Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 553.4

DOI: 10.19110/2221-1381-2019-01-3-12

МИНЕРАЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В НИЖНИХ РУДНЫХ ТЕЛАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРНЫЙ КАМЕННИК, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ

А. Н. Иванов, А. В. Чернявский, Н. Ю. Грошев, Е. Э. Савченко

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты
nikolaygroshchev@gmail.com

Малосульфидное Pt-Pd-месторождение Северный Каменник приурочено к Северному платиноносному рифу, залегающему в 800 м от подошвы Западно-Панского массива палеопротерозойского федорово-панского расслоенного комплекса Кольского полуострова. Основное рудное тело этого месторождения сопровождается нижележащими рудными телами, что нетипично для других участков Северного рифа (месторождение Киевей). Нижние рудные тела, отличаясь от основного по составу вмещающих пород и геохимическим характеристикам, разделяются на три типа. Проведенные минералогические исследования позволяют определить каждый из типов по ассоциации минералов платиновой группы — станнидно-теллуридной (тип 1), арсенидно-сульфидно-теллуридной (тип 2) и сульфидно-теллуридной (тип 3). При изучении станнидно-теллуридной и арсенидно-сульфидно-теллуридной ассоциаций было установлено три новых для Северного рифа минерала: арсенопалладинит, изомертиит и койоненит.

Ключевые слова: Западно-Панский массив, Северный риф, элементы платиновой группы, минералы платиновых металлов.

MINERALS OF PLATINUM GROUP ELEMENTS IN THE LOWER ORE BODIES OF THE NORTH KAMENNIK DEPOSIT, KOLA PENINSULA

A. N. Ivanov, A. V. Chernyavsky, N. Yu. Groshev, Ye. E. Savchenko

Geological institute KSC RAS, Apatity

The North Kamennik low-sulfide Pt-Pd-deposit is associated with the North PGE Reef occurring in 800 m above the bottom of the West-Pana intrusion of the Paleoproterozoic Fedorova-Pana Layered Complex, Kola Peninsula. The main ore body of the deposit is accompanied by lower ore bodies that is very unusual for other sites of the reef (e.g., Kievev deposit). The lower ore bodies having a different composition of host lithology and geochemical features are divided into three types. Results of mineralogical research allow defining each type using an assemblage of PGE minerals: stannide-telluride (type 1), arsenide-sulfide-telluride (type 2) and sulfide-telluride (type 3). Mineralogical finds have been made within the ore bodies of stannide-telluride and arsenide-sulfide-telluride PGM assemblage and are presented by arsenopalladinite, isomertieite and kojonenite (new minerals for the North Reef).

Keywords: West-Pana intrusion, North Reef, platinum group elements, platinum group minerals.

Введение

Федорово-панский палеопротерозойский расслоенный комплекс располагается в центральной части Кольского полуострова и вмещает несколько открытых в последние годы малосульфидных Pt-Pd-месторождений, включая одно из крупнейших в Европе — месторождение Федоровой тундры [1]. Значительная часть запасов комплекса сосредоточена в Северном платинометалльном рифе Западно-Панского массива, в котором разведано два месторождения: Киевей и Северный Каменник (рис. 1).

Северный платинометалльный риф, выделенный на месторождении Киевей в восточной части Западно-Панского массива, представляет собой несколько маломощных (1–2 м) минерализованных уровней, ассоциирующих с

нижним расслоенным горизонтом (НРГ). НРГ средней мощностью 40 м залегает примерно в 800–1000 м от подошвы массива, вдоль которой он тянется около 20 км (рис. 1). НРГ имеет контрастно расслоенное ритмичное строение, в котором принимают участие пироксениты, меланориты, нориты, оливковые нориты, лейкогаббронориты, лейкогаббро и анортозиты [3]. Идеальный ритм имеет трехчленное строение: в нижней части залегает меланорит или плагиоксенит ($\pm Ol$); средняя часть сложена мезократовыми габброноритами, в этой части можно встретить тонкое переслаивание габброноритов с анортозитами; в верхней части преобладают анортозиты, лейкократовые габбро и лейкогаббронориты. Платинометалльное оруденение горизонта приурочено к подошвам ритмических единиц (общим

Рис. 1. Схематическая геологическая карта Западно-Панского массива, с изменениями по [4]. Расположение Pt-Pd-месторождений околонушено черной линией. 1 — платиноносные рифы: Северный (а) и Южный (б); 2 — расслоенные горизонты (нижний и верхний); 3 — расслоенный горизонт оливинсодержащих пород; 4—6 — породы третьей (4), второй (5) и первой подзон (6) габброноритовой зоны; 7 — норитовая зона; 8 — магнетитовое габбро; 9 — тектонизированный нижний контакт массива (а) и разрывные нарушения (б); 10 — дайки метадолеритов, 11 — вулканогенно-осадочные породы зоны Имандра-Варзуга, 12 — архейские анортозиты Цагинского массива; 13 — архейские щелочные граниты; 14 — элементы залегания

Fig. 1. Schematic geological map of the West-Pana massif, modified from [4]. The location of the Pt-Pd-deposits is outlined by a black line: 1 — PGE reefs: North (a — established, b — supposed) and South (c); 2 — layered horizons (lower and upper); 3 — layered horizon of olivine-bearing rocks; 4—6 — the rocks of the third (4), the second (5) and the first subzone (6) of the gabbro-norite zone; 7 — noritic zone; 8 — magnetite gabbro; 9 — tectonized lower contact of the massif (a) and faults (b); 10 — dikes of metadolerites, 11 — volcanogenic sedimentary rocks of the Imandra-Varzuga zone, 12 — Archean anorthosites of the Tsaginsky massif; 13 — Archean alkaline granites; 14 — dipping

