

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.3

ПЛАТИНО-ПАЛЛАДИЕВОЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЕ ВАСИЛИНОВСКОЕ:
НОВЫЙ ТИП БЛАГОРОДНОМЕТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА УРАЛЕ© 2023 г. И. В. Викентьев^{1,*}, Е. Э. Тюкова^{1,2}, В. Д. Мокрый¹, Ю. Н. Иванова¹, Д. А. Варламов³,
А. С. Шуйский⁴, Е. О. Грознова^{1,3}, И. Д. Соболев¹, академик РАН Н. С. Бортников¹

Поступило 17.05.2023 г.

После доработки 19.05.2023 г.

Принято к публикации 20.05.2023 г.

Впервые описывается новое благороднометальное (Pt–Au–Pd) рудопроявление Васи́линовское, обнаруженное вблизи пос. Харп Ямало-Ненецкого автономного округа. Оно связано с амфиболизированными габброидами и подчиненными пироксенитами кэршорского комплекса, датированного в основном поздним ордовиком. В этих породах развиты зоны минерализации видимой мощностью от 0.5 до 50 м (сульфидов 3–5 об. %, изредка более). В участках с рассеянной или мелко-гнездовой сульфидной вкрапленностью нередко присутствуют полевошпат–кварцевые, эпидотовые и др. прожилки. По данным пробирного анализа, в существенно сульфидных 0.5–1 кг пробах этих, в целом, малосульфидных зон содержания Pd достигают 1.4 г/т, Au – 0.8 г/т, а Pt – 0.2 г/т. Минералы ЭПГ представлены обильными выделениями теллуридов палладия микронного размера – меренскита PdTe₂, тегагмита Pd₃HgTe₃, котульскита PdTe, а также иных соединений благородных металлов – садбериита PdSb, арсенопалладинита Pd₈(As,Sb)₃ и некоторых других. В магнетит–халькопирит–пиритовой ассоциации, помимо указанных минералов палладия, присутствуют микровключения самородного серебра, самородного висмута и самородного олова. В более поздней полисульфидно–полевошпат–карбонатно–кварцевой ассоциации встречаются теллуриды Au и Ag, самородное золото (в том числе ртутистое), Se-содержащий аргентит, гринокит. Образование парагенезисов благородных металлов связано с позднемагматическими процессами, а также с перераспределением последующими магматогенными гидротермальными флюидами, вплоть до температуры ~250°C; давление снижалось от ~0.9–1.3 до ~0.4–0.5 кбар.

Ключевые слова: малосульфидная минерализация, амфиболизированные габбро, палладий, платина, золото, изотопный состав серы, гидротермальные флюиды, Полярный Урал

DOI: 10.31857/S2686739723601163, EDN: VDZHOA

ВВЕДЕНИЕ

Восточный склон Полярного Урала, входящий в Ямало-Ненецкий автономный округ, слабо освоен, но весьма перспективен в отношении металлических полезных ископаемых. Здесь добываются лишь хромиты (~1/2 добычи РФ), хотя есть многочисленные проявления и единичные месторождения цветных, редких и благородных

металлов. Среди них последние (Au, Ag, платиноиды) имеют наибольшую инвестиционную привлекательность. Согласно ГИС-атласу “Недра России”, в западной части Ямало-Ненецкого автономного округа (в основном это его Приуральский район) известно более 200 золоторудных и золотосодержащих месторождений и рудопроявлений, представленных самыми разнообразными типами. Собственных проявлений элементов платиновой группы (ЭПГ) в регионе не выявлено, хотя целенаправленный их поиск здесь ведется почти 100 лет, со времени финансируемой Трестом “Уралплатина” первой экспедиции А.Н. Заварицкого в этот край в 1925 г. В то же время данные о вероятной платиноносности территории и сообщения о находках минералов ЭПГ появлялись в разные годы ([1, 5, 10, 14] и др.).

В настоящем сообщении впервые описывается новое благороднометальное (Pt–Au–Pd) рудопроявление Васи́линовское, приведены первые

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

²Научный геоинформационный центр Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук, Черноголовка, Россия

⁴Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина Коми Научного Центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар, Россия

*E-mail: viken@igem.ru

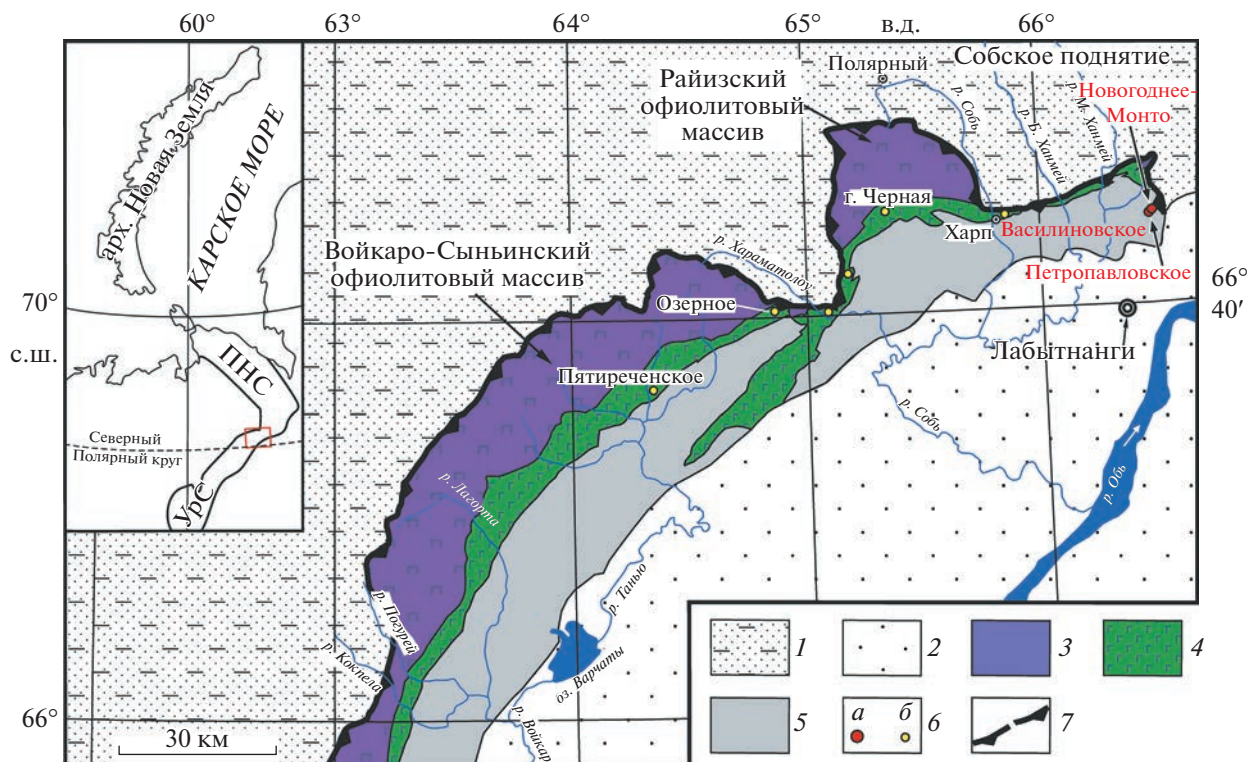


Рис. 1. Положение Васи́линовского рудопоявления в складчато-надвиговой структуре Полярного Урала. Геологическая основа по [7, 17], с упрощениями. На врезке: УрС – Уральское складчато-надвиговое сооружение, ПНС – Пай-хойско-Новоземельское складчато-надвиговое сооружение; прямоугольником показано расположение северной и центральной частей Войкарской зоны.

