаются, но повышаются содержания Bi и Sb.

Результаты экспериментальных работ [4] свидетельствуют о том, что ЭПГ и халькофильные элементы (As, Te, Sb, Bi), являющиеся минералообразующими для МПГ, высоко совместимы с несмесимым сульфидным расплавом. После выделения сульфидных твердых растворов (mss и iss в диапазоне температур 900–650°C), из которых образуются пирротин, пентландит и халькопи-

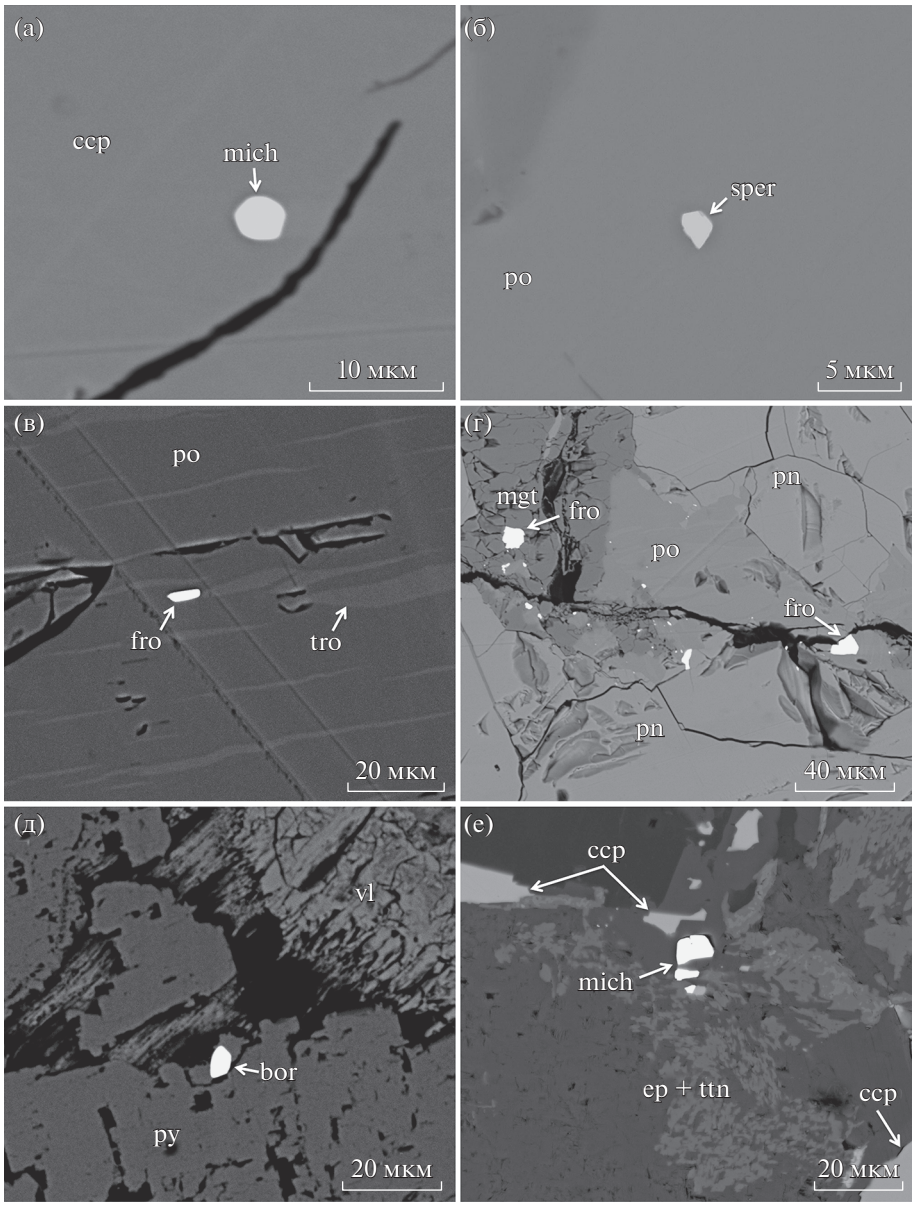

Рис. 2. Зерна МПГ в сульфидах худолазовского комплекса и продуктах их замещения (BSE-изображения): а) майчнерит в халькопирите, б) сперрилит в пирротине, в) фрудит в ламели троилита, г) вкрапленность фрудита в пирротине и магнетите вдоль трещины, д) боровскит в пирите, е) Sb-майчнерит в силикатной матрице. Примечание: bor – боровскит, ep – эпидот, mich – майчнерит, sper – сперрилит, ttn – титанит, fro – фрудит, остальные обозначения см. в подписи к рис. 1.

