

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228-2018-10-1-96-106

УДК 549.27 (470.21)

РЕДКИЕ МИНЕРАЛЫ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ГЛУБИННОМ ПЛАТИНОНОСНОМ КСЕНОЛИТЕ ИЗ ВОЛЧЬЕТУНДРОВСКОГО ГАББРО-АНОРТОЗИТОВОГО МАССИВА КОЛЬСКОГО РЕГИОНА

В. В. Чашчин, Е. Э. Савченко

Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН

Аннотация

Представлены новые данные по минеральному составу редких минералов благородных металлов, обнаруженных в платиноносном глубинном ксенолите вебстерит-плагиевбстеритового состава из Волчъетундровского габбро-анортозитового массива на Кольском п-ове. В результате проведенного исследования в вебстерите центральной зоны ксенолита в ассоциации, главным образом с халькопиритом, были обнаружены луккулайсваарит ($Pd_{14}Ag_2Te_9$), тетрааурикуприд ($CuAu$) и неназванная фаза Ag_2AuTe_2 . В плагиевбстерите краевой зоны ксенолита определены хрисстанлейит ($Ag_2Pd_3Se_4$), звягинцевит (Pd_3Pb), торнроозит ($Pd_{11}As_2Te_2$) и неназванная фаза $(Pd,Pt)_6(Cu,Fe)_3Te(I,Cl)$. Полученные данные существенно дополняют информацию о составе благороднометалльной минерализации глубинного ксенолита и отражают специфику ее формирования. Согласно имеющимся минеральным ассоциациям и фазовым соотношениям, большинство из этих редких минералов образовалось при температуре 450–350 °С и ниже.

Ключевые слова:

Волчъетундровский габбро-анортозитовый массив, минералы благородных металлов, луккулайсваарит, тетрааурикуприд, хрисстанлейит, звягинцевит, торнроозит, платиноносный глубинный ксенолит, вебстерит.

RARE TRACE MINERALS OF PRECIOUS METALS IN DEEP PLATINUM-BEARING XENOLITH FROM VOLCHETUNDRA GABBRO-ANORTHOSITE MASSIF OF THE KOLA REGION

Victor V. Chashchin, Eugene E. Savchenko

Geological Institute of the KSC of the RAS

Absract

The article provided the new data on mineral composition of rare trace minerals of precious metals detected in a PGE-bearing deep xenolith containing websterite and plagiowebsterite from the Volchetundra gabbro-anorthosite massif on the Kola Peninsula. Lukkulaisvaarite ($Pd_{14}Ag_2Te_9$), tetraauricupride ($CuAu$) and an unnamed phase Ag_2AuTe_2 have been discovered in websterite from the central part of the xenolith in association with chalcopyrite mainly. Chrisstanleyite ($Ag_2Pd_3Se_4$), zvyagintsevite (Pd_3Pb), tornroosite ($Pd_{11}As_2Te_2$) and an unnamed phase $(Pd,Pt)_6(Cu,Fe)_3Te(I,Cl)$ have been defined in plagiowebsterite from the marginal zone of xenolith. The obtained data significantly amplify information on the composition of the precious metal mineralization of the deep xenolith and reflect its specific evolution. According to existing mineral assemblages and phase relations, most of these rare trace minerals formed at a temperature of 450–350° C and below.

Keywords:

Volchetundra gabbro-anorthosite massif, minerals of noble metals, lukkulaisvaarite, tetraauricupride, chrisstanleyite, zvyagintsevite, tornroosite, platinum-bearing deep xenolith, websterite.



Введение

В центральной части Кольского п-ова, в пределах Мончегорского рудного района, в Волчъетундровском габбро-анортозитовом массиве встречен глубинный ксенолит вебстерит-плагиевбстеритового состава с сульфидной вкрапленностью и высокими содержаниями элементов платиновой группы (ЭПГ). Он был обнаружен в 2003 г. в ходе проведения в пределах массива поисковых работ на платиноиды. Ксенолит расположен в северной части Волчъетундровского массива габбро-анортозитов, в водораздельной части хребта Волчьих тундр, в 1,3 км к северу от наиболее высокой возвышенности хребта — г. Юкспор с отметкой 976,7 м ($68^{\circ}11'11''$ с. ш., $32^{\circ}23'14''$ в. д.). Волчъетундровский массив слагает среднюю часть комплекса автономных анортозитов Главного хребта, маркирующего тектонический шов между двумя главными геологическими структурами региона — Кольским блоком и Беломорским подвижным поясом (рис. 1). Он имеет протяженность 24 км при ширине от 500 м до 4 км (рис. 1, а). В его строении выделяются две зоны: краевая, сложенная мелко-среднезернистыми норитами, габбро-норитами и плагииортопироксенитами и главная, представленная средне-крупнозернистыми лейкогаббро, лейкогабброноритами и анортозитами. Возраст пород массива определен U-Pb-методом по циркону и составляет около 2470 млн лет [1]. К норитам и плагииортопироксенитам восточной краевой зоны Волчъетундровского массива приурочено малосульфидное Pt-Pd-оруденение [2].

Геологическое строение глубинного ксенолита

В плане ксенолит имеет овальную форму размером $8,5 \times 4$ м, вытянутую по длинной оси в субширотном направлении (рис. 1, б), дискордантно относительно меридиональной ориентировки Волчъетундровского массива, и залегает среди средне-крупнозернистых мезо-лейкократовых габбро-норитов его главной зоны. Контакты ксенолита с вмещающими породами крутопадающие, четкие и довольно резкие. Макроскопически ксенолит представлен довольно однородными, плотными, массивными мелко-среднезернистыми породами темно-серого цвета. В результате микроскопического изучения пород ксенолита в его строении выделены две зоны — центральная и краевая.