1 – позднекембрийские и палеозойские образования Западно-Уральской мегазоны; 2 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3–5 – образования Войкарской зоны; 3, 4 – преимущественно ордовикские метаморфизованные гипербазиты (3) и габброиды (4), 5 – преимущественно ордовикско-девонские магматические и осадочно-вулканогенные образования; 6 – благороднометалльные объекты: месторождения золота (а), Pd–Cu- и Pt–Au–Pd-рудопоявления (б); 7 – Главная Уральская сutura.

результаты минералого-геохимического исследования его руд и условий их образования.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Василиновское палладиевое проявление расположено в 2 км к северо-востоку от пос. Харп Ямало-Ненецкого автономного округа. Район приурочен к северо-западной части Войкарской зоны Полярного Урала (рис. 1). Юго-восточное обрамление офиолитовых массивов Полярного Урала (Рай–Из, Войкаро–Сыньинский) сложено породами полосчатого дунит–верлит–клинопироксенит–габбрового кэршорского комплекса [16, 17]. Его возраст оценивается как позднеордовикский, на что указывают близкие конкордантные U–Pb-датировки магматического циркона из габброидов (447 ± 4 , 446 ± 2 и 454 ± 7 млн лет) [15]. Кроме того, в поле развития существенно габброидного кэршорского комплекса распространены секущие тела плагиигранитов лагораянского комплекса, возраст циркона из которых варьирует от 490 ± 7 до 428 ± 4 млн лет ([15, 16, 20]

и ссылки в этих работах), что свидетельствует о формировании пород полосчатого комплекса с позднего кембрия до раннего силура.

Василиновское проявление расположено среди амфиболизированных габброидов и пироксенитов кэршорского комплекса [6]. Эти породы на восточном склоне Полярного Урала являются перспективными для локализации медно-благороднометалльной минерализации [17]. Здесь описано проявление г. Черная в ЮЗ отрогах офиолитового массива Рай–Из (рис. 1) – в титаномагнетитовых рудах содержания ЭПГ достигают 1.5 г/т. Далее к юго-западу от него установлена серия пунктов вкрапленной медной минерализации в габброидах кэршорского комплекса (Cu до 0.5%, по [17]) – возможно Fe–Ti–V–Pt–Pd–Au–Cu-типа, подобных Волковскому месторождению на Среднем Урале [11]. Важнейшим является расположенное далее к ЗЮЗ, на листе Q-41-XI – в междуречье рек Большая и Малая Хараматалоу – рудопоявление Озерное, открытое В.Г. Котельниковым в 2004 г. [9, 14, 17, 18], платино-золото-палладиево-медного типа с $C_{Pd} = 0.1–1.66$ г/т

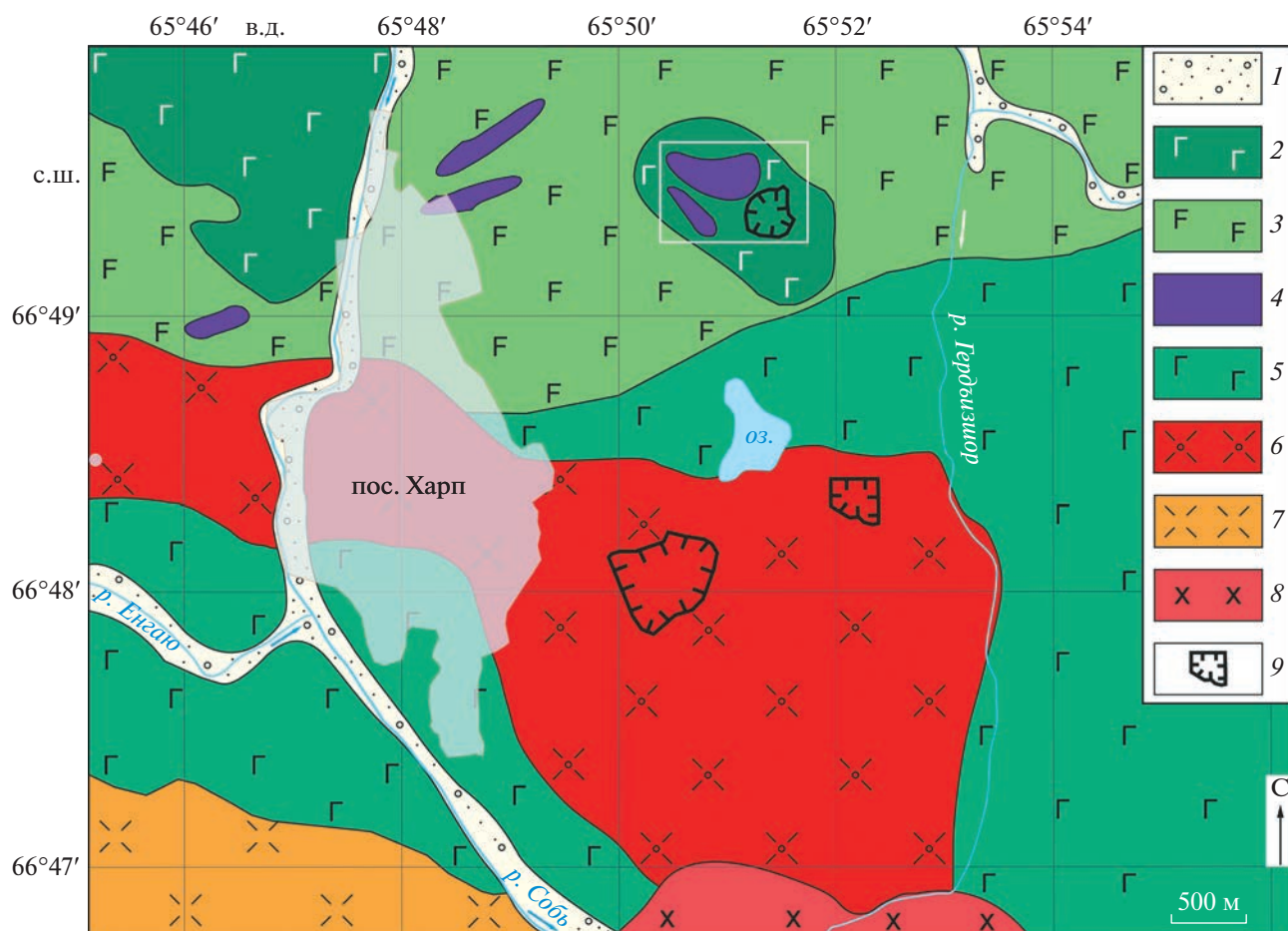


Рис. 2. Схема геологического строения Васи́линовского рудопроявления составлена на основе [6]. 1 – позднечетвертичные аллювиальные отложения; 2–4 – породы позднекембрийско–ордовикского кэ́ршорского комплекса: 2 – габбро амфиболизированные, 3 – габбро–амфиболиты, 4 – гарцбургиты, перидотиты амфиболизированные, дайки пироксенитов; 5, 6 – габброиды и плагиогранитоиды ранне–среднедевонского собского комплекса: 5 – габбро кварцсодержащие роговообманковые, 6 – диориты, тоналиты; 7, 8 – породы ранне–среднедевонского конгорского комплекса: 7 – диориты биотит–роговообманковые, 8 – гранодиориты; 9 – карьеры строительного камня. Белая рамка – Васи́линовское Pt–Au–Pd–рудопроявление.