числом от двух до четырех-пяти), за исключением первого ритма, в подошве которого залегает маркирующий слой мелко- и среднезернистого безрудного плагиоипроксенита. Этот слой маркирует подошву НРГ, ниже которой оруденение не встречается. Основное рудное тело (ОРТ) месторождения Киев (риф *sensu stricto*), связанное со вторым ритмом, протягивается почти без перерывов на 6 км при средней мощности 1.7 м. Верхнее рудное тело и рудные линзы, ассоциирующие с третьим и четвертым ритмами, развиты в центральной части месторождения и являются прерывистыми — максимально они тянутся на расстояние до 900 м. Среднее содержание суммы элементов платиновой группы (ЭПГ) и золота в рифе составляет 4 г/т, отношения Pd/Pt и Cu/Ni варьируют в пределах 6—7 и 0.9—1.2 соответственно [6].

Месторождение Северный Каменник (рис. 2, далее в тексте — Каменник) располагается на западном фланге НРГ, вблизи предполагаемого питающего магматического канала [4]. Повторяющиеся меланократовые слои на этом фланге из разреза горизонта исчезают. В результате этого без пироксенитов и норитов НРГ теряет контрастный характер своего строения и выделяется в монотонном разрезе массивных габброноритов по чередованию преимущественно мезократовых и лейкократовых пород, в которых конкретные ритмы трудно выделить. ОРТ месторождения залегает внутри чередования габброноритов и анортозитов НРГ, где нередко ассоциирует с их оливиновыми разностями. Геохимические характеристики и минеральный состав основного рудного тела аналогичны

месторождению Киев [4]. Важной особенностью месторождения Каменник является увеличение концентраций ЭПГ в рудном теле в местах синформных перегибов НРГ, для которых характерно развитие мощной толщи такситовых перекристаллизованных габброноритов ниже чередования габброноритов и анортозитов. В этой толще и ниже по разрезу, за пределами НРГ, встречаются линзовидные (так называемые нижние) рудные тела с платино-металлической минерализацией. Такое строение НРГ и Северного рифа характеризует их русловую фацию [2], в которой отсутствуют верхние рудные тела, в отличие от нормальной фации на месторождении Киев.

Нижние рудные тела месторождения Каменник часто более богаты ЭПГ, чем ОРТ, и имеют сильно варьирующие геохимические характеристики. Например, в скважине 126, вскрывающей разрез полной русловой фации, содержание благородных металлов в такситовых габброноритах достигает 17.5 г/т, отношение Pd/Pt варьирует от 2 до 6, отношение Cu/Ni — от 0.8 до 2.3 [2]. Оруденение в такситовых габброноритах образует нижние рудные тела типа 1 (рис. 3). Другой тип этих тел с относительно невысокими концентрациями ЭПГ (тип 2) локализован в нескольких метрах ниже подошвы НРГ. Помимо этого, на глубине нескольких десятков метров от НРГ встречаются линзы геохимически однородного (Pd/Pt 6.5 и Cu/Ni 1.5) и относительно богатого (5 г/т Pt + Pd + Au) оруденения (тип 3).

Таким образом, с востока на запад в НРГ происходит смена фаций и появляются нетипичные для Северного рифа нижние рудные тела, которые в большинстве случа-

Рис. 2. Упрощенная геологическая карта (а) и разрезы (b, c) малосульфидного Pt-Pd-месторождения Северный Каменник. Распределение нормальной и русловой фации НРГ отражено в тонах желтого цвета. Красным цветом показаны рудные тела, которые встречаются не только в пределах НРГ, но и ниже его; пунктир — участки некондиционных руд. Черная штриховая линия соответствует разломам и тектонизированному контакту Западно-Панского массива. Сокращения: ГНЗ — габброноритовая зона (1 и 2), Mag — магнетит. Изменения по [4]

Fig. 2. Simplified geological map (a) and cross-sections (b, c) of the North Kamennik low-sulfide Pt-Pd-deposit. The distribution of normal and channel facies of the Lower Layered Horizon is shown by yellow tones. Note that red lines showing ore bodies occur below the horizon. Black dashed lines are faults and tectonized margin of the West-Pana intrusion. Abbreviations: ГНЗ — Gabbronorite zone (1 and 2), Mag — magnetite. Modified from [4]

ев резко отличаются по своей геохимии и по геологическому положению от ОПТ. Целью настоящего исследования является выявление особенностей минерального состава оруденения из нижних рудных тел месторождения Каменник, а также установление черт их сходства и различия с Северным рифом (*sensu stricto*) или ОПТ.

Материалы и методы исследования

Нижние тела малосульфидного платинометалльного оруденения изучены в 8 аншлифах, отобранных в западной части месторождения из скважин 126 и 3 (рис. 2, 3). Оруденение типа 1 изучено в аншлифах из скважины 126, отобранных с глубин 347.6, 348.3, 349.5, 350.5, 355.2 м, также как и оруденение типа 2 — в аншлифе с глубины 365.25 м; третий тип оруденения изучался в аншлифах из скважины 3 с глубин 147.6 и 151.0 м.

Минеральный состав оруденения (табл. 1, 2) исследовался на сканирующем электронном микроскопе Leo-1450 с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Bruker XFlash-5010 и программным обеспечением Quantax-200 (ГИ КНЦ РАН, аналитик Е. Э. Савченко) при следующих установках: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1.5 нА, экспозиция 200 секунд на спектр. Всего с целью диагностики МПМ сделано 528 изображений в обратноотраженных электронах (BSE) и 222 анализа минералов благородных металлов в режиме без стандартов, с использова-

нием следующих характеристических линий: для Pt, Ir, Os, Re, Au, Bi, Pb, Hg — Мб; для Pd, Ag, Rh, Te, As, Se, Sn, Sb, Mo — Лб; для S, Fe, Ni, Co, Cu — Кб. Состав основных МПМ приведен в табл. 3, полная таблица химического состава минералов доступна по запросу у авторов.