Центральная зона размером 4×3 м (рис. 1, б) сложена мелко-среднезернистыми плагииортопироксенитами содержащими амфиболизированными вебстеритами, состоящими из ортопироксена (20–30 об. %) — бронзита Fs_{21-27} , клинопироксена (20 об. %) — низкотитанистого диопсида $En_{43-46}Fs_8Wo_{46-49}$, реликтов плагииортопироксена (до 5 об. %) — анортита $An_{97}Ab_3$ и бледно-зеленого амфибола (40–45 об. %), развивающегося по пироксенам. В виде редких зерен в породе присутствует оливин (хризолит Fa_{22}), а также мелкая вкрапленность сульфидов пентландит-пирротин-халькопиритового состава (от 1–2 до 5 об. %). Структура вебстеритов панидиоморфнозернистая с фрагментами псевдоморфной и участками келифитовой.

Краевая зона мощностью 1–1,5 м (рис. 1, б) образована слабоамфиболизированными плагиевбстеритами с редкими зернами оливина. От вебстеритов центральной зоны они отличаются повышенным (до 10–15 об. %) содержанием более кислого плагииортопироксена (битовнит $An_{71-74}Ab_{26-29}$), более железистыми пироксенами — авгитом ($En_{41-43}Fs_{13-16}Wo_{43-44}$) и гиперстеном (Fs_{30-34}), а также оливином (Fa_{25}) и слабой степенью амфиболизации. Плагиевбстериты также содержат мелкую вкрапленность сульфидов, но в меньшем количестве (не более 1–2 об. %), чем в вебстеритах центральной зоны.

В породах ксенолита выявлены высокие содержания ЭПГ, составляющие около 10 г/т в вебстерите центральной зоны и 3 г/т в плагиевбстерите краевой зоны, при величинах Pd/Pt, равных 0,83 и 1,38 соответственно.

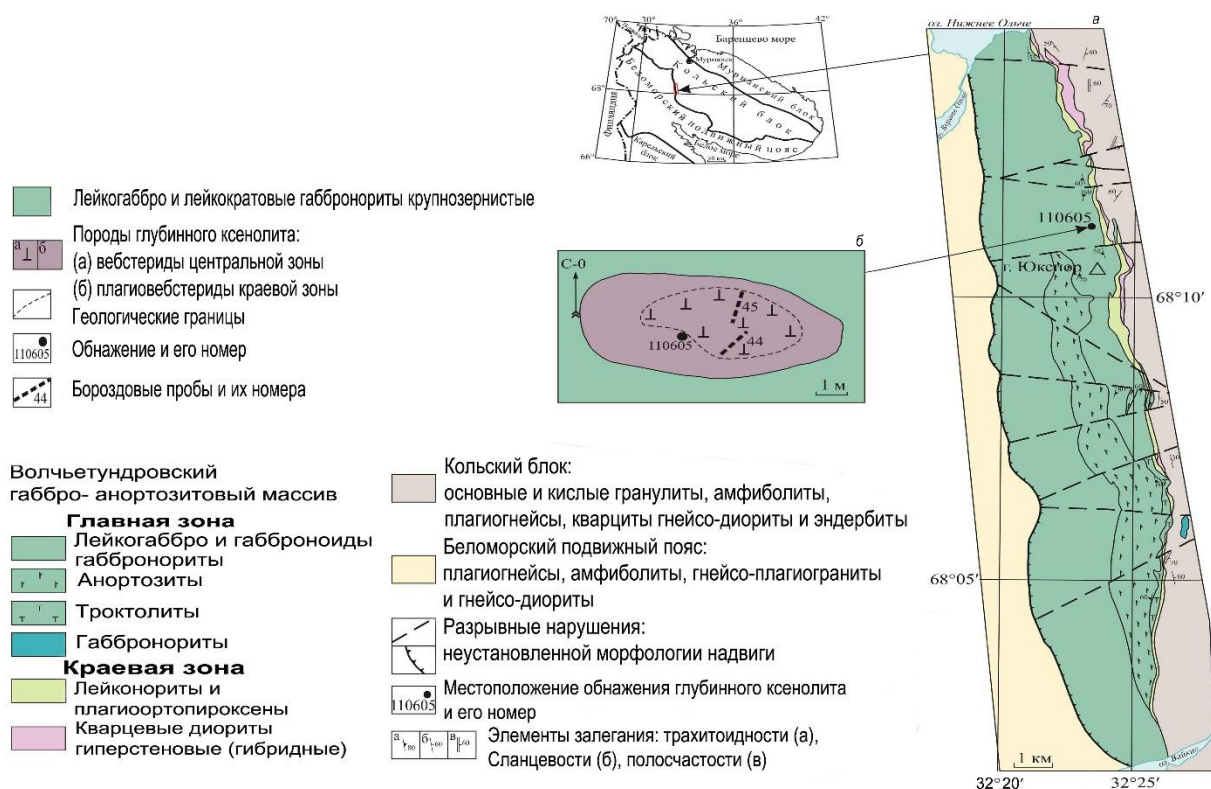


Рис. 1. Схема геологического строения Волчьетундровского габбро-анортозитового массива, по [1] с изменениями (а) и план обнажения глубинного ксенолита (б)

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Volchyetundrovsky gabbro-anorthosite massif, after [1] with changes (a) and a plan of a deep-seated xenolith exposure (б)

Минеральный состав благородных металлов в породах ксенолита характеризуется большим разнообразием фаз (около 40), среди которых преобладают теллуриды и висмутотеллуриды (мончеит, котульскит, сопчеит, кейтконнит и теллурупалладинит), самородные элементы и сплавы (Fe-Pt, электрум, самородное золото, Cu-Pt-Pd), реже сульфиды Pt и Pd (куперит, брэггит и высокоцит). В единичных случаях встречены редкие минералы Pd, Au и Ag, изучение состава которых и является целью данного исследования.