(среднее 0.28 г/т) и $C_{Pt} = 0.04–0.26$ г/т. Его прогнозные ресурсы категории P_2 соответствуют параметрам крупного месторождения [17]: Pd 54.7 т, Pt 9.8 т, Au 52.8 т.

МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ

Гематит–магнетитовая ассоциация распространена в темноцветных амфиболитизированных габброидах в виде рассеяной вкрапленности (до 1 мм), иногда изометричных скоплений (до 1–2 см) и еще реже – крупных шпиров до 1 м мощностью. Количество магнетита в таких рудных фрагментах колеблется от первых до 30–50 об. %. Как правило, магнетит приурочен к породообразующим темноцветным минералам и отлагается по границам их кристаллов, ассоциируя с сульфидами; встречаются симплектиты магнетита с амфиболом. Наличие в метагаббро боль-

шого количества титаномагнетита, а также обычное присутствие скелетных кристаллов рутила (с заметными примесями V и W) указывают на обогащенность магмы не только железом, но и титаном. В рудах наблюдаются замещение магнетита гематитом и разновременная кристаллизация магнетита относительно сульфидов (кокардовые каймы магнетита вокруг сульфидов и развитие сульфидных агрегатов в интерстициях между зернами магнетита), что позволяет предполагать изменение окислительного режима магматической системы, которое, вероятно, происходило неоднократно.

Магнетит–халькопирит–пиритовая ассоциация выделяется по существенному увеличению доли сульфидов (местами до 80 об. %). Ее проявления сопровождаются заметным ростом степени метасоматических изменений вмещающих базитов – эпидотизации, хлоритизации, альбитиза-

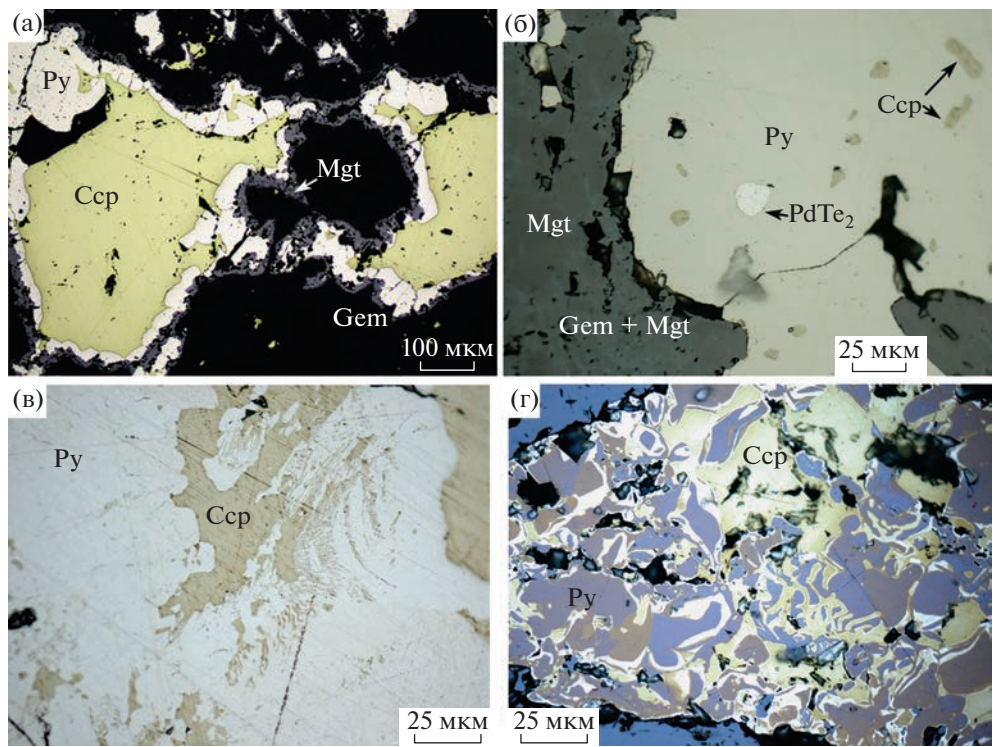


Рис. 3. Строение сульфидных агрегатов магнетит-халькопирит-пиритовой ассоциации. а – кокардовые структуры – агрегат Ccp+Py+Mgt в нерудной матрице амфиболита (обр. А18-652); б – микровключения меренскита (PdTe₂) в пирите (обр. 475); в, г – структуры распада: в – линейно–зональные – халькопирит в пирите (обр. А5-19), г – графические – пирит в халькопирите (обр. А18-653, воздушное травление). Здесь и далее минералы: Ccp – халькопирит, Py – пирит, Mgt – магнетит, Q – кварц, Ab – альбит, Ep – эпидот, Gem – гематит, Ga – галенит.

ции и реже окварцевания. Поэтому, в целом, такие минерализованные участки имеют преобладающую серую, с зеленым оттенком окраску, более светлую на фоне почти черных габбро и амфиболитов. Сульфиды образуют прожилки массивной текстуры до 5 см мощностью, гнезда и вкрапленность. Магнетит так же типичен для этой ассоциации, но здесь значительно чаще наблюдается его замещение гематитом. В агрегатах

сульфидов Fe и Cu широко распространены кокардовые структуры (рис. 3 а), структуры цементации, часто встречаются закономерные срастания халькопирита и пирита, напоминающие структуры распада (рис. 3 в, г). Упорядоченные срастания этих сульфидов (рис. 3 в) представлены концентрическими зонами “насыщения” пирита халькопиритом. Встречаются и участки с обратными соотношениями (пирита ≪ халькопирита), которые представляют собой симплектиты (мирмекитовые и графические вrostки) пирита в халькопирите (рис. 3 г), причем оба типа структур могут наблюдаться в одном и том же образце. Температура образования сосуществующих пирита и халькопирита по содержанию в них примеси Co, рассчитанная по методу Н.И. Безмена и др. [2], для образца со структурами описанных типов составляет 205–422°C, а для образца с одним типом – 287°C (табл. 1).

Главная особенность сульфидных агрегатов этой ассоциации – присутствие микровключений минералов палладия и редко – самородных висмута и олова. Палладиевые минералы слагают микроскопическую вкрапленность размером до 15 мкм и “облачные” скопления субмикроскопических зерен в кварце, альбите, эпидоте, магнети-

Таблица 1. Температуры образования срастаний пирита и халькопирита

Образец	C _{Co} , мас. %		K _d	logK _d	T, К	t, °C
	в Ccp	в Py				
А-17-19	0.12	0.51	0.36	−0.4437	553	280
А-18-653	0.43	1.1	0.598	−0.2232	477	205
	0.26	2.14	0.186	−0.7308	696	422
А-9-19	0.15	0.42	0.546	−0.2625	489	216
	0.14	0.28	0.765	−0.1163	448	175
А-5-19	0.07	0.31	0.345	−0.4616	560	287

K_d – коэффициент распределения; температуры рассчитаны по формуле $t^{\circ}C = 1000 / (1.292 \times \log K_d (C_{Cp-Py}) + 2.382) - 273$, согласно [2].