рит, остаточная сульфидная жидкость обогащается халькофильными элементами и ЭПГ (Pd, Pt) [5, 6]. ЭПГ и халькофильные элементы могут входить в структуру сульфидов в качестве изоморфной примеси [7], либо концентрироваться в несмесимых металлоидных расплавах [8]. При низких содержаниях ЭПГ в сульфиде кристаллизация МПГ происходит при температурах около 650°C и ниже [6].

Количественные данные о распределении ЭПГ и халькофильных элементов между сульфидами и гидротермальными флюидами пока отсутствуют. Однако в последнее десятилетие в мировой литературе отмечается важнейшая роль гидротермально-метасоматических процессов в формировании в том числе промышленно значимых сульфидно-платинометалльных руд [9–11].

Сульфиды рудоносных пород худолазовского комплекса содержат низкие концентрации ЭПГ и халькофильных элементов (в 2–10 раз ниже, чем, например, в сульфидах Бушвельда или Цзиньчуаня [12, 13]), тем не менее, этого оказалось доста-

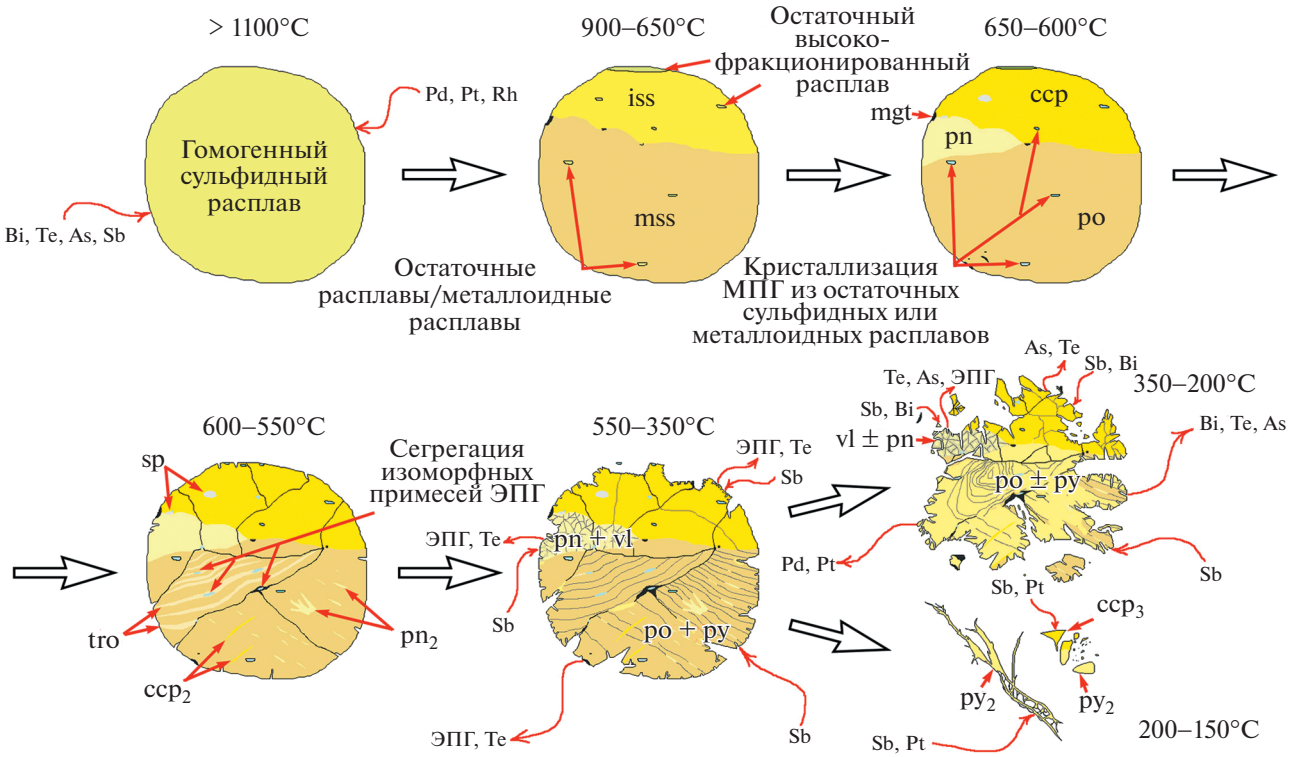

Рис. 3. Модель эволюции сульфидного расплава и распределения ЭПГ при магматических и постмагматических процессах. Примечание: ccp_2 и pn_2 – ламели халькопирита и пентландита, py_2 и ccp_3 – переотложенные пирит и халькопирит, sp – сфалерит.