Методика исследований

В качестве исходного материала исследования были использованы образцы, отобранные из бороздовой пробы 45 вебстерита центральной зоны ксенолита и обнажения 110605 плагиовестерита краевой зоны. Исследуемые минеральные фазы имеют крайне малые размеры ($\leq 1-3$ мкм), поэтому они охарактеризованы лишь приблизительно (полуколичественно), на основе оценок составов, приведенных к 100 мас. %. Эти результаты получены при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO-1450 (СЭМ), снабженного энергодисперсионным спектрометром Bruker X Flash-5010 и программным обеспечением QUANTAX-200. Вследствие незначительных размеров исследуемых фаз неизбежно попадание в спектр элементов вмещающего их минерала. В случае наличия одного и того же элемента в обеих фазах вначале проводился расчет состава по результирующему спектру, затем из результата вычитался вклад

элементов материнской фазы в соответствии с ее химическим составом и производился перерасчет, результат которого и принимался за химический состав исследуемой микрофазы. Снимки изученных минералов были выполнены с помощью СЭМ в режиме обратно-рассеянных электронов.

Результаты исследований

Среди минералов благородных металлов вебстерита центральной зоны ксенолита были обнаружены такие редкие минералы, как луккулайсваарит и тетрааурикуприд, а также неназванный сплав состава Ag_2AuTe_2 .

Луккулайсваарит ($\text{Pd}_{14}\text{Ag}_2\text{Te}_9$) — весьма редкий минерал, который впервые был обнаружен в расслоенном массиве Луккулайсваара в Северной Карелии [3], а впоследствии в Федорово-Панском расслоенном комплексе [4]. Данная находка луккулайсваарита является третьей в России. В вебстерите глубинного ксенолита обнаружено три зерна луккулайсваарита размером 4×1 , 3×1 и 8×3 мкм неправильной вытянутой формы среди халькопирита в сростании с котульскитом (рис. 2, а) и электрумом (рис. 2, б). Кроме того, он входит в состав сложного сростка размером 10×9 мкм, включающего также котульскит, мончеит и электрум (рис. 2, в).

Химический состав всех трех зерен луккулайсваарита не содержит примесей, описывается кристаллохимической формулой в пересчете на сумму 25 атомов в формуле минерала $\text{Pd}_{13,1-13,7}\text{Ag}_{2,0-2,1}\text{Te}_{9,0}$ (табл. 1), согласно которой он незначительно отклоняется от стехиометрии луккулайсваарита, ранее описанного А. Вымазаловой с соавторами [3], за счет незначительного дефицита Pd.

Тетрааурикуприд (CuAu) для платинометаллических месторождений не характерен, хотя и был впервые обнаружен К. Ченом с соавторами [5] в платиноносных основных-ультраосновных породах массива Сардал в Китае. Обычно он встречается в гидротермальных месторождениях золота [6], хотя известен и в рудах Норильска [7, 8]. В вебстерите глубинного ксенолита было обнаружено три зерна тетрааурикуприда: на краю зерна халькопирита (рис. 2, з), в сростании с халькопиритом и неназванной фазой $\text{Cu}_5\text{Fe}_3\text{S}_6$ — располагался на краю минералов-хозяев (рис. 2, д), а также среди силикатов вблизи с мелким зерном халькопирита (рис. 2, е). В первом случае тетрааурикуприд имеет полигональную форму с частично хорошо оформленными гранями размером $1,6 \times 1,4$ мкм (рис. 2, з), во втором — неправильную, близкую к каплевидной, размером 3×2 мкм (рис. 2, д), а в третьем — пластинчатую размером 3×1 мкм (рис. 2, е). Химический состав этих зерен близок ранее описанному тетрааурикуприду [5], отличается от него переменным содержанием Cu и Au, а также присутствием примесей Pd, Ag и Fe, реже Ni (табл. 1). Их кристаллохимическая формула в пересчете на два атома формулы минерала соответственно равна (табл. 1): $(\text{Cu}_{0,86}\text{Pd}_{0,09})_{0,95}(\text{Au}_{1,04}\text{Ag}_{0,01})_{1,05}$, $(\text{Cu}_{0,95}\text{Pd}_{0,06}\text{Fe}_{0,06})_{1,07}(\text{Au}_{0,89}\text{Ag}_{0,04})_{0,93}$ и $(\text{Cu}_{1,0}\text{Fe}_{0,06}\text{Pd}_{0,05}\text{Ni}_{0,01})_{1,12}\text{Au}_{0,88}$.