те, пирите и халькопирите (рис. 4). Форма их выделений либо интерстициальная, изометричная и каплевидная (рис. 3 б, 4 а, б), либо их включения имеют отчетливую кристаллографическую огранку (рис. 4 в, г). Эти обособления часто неоднородны и в основном представлены тремя устойчивыми по составу минералами: меренскитом, котульскитом и темагамитом (рис. 5, табл. 2). Причем они могут как срастаться контактно (рис. 4 г), так и образовывать субграфические структуры (рис. 4 в). В некоторых случаях в меренските палладий может замещаться никелем и платиной (до 5 мас. %), а теллур может замещаться сурьмой и висмутом. Содержания Pd в 0.5–1 кг пробах (максимальные для обр. 475, A5-19 и A18-121) по данным пробирного анализа составляют 1.371, 0.366 и 0.312 г/т, Pt – 0.199, 0.021 и 0.019 г/т соответственно (табл. 3).

Полисульфидно–полевошпат–карбонатно–кварцевая ассоциация наблюдалась в виде прожилков и жил мощностью до 30 см. Сульфиды, как правило, образуют вкрапленность и реже – гнезда (до 5 см), приуроченные к зальбандам жил. Жилы сложены в разных количественных соотношениях кварцем, полевым шпатом и карбонатом с подчиненным развитием сульфидов.

Теллуриды Au и Ag и самородное золото распространены в виде мелких (первые микроны) включений в главных сульфидах полисульфидно–полевошпат–кварцевой ассоциации (рис. 6): в пирите, халькопирите, галените, иногда в сфалерите и по микротрещинкам в магнетите. Встречаются включения самородного золота и в альбите. В срастании с Cd-содержащим сфалеритом (5.5 мас. % Cd) (рис. 6 г) установлен теллурид серебра, который содержит примесь Se; в одном образце (обр. 475) установлен Se-содержащий (2.7 мас. % Se) аргентит; иногда выделения самородного золота локализуются в продуктах частич-

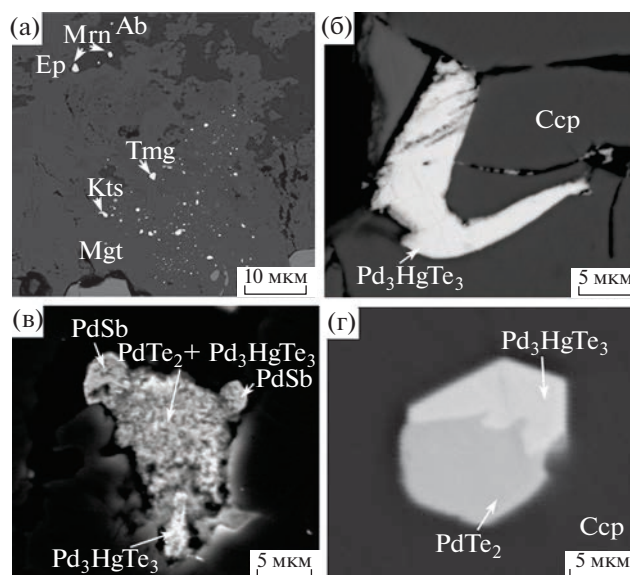


Рис. 4. Теллуриды палладия в рудах Васи́линовского рудопроявления. а – облачные скопления пылевидных теллуридов Pd (Tmg – темагамит, Kts – котульскит) в эпидот–альбитовом агрегате (обр. 475); б – темагамит в дефекте халькопирита (A-18-436); в – ячеистый агрегат меренскит+темагамит, по периферии которого образуются кристаллы минерала типа садбериита (PdSb) в кварц–эпидотовом метасоматите (A-5-19); г – сrostок кристаллов меренскита и темагамита с псевдогексагональным сечением в халькопирите (A-5-19).

ного окисления первичных сульфидов и в качестве примеси содержат ртуть (11.7 мас. %).

Минералы Au и Ag встречены в участках с палладиевой минерализацией (обр. 475, A18-121) и имеют отчетливо поздний характер, локализуясь в дефектах, микротрещинах в магматических минералах и более позднем альбите. Содержание се-

Таблица 2. Представительные результаты рентгеноспектрального микроанализа (мас. %) минералов палладия Васи́линовского проявления

	Минерал	S	Fe	Cu	As	Pd	Sb	Te	Pt	Hg	Total	Эмпирическая формула
1	Меренскит	0.04	1.2	1.4		28.8		68.4	0.8		100.6	$\text{Pd}_{0.95}\text{Cu}_{0.07}\text{Fe}_{0.08}\text{Pt}_{0.01}\text{Te}_{1.88}$
2	то же	0.4	2.2			28.9		69.4	0.0		100.8	$\text{Pd}_{0.94}\text{Fe}_{0.14}\text{Te}_{1.88}\text{S}_{0.04}$
3	Меренскит с Pt					25.0		69.6	5.4		100	$\text{Pd}_{0.87}\text{Pt}_{0.1}\text{Te}_{2.03}$
4	Темагамит		1.8			34.5		42.1	0.0	22.2	100.6	$\text{Pd}_{2.85}\text{Hg}_{0.97}\text{Fe}_{0.28}\text{Te}_{2.9}$
5	то же	0.0	1.7	1.6		34.6		42.0	0.0	21.3	101.2	$\text{Pd}_{2.79}\text{Hg}_{0.91}\text{Fe}_{0.26}\text{Cu}_{0.21}\text{Te}_{2.82}$
6	”		1.1			35.6		42.0		21.9	100.6	$\text{Pd}_{2.95}\text{Hg}_{0.96}\text{Fe}_{0.2}\text{Te}_{2.9}$
7	Котульскит	7.8	6.9	0.7		39.3		45.8			100.7	$\text{Pd}_{0.99}\text{Te}_{0.96}$
8	Арсенопалладинит				7.1	71.6	24.1				102.8	$\text{Pd}_{7.67}\text{As}_{1.08}\text{Sb}_{2.25}$

Формула котульскита (ан. 7) пересчитана с вычетом матрицы пирита. Анализы 1, 3, 4 выполнены в ИЭМ РАН (г. Черноголовка) на Tescan VEGA-II XMU с ЭДС INCA Energy 450, аналитик Д.А. Варламов; анализы 6–8 – в ИГ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) на Tescan Vega 3 LMN с ЭДС Instruments X-Max, аналитик А.С. Шуйский; анализ 2 – в ИГЕМ РАН на JSM-5610LV с ЭДС JED-2300, аналитик Л.А. Левицкая.