Результаты исследований и обсуждение

Минералы элементов платиновой группы в нижних рудных телах месторождения Каменник. Нижние рудные тела представлены линзами убогой сульфидной вкрапленности, расположенными под пластовым основным рудным телом (ОПТ) месторождения Каменник (рис. 3). Мощность отдельных линз достигает 10 м, суммарная мощность всей нижней минерализованной зоны может превышать 30 м. Геологическая позиция рудных тел позволяет разделить их на три типа. Оруденение первого типа расположено в такситовых габброноритах, которые относятся к НРГ [4]. Это оруденение пространственно сближено с ОПТ и часто примыкает к нему (скв. 126, рис. 3). Руды второго типа встречаются в подстилающих массивных породах ниже подошвы НРГ, от которой они находятся на расстоянии до 10 м (та же скважина). Оруденение третьего типа является наиболее удаленным от НРГ и залегает на глубине до 55 м от ОПТ (скв. 3, рис. 3).

Первый тип оруденения представлен неравномерной, участками гнездовой (в пегматоидных и крупнозернистых

Рис. 3. Положение нижних рудных тел (НРТ) месторождения Северный Каменник на геологических колонках скважин с вариациями содержаний благородных металлов (черная линия) и отношений Pd/Pt (синие кружки) и Cu/Ni (зеленые кружки) в руде. Черные кружки обозначают положение изученных аншлифов. Сокращения: ОПТ — основное рудное тело; ГНЗ — габброноритовая зона. По геохимическим данным [2]

Fig. 3. Location of the lower orebodies of the North Kamennik deposit on geological borehole columns with variations of precious metals concentrations (black line) and Pd/Pt (blue circles) & Cu/Ni (green circles) ratios. Black circles show a location of thick sections of this study. Abbreviations: ОПТ — Main orebody; ГНЗ — Gabbro-norite zone. Geochemistry data were taken from [2]

габброноритах) вкрапленностью с содержанием сульфидов от 0.3 до 10 об. %. Вкрапленность занимает интерстициальное положение по отношению к плагиоклазу и пироксенам. В составе пирротин-пентландит-халькопиритовой вкрапленности преобладает халькопирит, количество которого варьирует от 50 до 75 % от общего количества сульфидов. По составу в этом типе оруденения было диагностировано 462 зерна минералов платиновых металлов (МПМ), серебра и золота (табл. 1 и 2). Размер зерен колеблется от 1 до 40 мкм. Более половины минералов благородных металлов (80 %) находятся в силикатах. Около 15 % минералов представляют собой сростания с сульфидами и располагаются на границе силикат/сульфид; 5 % зерен полностью включены в сульфиды. По относительной объемной распространенности основными минералами (> 10 об.% от всех МПМ) являются рустенбургит, мончеит и котульскит, определяющие стannидно-теллуридную ассоциацию МПМ. Морфология и взаимоотношения МПМ с другими минералами показаны на рис. 4, а–е.

Тип ассоциации МПМ в оруденении первого типа показывает обогащение оловом относительно ОПТ. Помимо рустенбургита в нем присутствуют еще четыре минерала и одна минеральная фаза с видообразующей ролью олова: паоловит, атоцит, паларстанид, койоненит и фаза MPh-2 (табл. 1, 2). Койоненит $(\text{Pd}_{6.5}\text{Fe}_{0.1})_{6.6}\text{Sn}_{1.1}\text{Te}_{2.3}$,

недавно открытый в расслоенном комплексе Стиллуотер минерал [9], является первой находкой в Северном платиноносном рифе (рис. 5, а). То же относится и к ассоциирующей с ним минеральной фазе MPh-2 $(\text{Pd}_{1.2}\text{Ag}_{0.8})_{2.0} \times (\text{Te}_{0.6}\text{Sn}_{0.2}\text{Se}_{0.2})_{1.0}$ [7]. Кроме этого, в качестве примеси олово отмечается в торнроозите (до 5.1 мас. %), стиллуотерите (до 4.7 мас. %), винцентите (до 6.1 мас. %) и кейтконните (до 3.9 мас. %). Вероятно, примесь олова присутствовала изначально также и в мончеите, в котором рустенбургит образует структуру распада твердого раствора (рис. 4, d).

Относительно высоким распространением в оруденении этого типа пользуются минералы золота и серебра, самородные соединения которых относятся к часто встречающимся минералам (табл. 1). Среди МПМ отмечаются минералы с видообразующей ролью серебра — теларгпалит, сопчеит, лукулайсваарит и минеральная фаза MPh-2, относящиеся к категории редких. Собственно серебряные минералы представлены гесситом, акантитом, науманнитом, аргентопентландитом (рис. 6, d). Примесь серебра отмечается в паоловите (до 6.58 мас. %) и меренскиите (до 4.21 мас. %), примесь золота — в лафламмеите (до 1.17 мас. %), что также выделяет этот тип оруденения среди остальных.