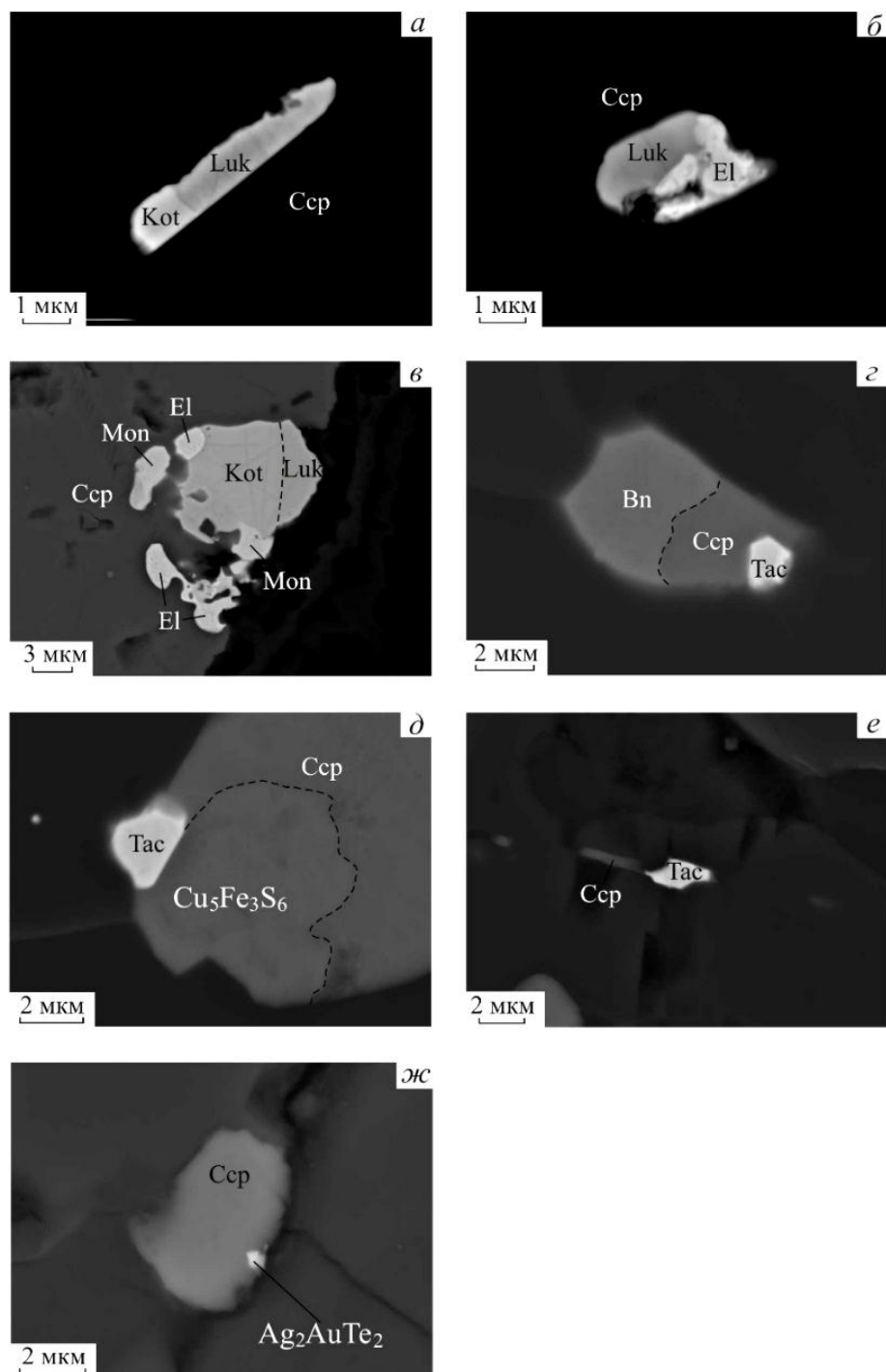


Рис. 2. Изображение в обратно-рассеянных электронах редких минералов благородных металлов из вебстерита центральной зоны глубинного ксенолита в Волчьегундровском габбро-анортозитовом массиве:
а-в — луккулайсваарит (Luk) в сростании с котульскитом (Kot) и электрумом (El) среди халькопирита (Ccp);
г-е — тетрааурикуприд (Tac) на границе халькопирита (Ccp) и unnamed минерала состава $Cu_5Fe_3S_6$;
ж — сплав состава Ag_2AuTe_2 в халькопирите (Ccp)

Fig. 2. BSE-image of rare minerals of precious metals from websterite in the central zone of deep-seated xenolith in the Volchyetundrovsky gabbro-anorthosite massif:
a-b — lulkulaisvaarite (Luk) intergrown with kotulskite (Kot) and electrum (El) among chalcopyrite (Ccp);
г-e — tetra-auricupride (Tac) at the boundary with chalcopyrite (Ccp) and an unnamed mineral composed of $Cu_5Fe_3S_6$;
ж — alloy composed of Ag_2AuTe_2 in chalcopyrite (Ccp)

Химический состав редких минералов благородных металлов из вебстерита центральной зоны глубинного ксенолита в Волчъетундровском габбро-анортозитовом массиве, мас. %

Chemical composition of rare minerals of precious metals from websterite in the central zone of deep-seated xenolith in the Volchyetundrovsky gabbro-anorthosite massif, wt. %

Элементы Elements	Луккулайсваарит Pd ₁₄ Ag ₂ Te ₉ Lukkulaisvaaraite Pd ₁₄ Ag ₂ Te ₉			Тетрааурикуприд CuAu Tetra-auricupride CuAu			Фаза Ag ₂ AuTe ₂ Phase Ag ₂ AuTe ₂
	45-4	45-5	45-6	45-3	45-4	45-9	45-1
Pd	50,5	51,4	51,2	3,7	2,5	2,2	–
Au	–	–	–	75,6	70,1	70,1	28,1
Ag	7,9	8,0	7,9	0,50	1,8	–	32,0
Cu	–	–	–	20,2	24,1	26,0	–
Ni	–	–	–	–	–	0,20	–
Te	41,6	40,6	40,9	–	–	–	37,7
Fe	–	–	–	–	1,5	1,5	–
Se	–	–	–	–	–	–	2,2
Сумма Sum	100,0	100,0	100,0	100,00	100,0	100,00	100,0
Коэффициенты в формулах минералов, к. ф. Coefficients in mineral formulas, c. f.							
Pd	13,1	13,7	13,5	0,09	0,06	0,05	–
Au	–	–	–	1,04	0,89	0,88	0,94
Ag	2,0	2,1	2,1	0,01	0,04	–	1,94
Cu	–	–	–	0,86	0,95	1,0	–
Ni	–	–	–	–	–	0,01	–
Te	9,0	9,0	9,0	–	–	–	1,94
Fe	–	–	–	–	0,06	0,06	–
Se	–	–	–	–	–	–	0,18
Сумма Sum							
катионов cations	15,1	15,8	15,6	0,95	1,07	1,12	2,88
анионов anions	9,0	9,0	9,0	1,05	0,93	0,88	2,12