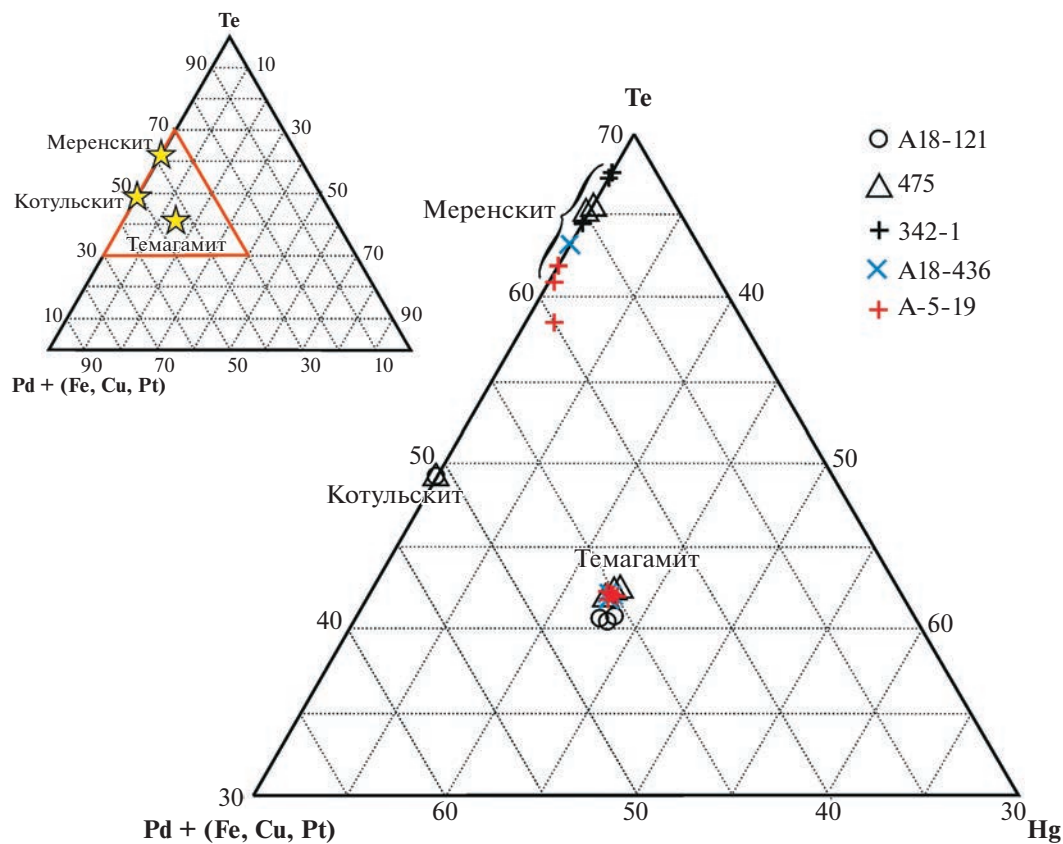


Рис. 5. Положение фигуративных точек составов минералов ЭПГ на треугольной диаграмме для теллуридов.

ребра в самородном золоте изменяется от 25 до 3 мас. %. В альбите обр. 475 обнаружена микронная вкрапленность самородного серебра (около 1 мкм), самородного висмута (~3 мкм), а в дефекте кристалла магнетита – самородное олово (~3 мкм). Отметим, что последняя ассоциация –

крайне редкая, хотя самородное олово встречается в ультраосновных породах (в якутских алмазах), а в южноуральских рудах входит в состав ассоциации самородных металлов в золото-кварцевых жилах, локализованных в амфиболизированных габбро-норитах; олово так же входит в виде изоморфной

Таблица 3. Химический состав (г/т) образцов минерализованных пород Василювского рудопоявления

Образец	Au	Pd	Pt	Ag	As	Co	Cu	Сульфиды	Доля сульфидов, об. %
A-5-19	0.162	0.366	0.021	3.5	4	142	>10000	Py+Ccp	35
A17-01-1	0.127	0.018	<0.005	3.3	<2	18	3338	Py+Ccp в кварце	20
A17/03	0.019	0.269	0.059	0.2	2	25	614	пирит	30
A18-342	0.057	0.104	0.013	<0.2	18	119	2084	Py+Ccp	10
A18/436	0.043	0.136	0.008	1.2	6	156	2986	Py+Ccp	20
A18/121	0.831	0.312	0.019	5.4	32	455	>10000	Py+Ccp	70
475	0.131	1.371	0.199	3.2	10	645	1613	Py+Ccp	80

Au, Pt, Pd – пробирный анализ с последующим определением элементов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой; Ag, As, Co, Cu – растворение в царской водке с последующим определением методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой; аналитик О.А. Избаш (ООО “Стюарт Геокемикл энд Эссей”).

примеси в магнетит (до 0.3% Sn), который присутствует в составе магматических и постмагматических ассоциаций месторождений, связанных с базит–ультрабазитовыми комплексами [12]. Напомним, что температура плавления самородного олова 232°C. Содержания золота в рудах составляют десятые доли г/т, реже достигают почти 1 г/т, C_{Ag} в большинстве случаев – первые г/т (см. табл. 3).

Сфалерит поздних ассоциаций образует единичные ксеноморфные включения (до 50 мкм) в халькопирите. Весь сфалерит – Cd-содержащий (3–6 мас. % Cd); содержание железа в нем изменяется от 1.2 до 8.7 мас. %. В наиболее поздних полисульфидно-карбонатно-кварцевых жилах по Cd-содержащему сфалериту образуется гринокит.

ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В СУЛЬФИДАХ

Профильная (бороздовая) абляция *пирита* и его срастаний методом LA-ICP-MS показала, что в пирите всех ассоциаций присутствует примесь Co; количественно его примесь преобладает в магнетит–халькопирит–пиритовой ассоциации (до 1.2 мас. %). Распределение Co в пирите зональное, причем иногда наблюдаются узкие зоны с $C_{Co} > C_{Fe}$, которые по составу соответствуют каттериту $(Co,Fe)S_2$. Примесь Ni довольно высока (400–800 ppm) в раннем пирите и понижается до 16–90 ppm в более позднем; распределена она неравномерно. Сходным образом ведет себя As в пирите (в раннем – до 790, в позднем – 30–40 ppm). Пики Ag и Pb тяготеют к вроскам халькопирита (в пирите коэффициенты корреляции Ag–Pb–Cu 0.6–0.8), а Zn+Cd – обусловлены микровключениями сфалерита в пирите. Примесь Se, напротив, заметно возрастает в пирите поздней полисульфидно-полевошпат-кварцевой ассоциации (до 207 ppm). Разрозненные пики таких элементов, как Pd, Te, Zn, Cd, Pb, Bi, а также Ag и Au, указывают на наличие в пирите рассеянных мелких минеральных включений (рис. 7). В пирите упомянутой поздней ассоциации установлены зерна рутила с сагенитовой решеткой. Халькопирит ранней ассоциации в единичных случаях содержит примесь молибдена до 2.4 ppm; “всплески” содержаний Ag в халькопирите всех ассоциаций рудопроявления по данным лазерной абляции довольно часты и составляют 5–50 ppm. В халькопирите поздних ассоциаций обнаружены примеси In (9–10 ppm), Sb (0.5–1.2 ppm) и Se (260–300 ppm).