К типоморфным примесям в МПМ из оруденения первого типа помимо олова, золота и серебра можно отнести свинец. Концентрация свинца в котульските дос-

Таблица 1. Минералы платиновых металлов, золота и серебра из нижних рудных тел месторождения Северный Каменник в сравнении с ОПТ

Table 1. Minerals of platinum metals, gold and silver from the lower orebodies of the North Kamennik deposit compared to the main orebody

Минерал / Mineral	Сокращение Abbreviation	Формула Formula	ОПТ ¹ МОВ ¹	Нижние РТ / Lower ОВ		
				Тип 1 Type 1	Тип 2 Type 2	Тип 3 Type 3
Элементы / Elements						
Золото / Gold	Au	Au	••	•••		••
Серебро / Silver	Ag	Ag	•	•••	••	
Теллуриды-Висмутиды / Tellurides-Vismutides						
Гессит / Hesseite	Hes	Ag ₂ Te	•	••		
Теларгпалит / Telargpalite	Tlr	(Pd,Ag) ₃ Te	••	••		
Котульский / Kotulskite	Kot	Pd(Te,Bi)	••••	••••	••••	••••
Майчнерит / Maychnerite	Mch	(Pd,Pt)BiTe	•			
Меренский / Merenskyite	Mer	PdTe ₂	••••	••		••••
Мончеит / Moncheite	Mon	Pt(Te,Bi) ₂	••••	••••	••	••••
Теллурупалладинит / Telluriopalladinite	Tlp	Pd ₉ Te ₄	•	•••		
Кейтконнит / Caitconnite	Keit	Pd ₂₀ Te ₇	••	•		
Сопчеит / Sopcheite	Sop	Ag ₄ Pd ₃ Te ₄	••	••	•••	
Лукулайсваарит / Lukalaisvaaraite	Luk	Pd ₁₄ Ag ₂ Te ₉		• ^{2?}	• ^{2?}	
Торнроозит / Tornroosite	Tor	Pd ₁₁ As ₂ Te ₂	••	•••	••••	
Койоненит* / Coyonenite *	Kjn	Pd ₇₋₈ SnTe ₂		••		
Темагамит / Temagamite	Tmg	Pd ₃ HgTe ₃	•			
Соболевский / Sobolevskite	Sob	PdBi	••			
Интерметаллиды-Арсениды-Сульфидарсениды / Intermetallides-Arsenides-Sulfoarsenides						
Хонгшиит / Hongshiite	Hng	PtCu	•			
Паоловит / Paolovite	Plv	Pd ₂ Sn	•	••		
Атокит / Atokite	Atk	(Pd,Pt) ₃ Sn	•	••		
Звягинцевит / Zvyagintsevite	Zvg	Pd ₃ Pb	•			
Паларстанид / Palarstanide	Pls	Pd ₅ (Sn,As) ₂	•			
Изоферроплатина / Isoferroplatinum	Ifp	Pt ₃ Fe	•	•		
Рустенбургит / Rustenburgite	Rust	(Pt,Pd) ₃ Sn	•	••••		
Арсенопалладинит* / Arsenopalladinite*	Apd	Pd ₈ (As,Sb) ₃			•••	
Мертиит / Mertiite	Mrt	Pd ₁₁ (Sb,As) ₄	•	•		
Изомертиит* / Isomertyite*	Iso	Pd ₁₁ Sb ₂ As ₂			•••	
Сперрелит / Sperrylite	Sper	PtAs ₂	••	••	•••	••
Винцентит / Vincentite	Vin	Pd ₃ As	•	•		
Атенеит / Atheneite	Atn	Pd ₂ (As _{0.75} Hg _{0.25})			••• ²	
Палладарсенид / Palladoarsenide	Pal	Pd ₂ As	•			
Стиллуотерит / Stillwaterite	Stl	Pd ₈ As ₃	••	••	••••	
Холлигуортит / Holliguortite	Hol	RhAsS	•		•••	
Ирсит / Irsite	Irs	(Ir,Ru,Rh,Pt)AsS	•			
Меньшиковит / Menshikovite	Men	Pd ₃ Ni ₂ As ₃		• ²		
Сульфиды-селениды / Sulphides-selenides						
Акантит / Acanthite	Akn	Ag ₂ S	•	••		
Аргентопентландит / Argentopentlandite	Apn	Ag(Fe,Ni) ₈ S ₈	•	••		
Брэггит / Braggite	Br	(Pt,Pd,Ni)S	•••	•••	•••	
Высоцкий / Vysotskite	Vys	(Pd,Pt,Ni)S	••••	•••	••••	••••
Лафламмеит / Laflammeite	Lfl	Pd ₃ Pb ₂ S ₂		• ²		
Лаурит / Laurite	Lrt	(Ru,Os)S ₂	•			
Маланит / Malanite	Mln	Cu(Pt,Ir) ₂ S ₄	•	•		
Науманнит / Naumannite	Nau	Ag ₂ Se	•	••		
Колдуэллит / Caldwellite	Cdw	Pd ₃ Ag ₂ S		• ²		

Примечание: • — единичные зерна, •• — редкий, ••• — часто встречающийся, •••• — основной минерал; * — первая находка в Северном рифе; ¹ и ² — данные из [6] и [4] соответственно; ОПТ — основное рудное тело, РТ — рудные тела.

Note: • — single grains, •• — rare, ••• — often found, •••• — main mineral; * — the first find in the Northern reef; ¹ and ² — data from [6] and [4], respectively; MOB — main ore body, OB — ore bodies.