Фаза Ag₂AuTe₂ представляет собой наименьший по размеру минерал среди описанных выше. Он расположен на краю зерна халькопирита и имеет близкую к изометричной форму диаметром 0,6 мкм (рис. 2, ж). Относится к теллуридам золота и серебра и по химическому составу (табл. 1) наиболее близок петциту (Ag₃AuTe₂) — минералу гидротермального происхождения, который обычно развит в кварцево-сульфидных жилах, связанных с месторождениями золота, отличаясь от него меньшим содержанием Ag и большим — Te, а также примесью Se. Кристаллохимическая формула этого минерала (в пересчете на пять атомов) имеет вид: Ag_{1,94}Au_{0,94}(Te_{1,94}Se_{0,18})_{2,12} (табл. 1).

В составе минералов благородных металлов, присутствующих в плагиовевбстерите краевой зоны глубинного ксенолита, были выявлены такие редкие минералы, как хрисстанлейит, звягинцевит, торнроозит и необычная минеральная фаза состава (Pd,Pt)₆(Cu,Fe,Ni)₂Te(I,Cl).

Хрисстанлейит ($\text{Ag}_2\text{Pd}_3\text{Se}_4$) впервые был обнаружен в золотосодержащих карбонатных жилах в среднедевонских известняках Англии [9] и позднее среди малахит-кварцевой породы небольшого полиметаллического месторождения жильного типа Куппер Хилл региона Восточная Пилбара, Западная Австралия [10]. Встреченный нами хрисстанлейит в плагиовестерите глубинного ксенолита является первой находкой в России. Было обнаружено два зерна хрисстанлейита внутри халькопирита. Первое зерно размером 2×1 мкм неправильной, полигональной формы, близкой к пластинчатой (рис. 3, а), и второе размером 1×0.7 мкм вытянутого каплевидного очертания (рис. 3, б).

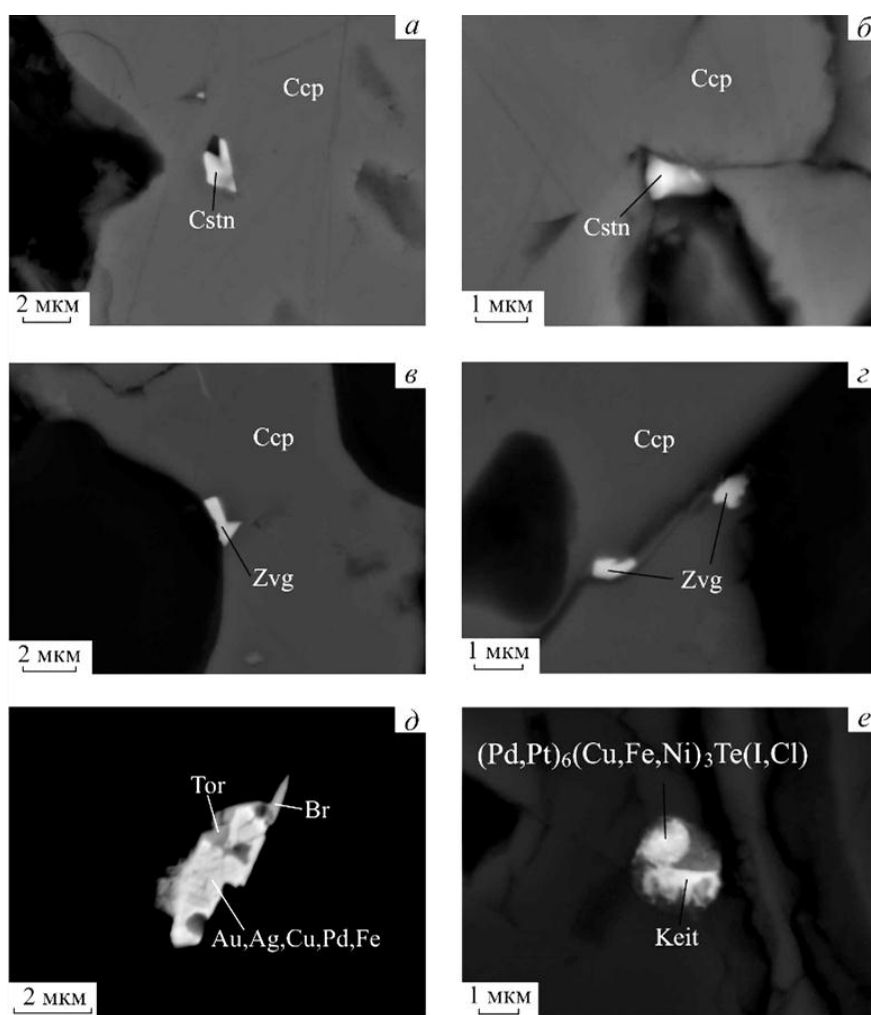


Рис. 3. Изображение в обратно-рассеянных электронах редких минералов благородных металлов из плагиовестерита краевой зоны глубинного ксенолита в Волчьетундровском габбро-анортозитовом массиве: а-б — зерна хрисстанлейита (Cstn) в халькопирите (Ccp); в-г — зерна звягинцевита (Zvg) в халькопирите (Ccp); д — торнроозит (Tor) в сравнении с брэггитом (Br) и сплавом состава Au, Ag, Cu, Pd, Fe на краю зерна гидрооксида железа; е — минеральная фаза $(\text{Pd, Pt})_6(\text{Cu, Fe, Ni})_3\text{Te}(\text{I, Cl})$ в сростании с кейтконнитом (Keit)