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

Проведены микротермометрические исследования 72 индивидуальных флюидных включений (ФВ) в кварце из рудных ассоциаций. Все изучен-

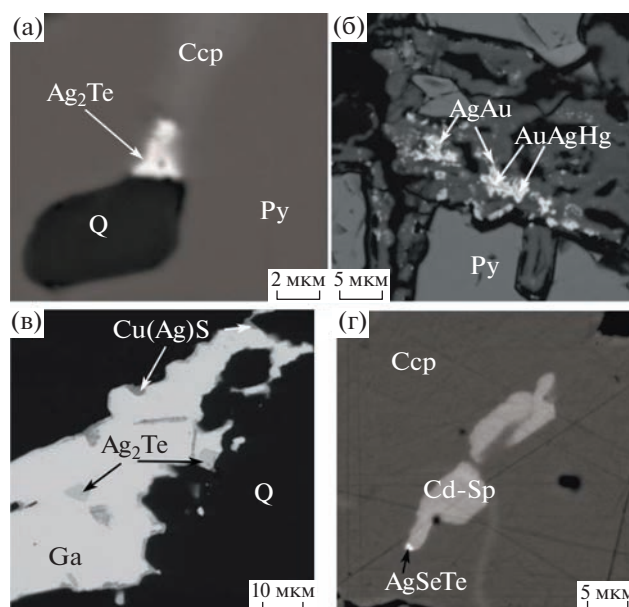


Рис. 6. Теллуриды Au и Ag в рудах Василювского рудопроявления. а – ассоциирующее с кварцем микровключение гессита и пирита в халькопирит–пиритовом срастании из полевошпат-кварцевого метасоматита (А-9-19); б – Au–Ag–Hg-минералы в гидроксидах железа, замещающих пирит в кварцево-жильном образовании (А-17-01); в – микровключение гессита в галените из полисульфидно-кварцевой ассоциации (А-11-19); г – минерал состава AgSeTe в срастании с Cd-сфалеритом в халькопирит–кварцевом прожилке (А-17-19).

ные ФВ отнесены к первичным в соответствии с известными критериями Э. Реддера. Для исследования были выбраны ФВ размером более 10 мкм, двухфазные при комнатной температуре, содержащие раствор и газовый пузырек, занимающий 15–20% объема вакуоли. Солевой состав растворов определялся по температурам эвтектик, концентрация солей оценивалась по температурам плавления льда; полученные температуры гомогенизации соответствуют минимальной температуре минералообразования.

В кварце гематит–магнетитовой ассоциации ФВ содержат минералообразующий флюид, состав которого, судя по $t_{эвт}$ (–65.0...–62.1°C), характеризуется преобладанием среди ионов Ca^{2+} и других двухвалентных ионов, максимальными среди изученных ФВ значениями $t_{гом}$ (300–330°C) и солёности ($C_{солей} = 20–23.1$ мас. % экв. NaCl). В кварце магнетит–халькопирит–пиритовой ассоциации растворы ФВ имеют Na-хлоридный состав ($t_{эвт} = –32.2...–29.0°C$), узкий диапазон $t_{гом}$ (260–274°C) и $C_{солей}$ от 12.3 до 14.5 мас. % экв. NaCl. ФВ в кварце полисульфидной ассоциации содержат такие же Na-хлоридные растворы ($t_{эвт} = –32.1...–29.9°C$; $C_{солей} = 12.2–14.7$ мас. % экв. NaCl), но с более умеренной температурой гомо-

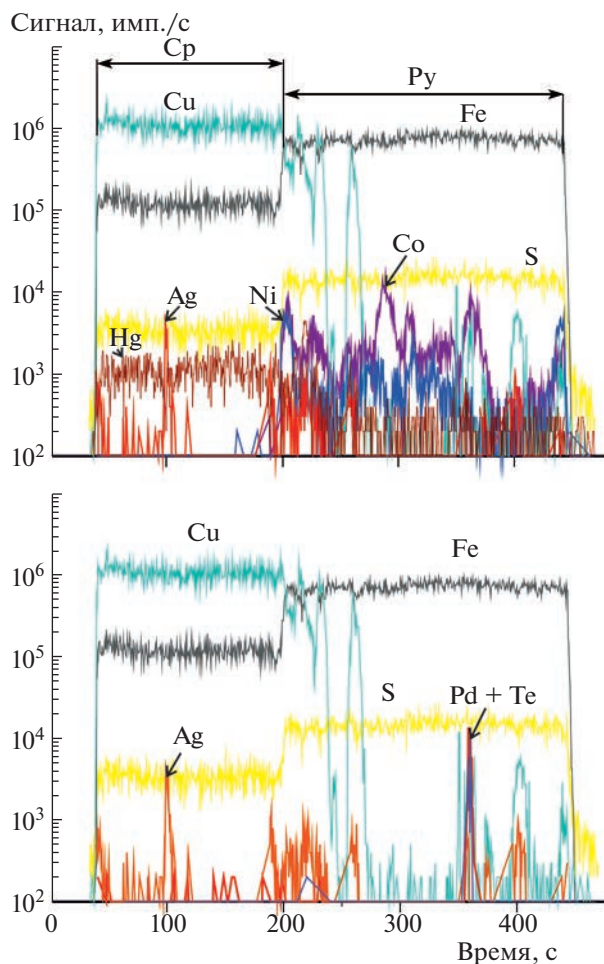


Рис. 7. Распределение элементов-примесей в срастании пирит+халькопирит из магнетит-халькопирит-пиритовой ассоциации. Примеси Ag и Hg тяготеют к халькопириту, а As, Co и Ni — к пириту, причем распределение Co зонально; в пирите встречаются включения галенита и теллуридов палладия (обр. A18–121).

генизации (235–252°C). ФВ в кварце полисульфидно-кварцевой ассоциации так же имеют Na-хлоридный состав ($t_{эвт} = -31.5...-25^\circ\text{C}$), достаточно узкие интервалы $t_{гом}$ (234–244°C) и $C_{солей}$ (13.5–16.6 мас. % экв. NaCl). Полученные нами $t_{гом}$ хорошо соотносятся с температурами образования, определенными по кобальтовому пирит-халькопиритовому геотермометру. Поскольку максимальные температуры кристаллизации ($t_{крист}$) выше температуры гомогенизации ФВ, есть возможность приблизительно оценить давление путем решения задачи, обратной вычислению поправки к $t_{гом}$ включений для оценки истинных температур кристаллизации (табл. 4).

Таким образом, минералообразующие флюиды рудопроявления Василюновское в габброидах кэршорского комплекса испытывали заметную эволюцию. Ранняя гематит-магнетитовая ассо-

циация была отложена при участии флюидов, содержащих двухвалентные катионы (Ca, Mg, Fe и др.) и обладавших высокими температурой и соленостью, при давлении ~0.9–1.3 кбар. Более поздние полисульфидные минеральные ассоциации формировались Na-хлоридными относительно низкотемпературными и менее концентрированными растворами при вероятном давлении 0.4–0.7 кбар. Не исключена генетическая связь поздних порций флюида с иными plutonic комплексами, например, собским. Габброиды и гранитоиды последнего вскрыты в непосредственной близости, к югу (см. рис. 2) и относятся к Собскому батолиту [17].