Рис. 4. Морфология выделений МПМ из различных типов нижних рудных тел Северного рифа (*a–e* — 1 тип, *f–i* — 2 тип, *j–l* — 3 тип). Сокращения минералов см. в табл. 1, за исключением: Ag-Au — сплав серебра и золота, Ccp — халькопирит, Mph — минеральная фаза, Po — пирротин, Pn — пентландит, Py — пирит. BSE-изображения

Fig. 4. Morphology of PGM grains from different types of lower orebodies of the North reef (*a–e* — 1 type, *f–i* — 2 type, *j–l* — type 3). Mineral abbreviations see tabl. 1, except: Ag-Au — silver and gold alloy, Ccp — chalcopyrite, Mph — mineral phase, Po — pyrrhotite, Pn — pentlandite, Py — pyrite. BSE images

Таблица 2. Минеральные фазы платиновых металлов из нижних рудных тел месторождения Северный Каменник в сравнении с ОПТ

Table 2. Mineral phases of platinum metals from the lower ore bodies of the North Kamennik deposit compared to the main ore body

Фаза Phase	Формула Formula	ОПТ ¹ МОБ ¹	Нижние ПТ / Lower OB	
			Тип 1 Type 1	Тип 2 Type 2
MPh-1	Pd ₂ Te			••
MPh-2	(Pd, Ag) ₂ (Te, Sn)		•	••
MPh-3	(Cu, Pt, Rh) ₂ S ₃			•
MPh-4	(Pd, Ag) ₃ (Ag, Pb)(Te, Sc)		••	
MPh-5	(Re, Cu, Pt)S ₂	•		
MPh-6	Pd _{2-x} (Bi, Pb)(S, Se)	•		
MPh-7	(Pd, Au) _{2+x} (As, Sn)	•		
MPh-8	Pt ₅ Te ₇	•		
MPh-9	(Ni, Fe, Cu, Co) ₂ (Rh, Pt)S ₄		• ²	
MPh-10	(Pd, Ag) ₇ Se ₅		• ²	
MPh-11	Pd ₃ (Pb Bi) ₂		•	

Примечание: см. табл. 1.

Note: see Table 1

Рис. 5. Койоненит (a), арсенопалладинит (b) и изомертиит (c) — новые для Северного рифа МПМ из месторождения Северный Каменник. a — аншлиф 126@348.3; b, c — аншлиф 126@365.25. Сокращения минералов см. в табл. 1 и на рис. 4

Fig. 5. Kojonenite (a), arsenopalladinite (b) and isomertieite (c) — new for the North Reef PGMs from the North Kamennik deposit. a — thick section 126@348.3; b, c — thick section 126@365.25. For mineral abbreviations see table 1 and fig. 4

тигает 2.1 мас. %, в мончите и теларгпалите — 1.6 и 11.8 мас. % соответственно (рис. 6, г). Минералы с видообразующей ролью свинца представлены редким сульфидом ЭПГ лафламмеитом $(\text{Pd}_{3.0}\text{Pt}_{0.2}\text{Au}_{0.1})_{3.3}(\text{Pb}_{1.9}\text{Bi}_{0.3})_{2.2}\text{S}_{1.6}$ и минеральной фазой MPh-11 $\text{Pd}_{3.2}(\text{Pb}_{1.4}\text{Bi}_{0.5})_{1.9}$.

Второй тип характеризуется тонкой неравномерной эмульсионной вкрапленностью сульфидов. Сульфиды для невооруженного глаза едва заметны, их количество не превышает 0.5 об. %. Главными сульфидными минералами являются пирротин, миллерит и халькопирит; пентландит относится к второстепенным минералам. По химическому составу в руденении диагностировано 929 зерен минералов благородных металлов. Размер зерен варьирует от 2 до 20 мкм. МПМ большей частью (82 %) представляют собой включения в силикатах. Из них 55 % — самостоятельные включения и 27 % — сростания МПМ между собой. В сростании с сульфидами отмечено порядка 17 % минералов, а в виде включений в них — лишь единичные зерна. По относительной объемной распространенности МПМ-руды относятся к арсенидно-сульфидно-теллуридной минеральной ассоциации. В группу основных МПМ (> 10 об. %) входят стиллуотерит, торнроозит, высокоцит и котульскит (табл. 1; рис. 4, f—i).

Теллуриды платины и палладия из руденения второго типа (в отличие от первого) характеризуются составом, близким к стехиометрическому (рис. 6, b, c). Незначительные примеси олова и сурьмы устанавливаются в стиллуотерите $(\text{Pd}_{8.0-8.5}\text{Pt}_{0-0.1})_{8.0-8.5}(\text{As}_{2.4-3.0}\text{Te}_{0-0.2}\text{Sn}_{0-0.4} \times \text{Sb}_{0-0.2})_{2.5-3.0}$ и торнроозите $(\text{Pd}_{11.0-11.3}\text{Pt}_{0-0.2}\text{Bi}_{0-0.1})_{11.0-11.4} \times (\text{As}_{1.6-2.2}\text{Sn}_{0-0.2})_{1.7-2.3}(\text{Te}_{1.4-1.8}\text{Sb}_{0-0.5})_{1.5-1.9}$, что в целом характерно для системы Pd—As. Минеральная фаза MPh-2 $(\text{Pd}_{1.3-1.8}\text{Ag}_{0.3-0.8})_{2.0-2.1}(\text{Te}_{0.3-0.5}\text{Sn}_{0.3-0.4}\text{Se}_{0.1}\text{As}_{0-0.1})_{0.9}$ обладает наибольшей концентрацией олова. Необходимо отметить, что некоторые серебросодержащие минералы (сопчеит, MPh-2) встречаются здесь чаще, чем в первом типе руденения (табл. 1 и 2).

В составе руденения второго типа установлены арсенопалладинит $\text{Pd}_{8.0}(\text{As}_{2.6}\text{Sib}_{0.4})_{3.0}$ и изомертиит $\text{Pd}_{11.0-11.2} \times (\text{Sb}_{1.5-1.6}\text{Te}_{0.3})_{1.8-1.9}\text{As}_{2.1}$ — минералы, которые не отмечались ранее в Северном рифе (рис. 5, b, c).