Fig. 3. BSE-image of rare minerals of precious metals from plagiowebsterite at the edge deep-seated xenoliths in the Volchyetundrovsky gabbro-anorthosite massif:

а-б — grains of chrisstanleyite (Cstn) in chalcopyrite (Ccp); в-г — grains of zvyagintsevite (Zvg) in chalcopyrite (Ccp); д — tornroosite (Tor) intergrown with braggite (Br) and an alloy composed of Au, Ag, Cu, Pd, Fe at the edge of Fe hydroxide grain; е — mineral phase $(\text{Pd, Pt})_6(\text{Cu, Fe, Ni})_3\text{Te}(\text{I, Cl})$ intergrown with keithconnite (Keit)

Химический состав хрисстанлейита определен только в одном, сравнительно более крупном зерне. Согласно полученным данным, он близок составам известных хрисстанлейитов, отличаясь от них

повышенными содержаниями Pd и Ag и незначительной примесью Pt (табл. 2). Кристаллохимическая формула минерала в пересчете на девять атомов имеет вид (табл. 2): $\text{Ag}_{2,2}(\text{Pd}_{3,3}\text{Pt}_{0,03})_{3,33}\text{Se}_{4,0}$.

Звягинцевит (Pd_3Pb) впервые был обнаружен А. Д. Генкиным с соавторами в руде Норильского медно-никелевого месторождения [11], хотя он встречается довольно часто, особенно в платинопалладиевой руде расслоенных интрузий, тем не менее, относится к числу редких палладиевых минералов. Так, в Карело-Кольском регионе звягинцевит в виде единичных зерен выявлен в малосульфидных платинометалльных рудах некоторых расслоенных интрузий: Луккулайсваара [12], Панской тундры [13–15] и Федоровой тундры Федорово-Панского комплекса [16], а также Южной Сопчи Мончегорского комплекса [17]. Кроме того, он был обнаружен в платинопалладиевом рифе J-M комплекса Стиллуотер [18], Платрифе комплекса Бушвелльд [19], а также малосульфидном горизонте Рифа 1 Йоко-Довыренской расслоенной интрузии юга Сибирской платформы [20]. В плагиовестерите глубинного ксенолита это интерметаллическое соединение Pd и Pb было обнаружено на краю зерен халькопирита в виде кристалла полигональной формы размером 2×1 мкм (рис. 3, в), а также зерен линзовидной формы размером $1 \times 0,5$ мкм и округлой размером 0,5 мкм в диаметре (рис. 3, г). Его химический состав определен только для более крупного зерна, приведен в табл. 2 и характеризуется наличием примеси Au. Кристаллохимическая формула звягинцевита, рассчитанная на четыре атома в формуле минерала, имеет вид $(\text{Pd}_{2,93}\text{Au}_{0,06})_{2,99}\text{Pb}_{1,01}$ (табл. 2) и близка к идеальной стехиометрии.

Таблица 2

Table 2

Химический состав редких минералов благородных металлов из плагиовестерита краевой зоны глубинного ксенолита в Волчье-тундровском габбро-анортозитовом массиве, мас. %
Chemical composition of rare minerals of precious metals from plagiowebsterite at the edge of deep-seated xenolith in the Volchyetundrovsky gabbro-anorthosite massif, wt. %

Элементы Elements	Хрисстанлейит Chrisstanleyite $\text{Ag}_2\text{Pd}_3\text{Se}_4$	Звягинцевит Zvyagintsevite Pd_3Pb	Торнроозит Tornroosite $\text{Pd}_{11}\text{As}_2\text{Te}_2$	Фаза Phase $(\text{Pd,Pt})_6(\text{Cu,Fe})_3\text{Te}(\text{I,Cl})$
	110605-8	110605-9	110605-12	110605-7
Pt	0,62	–	–	21,8
Pd	38,6	58,4	73,9	45,6
Au	–	2,2	–	–
Ag	25,7	–	–	–
Cu	–	–	–	13,3
Ni	–	–	–	0,43
Fe	–	–	–	4,5
As	–	–	7,2	–
Sn	–	–	4,6	–
Pb	–	39,4	–	–
Te	–	–	14,3	11,9
Se	35,1	–	–	–
I	–	–	–	2,1
Cl	–	–	–	0,36
Сумма	100,02	100,0	100,0	99,99

Коэффициенты в формулах минералов, к. ф. Coefficients in mineral formulas, c. f.				
Pt	0,03	–	–	1,15
Pd	3,3	2,93	11,07	4,42
Au	–	0,06	–	–
Ag	2,2	–	–	–
Cu	–	–	–	2,16
Ni	–	–	–	0,08
Fe	–	–	–	0,84
As	–	–	1,53	–
Sn	–	–	0,61	–
Pb	–	1,01	–	–
Te	–	–	1,79	0,97
Se	4,0	–	–	–
I	–	–	–	0,28
Cl	–	–	–	0,10
Сумма Sum	–	–	–	–
катионов cations	5,53	2,99	11,07	8,65
анионов anions	4,0	1,01	3,93	1,35