Изотопный состав серы $\delta^{34}\text{S}$ (‰) в пирите Василюновского проявления изменяется от –4.2 до +6.3, в халькопирите от –1.6 до +4.2. В сосуществующих пирите и халькопирите ранних ассоциаций руд (с магнетитом и палладием, обр. 1133, 1266-1 и A-5-19) изотопом ^{32}S обогащен пирит, а в поздних халькопирит-кварцевых жилах — халькопирит; пирит и халькопирит становятся изотопно-равновесными (обр. A-17-19), с соответствующей $t_{крист} \sim 254^\circ\text{C}$. В целом изотопный состав серы сульфидов рудопроявления довольно близок к мантийному; небольшое утяжеление до +6‰ очевидно вызвано добавкой коровой серы.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Метагабброиды кэршорского комплекса, вмещающие Pt–Pd-малосульфидную минерализацию, относятся к образованиям нижней коры ([15, 16] и др.) Войкарского задугового бассейна океанического типа [8]. В целом диапазон времени формирования дунит–верлит–клинопироксенит–габбровой ассоциации пород Войкарской зоны Полярного Урала можно оценить как позднекембрийско–раннесилурийский по зернам циркона из габброидов кэршорского комплекса и из прорывающих их плагиогранитов ([15, 20] и ссылки в этих работах). Таким образом, становление нижней коры в Войкарском бассейне продолжалось не менее 62 млн лет (~490–428 млн лет).

Наше открытие добавляет важный вклад в сведения о платиноидной минерализации Полярного Урала: юго-восточная краевая часть офиолитовых массивов, сложенная габбро и амфиболитами и контактирующая с Собским батолитом, несет рассеянную Pt–Pd ($\pm$ Au)-минерализацию. Последняя ассоциирует с малосульфидными зонами пирит-халькопиритовой вкрапленности и средне–низкотемпературных гидротермальных изменений. Не исключено, что в этом регионе как платиноидная, так и медная ($\pm$ Au) минерализация в значительной степени являются наложенными и связаны как с тектоно–метаморфиче-

Таблица 4. Минеральные ассоциации руд Василиновского рудопоявления, температуры их кристаллизации и температуры гомогенизации ФВ в кварце

Минеральная ассоциация	Рудные минералы	Оценки температуры, °С	P^* , кбар
Гематит—магнетитовая	Магнетит, гематит, ильменит, Ti-магнетит, сфен, рутил (с повышенными C_W и C_V)	$t_{\text{крист}} = 205\text{--}422^{**}$, $t_{\text{гом}} = 300\text{--}330$	0.9–1.3
Магнетит—халькопирит—пиритовая	Пирит, халькопирит, магнетит, микровключения теллуридов Pd в сульфидах	$t_{\text{крист}} = 156\text{--}319^{**}$, $t_{\text{гом}} = 260\text{--}274$	0.6–0.7
Полисульфидная (вкрапленный тип)	Пирит, халькопирит, сфалерит с примесью Cd, галенит, микровключения Au-Ag-теллуридов	$t_{\text{крист}} \sim 250\text{--}300^{***}$, $t_{\text{гом}} = 235\text{--}252$	0.6–0.7
Полисульфидно—карбонатно—кварцевая (жильный тип)	Халькопирит, сфалерит, гринокит переменного состава, микровключения Au-Ag минералов	$t_{\text{крист}} = 175\text{--}280^{**}$, $t_{\text{гом}} = 234\text{--}244$	0.4–0.5

*давление примерно оценено по разнице между полученными $t_{\text{крист}}$ и $t_{\text{гом}}$ включений в кварце;

по кобальтовому пирит-халькопиритовому геотермометру [2]; *оценки по минеральным парагенезисам.

скими событиями, так и с контактовым воздействием диоритоидов собского и конгорского комплексов. По минеральным ассоциациям, параметрам флюидов и изотопному составу серы сульфидов Василиновского проявления просматривается его аналогия с рудными зонами месторождений Новогоненского рудного поля, которое представляет собой скарново-порфировую золотоносную систему, непосредственно связанную с диоритоидами двух упомянутых магматических комплексов [3, 7].

Отрицательный результат поисков А.Н. Зава-рицким платиноидов в районе Рай—Иза (1925 г., начальником партии был А.Г. Бетехтин), был обусловлен геологическими причинами. Концентрически-зональные платиноносные дунит—клинопироксенитовые массивы Урала — Тагильский, Светлоборский и др. состоят из ультрабазитов, а видимые выделения ЭПГ с преобладанием минералов платины тяготеют к дунитам с вкрапленным хромитом, образующим мелкие шилы и маломощные слои [4, 13]. Денудация Уральского орогена привела к образованию в рыхлых осадках, перекрывающих Тагильскую зону, крупнейших в мире Pt-россыпей, содержащих, в том числе, и крупные платиновые самородки (достигающие максимально 9.6 кг). Массивы Рай—Из, Войкаро—Сыньинский, Сыум-Кеу на Полярном Урале, как и многие другие дунит-гарцбургитовые массивы Урала, входят в состав офиолитовых комплексов преимущественно ордовикского возраста и хромитовые; крупнейший из них — Кемпирсайский [13, 19]. В их хромититах и вмещающих ультрабазитах высокие концентрации ЭПГ не известны, и представлены

платиноиды в основном микронными выделениями минералов тугоплавких Os, Ir и Ru.

В Василиновском рудопоявлении Pt—Pd-минерализация развита в основном в габбро и метагабброидах, а не в ультрамафитах. То есть геологическая ситуация напоминает Волковское месторождение, приуроченное к габброидам на крайнем северном окончании базит—ультрабазитового Тагильского массива на Среднем Урале [11].

Таким образом, зоны малосульфидной ($\pm$ магнетит) минерализации в габброидах, амфиболитах и в развитых по ним гидротермально—метасоматических образованиях Василиновского проявления имеют Pt—Au—Pd-специализацию. По данным пробирного анализа, содержания $\Sigma(\text{ЭПГ} + \text{Au})$ достигают в существенно сульфидных пробах 1.7 г/т при соотношении $\text{Pd} \gg \text{Au} > \text{Pt}$. Минералы ЭПГ представлены обильными выделениями микронного размера теллуридов палладия — меренскита PdTe_2 , тегагмита Pd_3HgTe_3 , котульскита PdTe , а также иных соединений благородных металлов — садбериита PdSb и некоторых других. В магнетит—халькопирит—пиритовой ассоциации, помимо указанных минералов палладия, присутствуют микровключения самородного серебра, самородного висмута и самородного олова. В более поздней полисульфидно—полевошпат—карбонатно—кварцевой ассоциации в пирите, халькопирите, галените, иногда в сфалерите и по микротрещинкам в магнетите встречаются теллуриды Au и Ag, самородное золото (в том числе ртутистое), Se-содержащий аргентит, гринокит. По минеральному составу первая ассоциация резко контрастирует со второй и с более широко проявленными подобными зонами малосульфидной минерализации