Третий тип руденения представлен равномерной сульфидной вкрапленностью с содержанием сульфидов 5—7 об. %. В составе вкрапленности преобладают пирротин, пентландит и халькопирит. Доля халькопирита, как и в ОПТ, составляет 40—50 % от общего объема сульфидов. Несмотря на высокие концентрации ЭПГ, в этом типе руд встре-

Рис. 6. Тройные диаграммы составов (ат. %) Pd-Sn-Te (a), Pd-As-Sb (b), Pd-As-Te (c), Pd-Ag-Te (d). Черными точками обозначены идеальные составы известных минералов и минеральных фаз. Цветные значки — наши данные. Курсивом с чертой выделены синтетические минеральные фазы [10]. Сокращения минералов приведены в табл. 1, исключения: AgPn — аргентопентландит, Akn — акантит, Cstn — хрисстанлейт, Hes — гессит, Krv — кравцовит, Mrt II — мертиит II, Nal — налдреттит, Nau — науманнит, Sad — садбериит, Sbp — стибипалладинит

Fig. 6. Ternary diagram (at. %) Pd-Sn-Te (a), Pd-As-Sb (b), Pd-As-Te (c), Pd-Ag-Te (d) systems. Black dots indicate ideal compositions of known minerals and mineral phases. Color icons represent our data. Synthetic mineral phases [10] are italicized. Mineral abbreviations see tabl. 1, except: AgPn — argentopentlandite, Akn — acanthite, Cstn — chrisstanleyite, Hes — hessite, Krv — kravtsovite, Mrt II — mertieite II, Nal — naldrettite, Nau — naumannite, Sad — sudburyite, Sbp — stibiopalladinite

чено лишь 51 зерно минералов благородных металлов. Размер зерен колеблется от 1 до 10 мкм. В силикатах располагаются 64 % зерен, на границе силикат/сульфид — 24 %; включения в сульфидах образуют 12 % зерен. Сульфидно-теллуридная ассоциация МПМ, обусловленная набором основных по относительной объемной распространенности минералов (котульскит, мончеит и висоцкит), близка к ассоциации ОРТ (табл. 1; рис. 4, j–l). По данным анализов на энергодисперсионном спектрометре, МПМ из оруденения этого типа не содержат примесей, при расчете кристаллохимических формул состав минералов близок к стехиометрическому.

Сравнение основного и нижних рудных тел месторождения Каменник. Детальные исследования минерального состава ОРТ, проведенные на месторождениях Киевей [6] и Каменник [4], показали тесную пространственную и генетическую связь МПМ с сульфидами железа, меди и никеля. Более 70 % зерен МПМ крупнее 10 мкм включены в сульфиды или находятся на границе сульфидных и силикатных минералов. Для зерен МПМ меньшей размерности этот показатель снижается до 50 %. Среди нижних рудных тел по характеру микроассоциаций МПМ наиболее близок к ОРТ третий тип оруденения, в котором 36 % зерен напрямую контактируют или включены в сульфиды. В рудах первого и второго типов число таких зерен не превышает 20 %.

ОРТ на каждом из месторождений характеризуется преобладанием сульфидов и теллуридов ЭПГ, представленных бреггитом, висоцкитом, мончеитом, котульскитом и меренскиитом (табл. 1). В. В. Субботин с коллегами [6] отмечает, что состав доминирующих теллуридов ЭПГ отвечает стехиометрическому. Несмотря на относительно небольшое число обнаруженных зерен МПМ, третий тип нижних рудных тел обладает, как показывает табл. 1, такой же минеральной ассоциацией благородных металлов, как и ОРТ. Необходимо отметить, что теллуриды ЭПГ из оруденения третьего типа также не содержат нарушающих стехиометрию примесей (рис. 6, d).

Сходство минерального состава Северного рифа и нижнего рудного тела третьего типа приводит нас к предположению, что этот тип руд образовался в результате миграции обогащенной ЭПГ сульфидной жидкости в подстилающие кумулаты. По-видимому, это стало возможным благодаря локальному частичному плавлению последних (на уровне интеркумулусного пространства пород) при повышении температуры в связи с первыми дополнительными порциями рудоносной магмы, с которой связывают образование НРГ [3, 5]. Локальность плавления определялась существующими вблизи питающего магматического канала градиентами скорости течения и температуры магмы, которые, по всей вероятности, ответствен-

Таблица 3. Состав основных МПМ (мас. %) из нижних рудных тел месторождения Северный Каменник

Table 3. Composition of common platinum group minerals (wt. %) from the lower ore bodies of the North Kamennik deposit

Минерал Mineral	Pd	Pt	Te	Bi	S	Fe	Ni	Pb	As	Sn	Сумма Total
Kot	40.42		43.4	9.04		0.32					93.18
Kot	39.82		43.05	7.91		0.81		1.43			93.02
Kot	40.83		44.19	7.28		0.4		1.96			94.66
Mer	23.66	2.19	52.78	13.19							91.82
Mer	24.04	2.13	51	12.77							89.94
Mer	28.32		55.7	8.66							92.68
Mon		34.88	49.06	3.76		0.7		0.85			89.25
Mon	0.17	35.47	46.5	7.41		1.18		0.8			91.53
Mon	1.25	34.05	51.38	1.46		0.62		1.23			89.99
Vys	59.58	2.77			20.92	0.73	5.04				89.04
Vys	58.86	1.11			20.41	0.36	5.95				86.69
Vys	69.04	1.02			22.49	0.71	6.02				99.28
Br	0.19	68.39			10.76		0.64				79.98
Br	15.48	46.64			13.49	0.38	3.48				79.47
Br	14.52	49.88			13.67	0.33	3.84				82.24
Stl	70.57								15.96		86.53
Stl	68.18								14.47	1.03	85.46 ¹
Stl	66.83		2.13						15.32	0.73	85.78 ²
Tor	65.43	0.49	7.89			1.03		5.94			90.60 ³
Tor	64.45		10.85			0.94		5.26			87.59 ⁴
Tor	64.35		12.44			0.57		6.22		2.4	88.07 ⁵
Rust	17.97	47.02				0.45				16.97	82.41

Примечание. Сокращение названий минералов — см. табл. 1; ¹⁻⁵ — в сумму включена Sb (мас. %): ¹ — 1.78; ² — 0.77; ³ — 9.82, ⁴ — 6.09; ⁵ — 2.09.