точно для кристаллизации МПГ. В соответствии с вышеизложенным материалом для характеристики генезиса сульфидной и платинометалльной минерализации худолазовского комплекса была построена схематическая модель, описывающая ее полигенную природу (рис. 3). Сульфидно-силикатная ликвация произошла на раннемагматической стадии, о чем свидетельствуют включения сульфидных глобул в оливине и алюмошпинели. В дальнейшем при остывании сульфидного расплава из него постепенно выделялись mss, iss, которые впоследствии распадались на пирротин, пентландит, халькопирит. При температуре около 650–600°C из остаточных сульфидных расплавов или несмесимых металлоидных расплавов, захваченных сульфидными минералами, происходила кристаллизация ранних зерен МПГ (сперрилита, мончеита, майчнерита). При дальнейшем охлаждении (~600–550°C) происходил распад сульфидных твердых растворов, в результате чего за счет сегрегации изоморфных примесей ЭПГ и халькофильных элементов вновь стала возможной кристаллизация МПГ (фрудита). На гидротермальной стадии за счет привноса Sb из флюидов и выноса Pd из растворяющихся первичных сульфидов происходила кристаллизация сурьмянистых минералов палладия. Привнос Sb, вероятно, осуществлялся из вмещающих пород, в 10 раз более обогащенных сурьмой в сравнении с породами худолазовского комплекса (0.55 против 0.06 г/т). В целом гидротермальные процессы привели к истощению первичных сульфидов в отношении ЭПГ и некоторых халькофильных элементов (As, Te), которые либо повторно концентрировались в переотложенных сульфидах, либо рассеивались в силикатной матрице.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.В. Вишневского и Д.Е. Савельева за помощь в проведении анализов, а также двух анонимных рецензентов за полезные критические замечания, способствовавшие улучшению качества рукописи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках Госзадания № 0246-2019-0080 при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-35-00391 и госбюджетной темы АААА-А18-118052590032-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Салихов Д.Н., Беликова Г.И., Пучков В.Н. и др.* // Литосфера. 2012. № 6. С. 66–72.

2. *Салихов Д.Н., Пшеничный Г.Н.* Магматизм и оруденение зоны ранней консолидации Магнитогорской эвгеосинклинали. Уфа: БФАН СССР, 1984. 112 с.
3. *Рахимов И.Р., Вишневский А.В., Владимиров А.Г. и др.* // ДАН. 2018. Т. 479. № 5. С. 542–545.
4. *Helmy H.M., Ballhaus C., Wohlgemuth-Üeberwasser C., et al.* // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2010. V. 74. P. 6174–6179.
5. *Naldrett A.J.* // South African Journal of Geology. 2010. V. 113.1. P. 1–32.
6. *Liu Y., Brenan J.* // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2015. V. 159. P. 139–161.
7. *Ballhaus C., Ulmer P.* // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59. No. 23. P. 4881–4888.
8. *Cafagna F., Jugo P.J.* // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2016. V. 178. No. 1 P. 233–258.
9. *Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А. и др.* // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 5. С. 445–476.
10. *Duran C.J., 1 Barnes S.-J., Corkery J.T.* // Mineralium Deposita. 2016. V. 51. P. 509–532.
11. *Holwell D.A., Zeinab A., Warda L. A., et al.* // Ore Geology Reviews. 2017. V. 91. P. 718–740.
12. *Holwell D.A., Mcdonald I.* // Contrib. Min. and Petrol. 2007. V. 154. No. 2. P. 171–190.
13. *Su S., Li C., Zhou M.-F., et al.* // Mineralium Deposita. 2008. V. 43. P. 609–622.

THE GENESIS OF SULFIDE AND PLATINUM-METAL MINERALIZATION OF KHUDOLAZ COMPLEX (SOUTH URALS)

I. R. Rakhimov[a, #] and Corresponding Member of the RAS V. N. Puchkov[b]

[a] *Institute of geology, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation*
[b] *Zavaritskiy Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation*
[#] *E-mail: rigel92@mail.ru*

Mineralogical and geochemical studies of sulfide-platinum-metal assemblages of the Khudolaz complex were carried out, that made it possible for the first time to substantiate their polygenetic nature. Three styles of sulfide assemblages were identified, the formation of which are associated with the segregation and fractionation of a sulfide melt, further replacement of primary sulfides at the early hydrothermal stage, and partial reprecipitation of sulfides at the late hydrothermal stage. Using LA ICP MS analysis, it was shown that through primary sulfide alteration the platinum group elements (PGE) liberation have been occured with their partial embedding into newly formed sulfides. Using scanning electron microscope structural position of PGM grains was observed. PGMs were crystallizing during 3 steps: 1) from residual highly fractionated sulfide melts, or immiscible metalloid melts captured by sulfides; 2) during the exsolution of solid sulfide solutions due to the segregation of isomorphic impurities of PGE and chalcophile elements; 3) during the antimony-enriched fluids – alterating sulfides interaction.

Keywords: genesis, sulfides, platinum element group minerals, type of association