(±кварц) с геохимической специализацией Fe—Cu—Au, которые вскрыты в 1 км южнее — в карьере месторождения строительного камня (в диоритах собского комплекса).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны ЦКП “ИГЕМ-аналитика” (LA-ICP-MS, аналитик В.Д. Абрамова; СЭМ с ЭДС, аналитик Л.А. Левицкая; изотопия серы, аналитик Ю.Н. Чижова) за исследования состава минералов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ 23-17-00266.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникина Е.В. Платиноиды в хромовых рудах Войкар-Сыньинского и Райизского массивов (Полярный Урал). Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Сыктывкар: ИГ КомиНЦ УрО РАН, 1994. 27 с.
2. Безмен Н.И., Еремин Н.И., Наразаули И.Г., Позднякова Н.В., Сергеева Н.Е. Пирит-халькопиритовый геотермометр: распределение кобальта // Геохимия. 1978. № 3. С. 384–389.
3. Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н., Тюкова Е.Э., Соболев И.Д., Абрамова В.Д., Выхристенко Р.И., Трофимов А.П., Хубанов В.Б., Грознова Е.О., Двуреченская С.С., Кряжев С.Г. Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
4. Генкин А.Д. Последовательность и условия образования минералов платиновой группы в Нижне-Тагильском дунитовом массиве // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 41–48.
5. Гурская Л.И., Смелова Л.В., Колбанцев Л.Р., Ляхницкая В.Д., Ляхницкий Ю.С., Шахова С.Н. Платиноиды хромитоносных массивов Полярного Урала. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2004. 306 с.
6. Еремин В.П., Пономарев В.Г. Результаты поисково-съемочных работ м-ба 1:50000, проведенных на Полярном Урале в районе среднего течения рек Собь и Малый Ханмей (отчет Подгорной ПСП, 1970–73 гг.). пос. Полярный, 1973. ТФИ по ЯНАО.
7. Зылева Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (3-е покол.). Сер. Зап.-Сибирская. Лист Q-42 — Салехард. Об. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014, 396 с.
8. Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В. Палеозойская эволюция Полярного Урала: Войкарский бассейн с корой океанического типа существовал не менее 65 млн лет // Бюлл. МОИП. Отдел Геол. 2014. № 5. С. 56–70.
9. Кузнецов С.К., Онищенко С.А., Котельников В.Г., Филиппов В.Н. Медно-золото-палладиевая минерализация в ультрабазитах Полярного Урала // ДАН. 2007. Т. 414. № 1. С. 67–69.
10. Кузнецов С.К., Шевчук С.С., Вокуев М.В., Ковалевич Р.С. Эпигенетическая палладиевая минерализация в гипербазитах Войкар-Сыньинского массива на Полярном Урале // ДАН. 2013. Т. 451. № 5. С. 553–555.
11. Мурзин В.В., Пальянова Г.А., Аникина Е.В., Молошаг В.П. Минералогия благородных металлов (Au, Ag, Pd, Pt) Волковского Cu—Fe—Ti—V месторождения (Средний Урал) // Литосфера. 2021. 21 (5). С. 643–659.
12. Некрасов И.Я. Олово в магматическом и постмагматическом процессах. М.: Наука, 1984. 239 с.
13. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
14. Пыстин А.М., Потанов И.Л., Пыстина Ю.И., Генералов В.И., Онищенко С.А., Филиппов В.Н., Шлома А.А., Терешко В.В. Малосульфидное платино-металльное оруденение на Полярном Урале. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 152 с.
15. Ремизов Д.Н., Куликова К.В., Сычев С.Н., Носиков М.В., Сергеев С.А. U—Pb-возраст цирконов из плагиогранитов лагортаюского дайкового комплекса на Полярном Урале // ДАН. 2012. Т. 447. № 5. С. 538–540.
16. Савельева Г.Н., Батанова В.Г., Бережная Н.А., Пресняков С.Л., Соболев А.В., Скублов С.Г., Белоусов И.А. Полихронное формирование мантийных комплексов офиолитов (Полярный Урал) // Геотектоника. 2013. № 3. С. 43–57.
17. Шишкин М.А., Астапов А.П., Кабатов Н.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Лист Q-41 (Воркута). Об. записка. Ред. В.П. Водолазская. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
18. Murzin V., Palyanova G., Mayorova T., Beliaeva T. The gold—palladium Ozernoe occurrence (Polar Urals, Russia): mineralogy, conditions of formation, sources of ore matter and fluid // Minerals. 2022. V. 12. Paper 765. <https://doi.org/10.3390/min12060765>
19. Hu W.J., Zhou M.F., Yudovskaya M.A., Vikentyev I.V., Malpas J., Zhang P.F. Trace elements in chromite as indicators of the origin of the giant podiform chromite deposit at Kempirsai, Kazakhstan // Economic Geology. 2022. V. 117. P. 1629–1655.
20. Queiroga G., Martins M., Kuznetsov N., Chemale F.Jr., Dussin I., Pedrosa-Soares A.C., Kulikova K., de Castro M.P. Timing of lower crust generation in the Voykar ophiolite massif, Polar Urals, Russia: U—Pb (LA—ICP—MS) data from plagiogranite zircons // Ofioliti. 2016. V. 41 (2). P. 75–84.

PLATINUM-PALLADIUM OCCURRENCE VASILINOVSKOE: A NEW TYPE OF NOBLE-METAL MINERALIZATION IN THE URALS

I. V. Vikentyev^{a, #}, E. E. Tyukova^a, V. D. Mokri^a, Yu. N. Ivanova^a, D. A. Varlamov^c, A. S. Shuisky^d, E. O. Groznova^c, I. D. Sobolev^a, and Academician of the RAS N. S. Bortnikov^a

^a*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Scientific Geoinformation Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c*Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Oblast, Russian Federation*

^d*Institute of Geology of Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation*

[#]*E-mail: viken@igem.ru*

For the first time, a new noble-metal (Pt–Au–Pd) Vasilinovskoe ore occurrence discovered near the village of Kharp in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug is described. It is associated with amphibolized gabbroids and subordinate pyroxenites of the Kershov complex, dated mainly to the Late Ordovician. In these rocks, mineralization zones with an apparent thickness from 0.5 to 50 m (sulfides 3–5 vol.%, occasionally more) are developed. In areas with scattered or finely nested sulfide inclusions, feldspar-quartz, epidote and other veins are often present. According to assay data, in substantially sulfide 0.5–1 kg samples of these, in general, low-sulfide zones, the Pd content reaches 1.4 g/t, Au – 0.8 g/t, and Pt – 0.2 g/t. PGE minerals are represented by abundant secretions of micron-sized palladium tellurides – merenskite PdTe₂, temagamite Pd₃HgTe₃, kotulskite PdTe, as well as other noble metal compounds – sadberite PdSb, arsenopalladinite Pd₈(As,Sb)₃ and others. In addition to these palladium minerals, the magnetite–chalcopyrite–pyrite association contains microinclusions of native silver, native bismuth and native tin. In the later polysulfide–feldspar–carbonate–quartz association, Au and Ag tellurides, native gold (including Hg-bearing), Se-containing argentite, greenockite are found. The formation of parageneses of precious metals is associated with late magmatic processes, as well as with redistribution by subsequent magmatogenic hydrothermal fluids, up to a temperature of ~250°C; pressure decreased from ~0.9–1.3 to ~0.4–0.5 kbar.

Keywords: low-sulfide mineralization, amphibolized gabbro, palladium, platinum, gold, sulfur isotopic composition, hydrothermal fluids, Polar Urals