Note. Abbreviation of mineral names — see Table 1; ¹⁻⁵ — Sb included in total (wt. %): ¹ — 1.78; ² — 0.77; ³ — 9.82, ⁴ — 6.09; ⁵ — 2.09.

ны за формирование синформных перегибов и перекристаллизованных такситовых габброноритов в русловых фациях НРГ [2].

Положение нижних рудных тел первого и второго типов в разрезе указывает на возможность их формирования также в процессе просачивания сульфидной жидкости вниз от уровня движущегося магматического потока. Различия с ОРТ в минеральном составе (табл. 1 и 2), как и обогащение МПМ оловом и другими примесями, можно объяснить процессами переработки ранней сульфидной вкрапленности в результате серии дополнительных рудоносных магматических импульсов. Судя по количеству ритмических единиц в НРГ на месторождении Киевей [8], таких импульсов при его формировании было не менее четырех.

Редкие и новые минеральные виды. Как отмечалось выше, первый и второй типы нижних рудных горизонтов Северного рифа содержат редкий минерал койоненит и минеральные фазы MPh-1 и MPh-2, принадлежащие системе Pd — Sn — Te. В эксперименте [10] в системе Pd — Sn — Te были идентифицированы три тройные фазы: фаза A — Pd₆₇Sn₁₁Te₂₂, фаза B — Pd₇₂Sn₁₆Te₁₂ и фаза C — PdSnTe (рис. 6, а). Фаза A впоследствии была переведена в статус минерального вида — койоненита [9]. Было установлено, что синтетический койоненит стабилен до 596 °C, поэтому его присутствие в природных минеральных ассоциациях может свидетельствовать о кристаллизации при этой или более низкой температуре.

По данным эксперимента в той же системе, койоненит не может сосуществовать только с такими минерала-

ми ЭПГ, как котульскит, теллуropалладинит и паоловит. В системе присутствуют бинарные фазы состава Pd₃Te₂ и Pd₂₀Te₇, а также тройная фаза Pd₇₂Sn₁₆Te₁₂ (рис. 6, а), которые могут возникнуть в ассоциации с койоненитом в природе [10]. В результате наших исследований были установлены несколько неизвестных ранее природных соединений палладия, теллура и олова. Среди них минеральная фаза MPh-2 (Pd_{1.8}Ag_{0.3})_{2.1}(Te_{0.5}Sn_{0.4}Se_{0.1}As_{0.1})_{1.1} из второго типа оруденения близка по составу к минеральной фазе B, а MPh-1 при пересчете на пять формульных единиц Pd_{3.2}(Te_{1.4}Bi_{0.3}As_{0.2})_{1.9} — к синтетически полученному соединению Pd₃Te₂ (рис. 6, а).

Таким образом, изучение МПМ из нижних рудных тел первого и второго типов показывает высокие перспективы детального изучения их разрезов для выявления новых и редких минералов.

Практическое значение. Федорово-панский комплекс — один из крупнейших платиноносных интрузивов в Европе наряду с Мончегорским комплексом на Кольском полуострове и комплексом Портимо в Финляндии [1]. При этом шестая часть его запасов связана с Северным рифом. Каждый из нижних типов оруденения Северного рифа в виде серии линз, «висящих» в данный момент на единичных скважинах, участвуют в подсчете запасов месторождения Каменник [4]. Во время дальнейшей разведки и эксплуатации месторождения установленные минералогические отличия могут быть использованы при выделении рудных тел разного генезиса и промышленного значения.

К примеру, первый тип оруденения, в котором рустенбургит имеет статус основного минерала, можно отличить от остальных, включая ОРТ, где станниды встречаются лишь в единичных зернах. Кроме того, этот тип руд, вероятнее всего, будет резко отличаться по геохимии рассеянных элементов (As, Sb, Sn и др.).

Заключение

Проведенные минералогические исследования подтверждают разделение нижних рудных тел месторождения Северный Каменник на три типа и позволяют различать их по ассоциациям МПМ — станнидно-теллуридной, арсенидно-сульфидно-теллуридной и сульфидно-теллуридной. При изучении двух первых ассоциаций нами было установлено три новых для Северного рифа минерала: арсенопалладинит, изомертит и койоненит. Эти ассоциации являются перспективными на обнаружение новых минеральных видов в системе Pd — Sn — Te.

Авторы благодарят А. У. Корчагина за доступ к ядру скважин. Обсуждение первоначального варианта статьи с Ю. С. Полеховским и В. В. Субботиным, а также конструктивные критические замечания двух анонимных рецензентов привели к улучшению ее качества. Исследования проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты 16-05-00367, 15-35-20501) в рамках госзадания № 0231-2015-0002.