Торнроозит ($Pd_{11}As_2Te_2$) впервые был обнаружен среди минералов тяжелой фракции речных отложений в Северной Лапландии, Финляндия [21] и впоследствии был описан в составе платинометалльного оруденения массива Южная Сопча Мончегорского комплекса [17] и Западно-Панской интрузии Федорово-Панского комплекса [15, 22]. В плагиовестерите глубинного ксенолита торнроозит был обнаружен в единственном зерне на краю кристалла гидроокисла железа в виде обособления неправильной формы размером $1 \times 0,6$ мкм в сростании со сплавом состава Au, Ag, Cu, Pd, Fe (рис. 3, д). В химическом составе торнроозита присутствует примесь Sn (табл. 2) и его кристаллохимическая формула, рассчитанная на 15 атомов в формуле минерала, равна $Pd_{11,07}(As_{1,53}Sn_{0,61})_{2,14}Te_{1,79}$ (табл. 2), отличаясь от идеальной стехиометрии дефицитом Te и As.

Фаза (Pd,Pt)₆(Cu,Fe)₃Te(I,Cl) была обнаружена в плагиовестерите среди силикатов совместно с кейтконнитом в виде зерна округлой каплевидной формы размером около 1 мкм в диаметре (рис. 3, е). Это минерал сложного состава, соединение Pd, Pt, Cu, Fe и Te с примесью Ni, специфической особенностью которого является присутствие таких летучих компонентов, как I и Cl (табл. 2). Это новый и весьма необычный факт в минералогии ЭПГ, поскольку до сих пор среди их минеральных фаз не были известны содержащие летучие компоненты. Химический состав минерала приведен в табл. 2, а его кристаллохимическая формула, рассчитанная на 10 атомов в формуле минерала, имеет вид $(Pd_{4,42}Pt_{1,15})_{5,57}(Cu_{2,16}Fe_{0,84}Ni_{0,08})_{3,08}Te_{0,97}(I_{0,28}Cl_{0,10})_{0,38}$.

Заключение

Обнаруженные в глубинном ксенолите редкие минералы благородных металлов и неназванные минеральные фазы, несмотря на то, что они обладают очень мелкими размерами и встречаются в незначительных количествах, чаще всего в единичных зернах, существенно дополняют информацию о составе благороднометалльной минерализации глубинного ксенолита,

а также о минералогии ЭПГ в широком плане и отражают специфику формирования минерализации благородных металлов на фоне главных минералов платиновой группы (МПГ). В частности, наличие йода и хлора в составе минеральной фазы $(\text{Pd,Pt})_6(\text{Cu,Fe})_3\text{Te}(\text{I,Cl})$ служит прямым свидетельством участия этих летучих компонентов в процессе платинометалльного минералообразования.

Преимущественная ассоциация благороднометаллических минералов с халькопиритом свидетельствует об их формировании в тесной связи с кристаллизацией насыщенной медью сульфидной жидкости, содержащей примеси микрокомпонентов Pd, Au, Ag, Te, Se, Pb и As. Поскольку Pd характеризуется низкой растворимостью в основных медных фазах — халькопирите и борните [23], то при их кристаллизации он выделяется в виде собственных соединений с халькофильными элементами, которые локализуются обычно на границе халькопирит-силикат, в условиях температурного градиента кристаллизации халькопирита.

Для некоторых охарактеризованных минералов предпринята попытка оценить условия образования на основании имеющихся минеральных ассоциаций и фазовых соотношений. Так, луккулайсварит в ассоциации с котульским стабилитом в диапазоне температур 450–383 °C [24], а верхний предел устойчивости тетраурикуприда составляет 390–385 °C [25]. Судя по ассоциации неназванной фазы $(\text{Pd,Pt})_6(\text{Cu,Fe})_3\text{Te}(\text{I,Cl})$ с кейтконнитом, который стабилит при 350 °C [24], температура их образования не превышает этой величины. Более неопределенными являются параметры образования звягинцевита, который может кристаллизоваться в широком диапазоне температур: от 900 до 320 °C [26, 27]. В то же время в медно-никелевых рудах Норильского рудного поля звягинцевит встречается в ассоциации с рустенбургитом и атоцитом среди МПГ средней стадии пневматолитового минералообразования, температура формирования которой оценивается в 450–350 °C [8]. Поэтому не исключено, что описанный нами звягинцевит также образовался в подобных условиях. Таким образом, большинство из охарактеризованных выше редких минералов образовалось при температуре 450–350 °C и ниже, при низкотемпературных условиях процесса благороднометалльного минералообразования, сопряженного, скорее всего, с завершающей стадией транспортировки пород глубинного ксенолита к поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волчѣтундровский массив комплекса автономных анортозитов главного хребта: геологическое строение, петрогеохимические особенности и изотопно-геохронологические исследования (Кольский полуостров, Россия) / В. В. Чащин [и др.] // Петрология. 2012. Т. 20, № 5. С. 514–540.
2. Чащин В. В., Петров С. В. Малосульфидные платиновые руды Волчѣтундровского массива габбро-анортозитов (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55, № 5. С. 415–442.
3. Lukkulaisvaaraite, $\text{Pd}_{14}\text{Ag}_2\text{Te}_9$, a new mineral from Lukkulaisvaara intrusion, northern Russian Karelia, Russia / A. Vymazalova [et al.] // Miner. Mag. 2014. Vol. 78, No. 7. P. 1743–1754.
4. Золото и серебро в составе платинометаллических руд Федорово-Панского интрузивного расслоенного комплекса / В. В. Субботин [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. № 1(9). С. 53–65.
5. Tetraauricupride, CuAu , discovered in China / K. Chen [et al.] // Sci. Geol. Sinica. 1982. Vol. 11, No. 1. P. 111–116.
6. Спиридонов Э. М., Ряховская С. К., Плетнев П. А. Гидротермальные минералы Au-Cu: парагенезисы, условия образования, синтез, твердофазные превращения // Материалы XV Рос. совещ. по экспериментальной минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2005. С. 314–316.
7. Спиридонов Э. М., Кулагов Э. А., Куликова И. М. Ассоциации минералов палладия, платины и золота в рудах Норильского месторождения // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46, № 2. С. 175–192.
8. Спиридонов Э. М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 1356–1378.
9. A new mineral, chrisstanleyite, $\text{Ag}_2\text{Pd}_3\text{Se}_4$, from Hope's Nose, Tarquay, Devon, England / W. H. Paar [et al.] // Miner. Mag. 1998. Vol. 62. P. 257–264.
10. Nickel E. H. An unusual occurrence of Pd, Pt, Au, Ag and Hg minerals in the Pilbara region of Western Australia // Canad. Miner. 2002. Vol. 40. P. 419–433.
11. Генкин А. Д., Муравьева И. В., Тронева Н. В. Звягинцевит — новое интерметаллическое соединение палладия, платины, свинца и олова // Геология рудных месторождений. 1966. Т. 8. С. 94–100.
12. Первая находка звягинцевита в Карело-Кольском регионе / А. Д. Барков [и др.] // ДАН СССР. 1991. Т. 318, № 3. С. 705–708.
13. Редкие минералы благородных металлов малосульфидных руд Федорово-Панского массива / Н. Л. Балабонин [и др.] // Вестник МГТУ. 2000. Т. 3, № 2. С. 205–210.
14. Габов Д. А. Минералы ЭПГ и Au из малосульфидных руд массива Панских тундр (Кольский полуостров) // Записки РМО. 2009. Ч. СXXXVIII, № 3. С. 112–118.
15. Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометаллическая минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения,

минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1. С. 55–66.

16. *Грошев Н. Ю., Савченко Е. Э.* Риф Невидимый — новый уровень малосульфидной платинометалльной минерализации в массиве Федоровой тундры, Кольский полуостров // Руды и металлы. 2011. № 5. С. 15–26.

17. Геологическое строение, минералогия и генезис ЭПГ-минерализации массива Южная Сопча, Мончегорский комплекс, Россия / *Т. Л. Гроховская [и др.]* // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54, № 5. С. 416–440.

18. The J-M platinum-palladium reef of the Stillwater complex, Montana: I. Stratigraphy and petrology / *S. G. Todd [et al.]* // Econ. Geol. 1982. Vol. 77. P. 1454–1480.

19. *Holwell D. A., McDonald I., Armitage P. E. B.* Platinum-group mineral assemblages in the Platreef at the Sandsloot Mine, northern Bushveld Complex, South Africa // Miner. Mag. 2006. Vol. 70 (1). P. 83–101.

20. благороднометалльная минерализация в расслоенных ультрабазит-базитовых массивах юга Сибирской платформы / *Н. Д. Толстых [и др.]*. Новосибирск: Параллель, 2008. 194 с.

21. Tornroosite, Pd₁₁As₂Te₂, a new mineral species related to isomertieite from Miessijoki, Finnish Lapland, Finland / *К. К. Kojonen [et al.]* // Canad. Miner. 2011. Vol. 49, No. 6. P. 1643–1651.

22. Минеральный состав оруденения нового платинометалльного месторождения Сев. Каменник, Зап.-Панский массив, Кольский п-ов / *В. В. Субботин [и др.]* // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона // Труды XII Всерос. (с междунар. участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 80-летию со дня рождения акад. РАН Ф. П. Митрофанова. Апатиты: К&М, 2015. С. 176–180.

23. Петрология сульфидного магматического рудообразования / *В. В. Дистлер [и др.]*. М.: Наука, 1988. 232 с.

24. The system Ag-Pd-Te: phase relations and mineral assemblages / *А. Vymazalova [и др.]* // Miner. Mag. 2015. Vol. 79, No. 7. P. 1813–1832.

25. *Okamoto H., Chakrabarti D. J., Laughlin D. E.* The Au-Cu (gold-copper) system // Bull. Alloy Phase Diagrams. 1987. Vol. 8. P. 453–474.

26. *Durusel Ph., Feschotte P.* The binary system Pb-Pd // J. Alloys and Compounds. 1996. Vol. 236, No. 1–2. P. 195–202.

27. Thermodynamics of the Pb-Pd system / *V. Vassiliev [et al.]* // J. Alloys and Compounds. 1998. Vol. 269, No. 1–2. P. 123–132.

Сведения об авторах

Чащин Виктор Васильевич — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН

E-mail: chashchin@geoksc.apatity.ru

Савченко Евгений Элланович — ведущий электроник Геологического института ФИЦ КНЦ РАН

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Viktor V. Chashchin — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: chashchin@geoksc.apatity.ru

Eugene E. Savchenko — Leading Electronic Engineer of Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Чащин, В. В. Редкие минералы благородных металлов в глубинном платиноносном ксенолите из Волчьеготундровского габбро-анортозитового массива Кольского региона / *В. В. Чащин, Е. Э. Савченко* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 1 (10). — С. 96–106.

Reference

Chashchin Victor V., Savchenko Eugene E. Rare Trace Minerals of Precious Metals in Deep Platinum-Bearing Xenolith from Volchetundra Gabbro-Anorthosite Massif of the Kola Region. *Herald of the Kola Science of the RAS*, 2018, vol. 1 (10), pp. 96–106. (In Russ.)