Литература

1. Гурская Л. И., Додин Д. А. Минеральные ресурсы платиновых металлов России: перспективы расширения // Региональная геология и металлогения. 2015. № 64. С. 84—93.
2. Иванов А. Н., Грошев Н. Ю., Корчагин А. У. Трансгрессивные структуры Нижнего расслоенного горизонта на участке малосульфидного платинометалльного месторождения Северный Каменник // Труды ФНС. 2018. № 15. С. 156—159.
3. Корчагин А. У., Субботин В. В., Митрофанов Ф. П., Минева С. Д. Платинометалльное месторождение Киевей в Западно-Панском расслоенном массиве: геологическое строение и состав оруденения // Стратегические минеральные ресурсы — основа устойчивого развития Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. С. 12—33.
4. Корчагин А. У., Гончаров Ю. В., Субботин В. В., Грошев Н. Ю., Габов Д. А., Иванов А. Н., Савченко Е. Э. Геология и вещественный состав руд малосульфидного платинометалльного месторождения Северный Каменник в Западно-Панском массиве (Кольский полуостров, Россия) // Руды и металлы. 2016. № 1. С. 42—51.
5. Латыпов Р. М., Чистякова С. Ю. Механизм дифференциации расслоенного интрузива Западно-Панских тундр. Апатиты: КНЦ РАН, 2000. 315 с.
6. Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометалльная минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1. С. 55—66.
7. Чернявский А. В., Грошев Н. Ю., Корчагин А. У., Шиловских В. В. Минералы элементов платиновой группы в разрезе Южного рифа Западно-Панского массива // Труды ФНС. 2018. № 15. С. 392—395.
8. Groshev N. Yu., Rundkvist T. V., Korchagin A. U., Ivanov A. N. Concentrations of trace elements in rocks of the Lower

layered horizon of the West-Pana intrusion / Abstracts, 12th International Platinum Symposium. Ekaterinburg. 2014. P. 65—66.

9. Stanley C. J., Vymazalova A. Kojonenite, a new palladium tin telluride mineral from the Stillwater Layered Igneous Intrusion, Montana, U.S.A. // *American Mineralogist*. 2015. V. 100. P. 447—450.

10. Vymazalova A., Drabek M. The system Pd — Sn — Te at 400° C and mineralogical implications. II. The ternary phases // *The Canadian Mineralogist*. 2010. V. 48. № 5. P. 1051—1058.

References

1. Gurskaya L. I., Dodin D. A. *Mineralnyye resursy platinovykh metallov Rossii: perspektivy rasshireniya* (Mineral resources of platinum metals of Russia: perspectives for enlargement). Regional geology and metallogeny, 2015, No. 64, P. 84—93.
2. Ivanov A. N., Groshev N. Yu., Korchagin A. U. *Transgressivnyye struktury Nizhnego rassloennogo gorizonta na uchastke malosulfidnogo platinometal'nogo mestorozhdeniya Severnyy Kamennik* (Transgressive structures of the Lower layered horizon on the site of the Northern Kamennik low-sulfide PGE deposit). Trudy FNS, 2018, No. 15, P. 156—159.
3. Korchagin A. U., Subbotin V. V., Mitrofanov F. P., Mineev S. D. *Platinometalloye mestorozhdeniye Kiyevy v Zapadno-Panskom rassloennom massive: geologicheskoye stroeniye i sostav orudeneniya* (Kiev PGE-bearing deposit of the West-Pana layered intrusion: geological structure and ore composition). Strategic Mineral Resources of Lapland — Base for the Sustainable Development of the North. Apatity: KSC RAS, 2009, P. 12—33.
4. Korchagin A. U., Goncharov Yu. V., Subbotin V. V., Groshev N. Yu., Gabov D. A., Ivanov A. N., Savchenko Y. E. *Geologiya i veshchestvennyy sostav rud malosulfidnogo platinometal'nogo mestorozhdeniya Severnyy Kamennik v Zapadno-Panskom massive* (Geology and composition of the ores of the low-sulfide North Kamennik PGE deposit in the West-Pana intrusion). Ores and Metals. 2016, No. 1, P. 42—51.
5. Latypov R. M., Chistyakova S. Y. *Mekhanizm differentsiatsii rassloennogo intruziva Zapadno-Panskikh tundr* (Mechanism of differentiation of the West-Pana layered intrusion). Apatity: KSC RAS, 2000, 315 pp.
6. Subbotin V. V., Korchagin A. U., Savchenko Y. E. *Platinometal'naya mineralizatsiya Fedorovo-Panskogo rudnogo uzla: tipy orudeneniya, mineralnyy sostav, osobennosti genezisa* (PGE mineralization of the Fedorovo-Pana ore complex: types of mineralization, mineral composition, features of genesis). Herald of the Kola Science Center of the RAS, 2012, No. 1, P. 55—66.
7. Chernyavsky A. V., Groshev N. Yu., Korchagin A. U., Shilovskikh V. V. *Mineraly elementov platinovoy gruppy v razreze Yuzhnogo rifa Zapadno-Panskogo massiva* (Minerals of platinum group elements in the section of the South Reef, West-Pana intrusion). Proceedings of the FSS, 2018, I. 15, P. 392—395.
8. Groshev N. Yu., Rundkvist T. V., Korchagin A. U., Ivanov A. N. Concentrations of trace elements in rocks of the Lower layered horizon of the West-Pana intrusion / Abstracts, 12th International Platinum Symposium. Ekaterinburg, 2014, P. 65—66.
9. Stanley C. J., Vymazalova A. Kojonenite, a new palladium tin telluride mineral from the Stillwater Layered Igneous Intrusion, Montana, U.S.A. *American Mineralogist*, 2015, V. 100, P. 447—450.
10. Vymazalova A., Drabek M. The system Pd—Sn—Te at 400° C and mineralogical implications. II. The ternary phases. *The Canadian Mineralogist*, 2010, V. 48, No. 5, P. 1051—1058.