ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 498, № 1, с. 66–68

МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 549.324.35 + 552.18 (571.53/55)

НОВЫЙ – МЕТАМОРФОГЕННО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ ТИП ЗВЯГИНЦЕВИТА Pd_3Pb

© 2021 г. Э. М. Спиридонов*

Представлено академиком РАН Н.С. Бортниковым 18.01.2021 г.
Поступило 18.01.2021 г.
После доработки 15.03.2021 г.
Принято к публикации 16.03.2021 г.

Интерметаллид палладия и свинца – звягинцевит – относительно распространенный минерал магматогенных сульфидных руд Норильских месторождений и руд интрузивов Бушвелд, Кондёрский и Йоко-Довыренский. Это сравнительно высокотемпературный пневматолитовый минерал, член непрерывного ряда твердых растворов: рустенбургит Pt_3Sn – атокит Pd_3Sn – звягинцевит Pd_3Pb. Такой звягинцевит обычно содержит существенное количество Pt (до 13 мас. %) и Sn (до 11 мас. %), может содержать до 5–8 мас. % Au и заметное количество Bi, Hg, Te, Sb, Ge. Его интегральный состав отвечает $(Pd, Pt, Au)_3(Pb, Sn, Bi, Sb, Hg, Ge)_1$. В метаморфизованных пентландит-путоранитовых рудах глубоких горизонтов северного фланга Октябрьского месторождения Норильского рудного поля изучен звягинцевит иного типа. Это почти беспримесный звягинцевит состава Pd_3Pb, развитый в гнездах и прожилках низкотемпературных метаморфогенно-гидротермальных хиббингита $(Fe^{2+}, Mn^{2+})_2Cl(OH)_3$ и сидерита. Границы этого звягинцевита и хиббингита – индукционные границы совместного роста. Размер выделений метаморфогенно-гидротермального звягинцевита до 35 × 15 мкм. Состав этого звягинцевита устойчив и близок к стехиометричному, мас. % (n = 7): Pd 60.24 (59.14–61.13), Pb 38.75 (38.04–39.37), Cd 0 (чаще) – 0.43; его формула – Pd 3.001 (2.991–3.011) Pb 0.993 (0.977–1.009) Cd 0.006 (0–0.021). Метаморфогенно-гидротермальный звягинцевит отличается от пневматолитового по минеральным ассоциациям и отсутствием любых примесей. Метаморфогенно-гидротермальный звягинцевит норильских руд возник, вероятно, в условиях цеолитовой фации метаморфизма при крайне низкой фугитивности сульфидной серы, в поле устойчивости самородного свинца ($\log fS_2 < -25$ при ≈250°C).

Ключевые слова: метаморфогенно-гидротермальный звягинцевит, Октябрьское месторождение, Норильское рудное поле

DOI: 10.31857/S2686739721050212

Интреметаллид палладия и свинца – звягинцевит открыла И.В. Муравьёва в магматогенных норильских сульфидных Ni–Cu рудах [1]. Звягинцевит развит в сульфидных Ni–Cu рудах Норильского и Талнахского рудных узлов [1–5], рудах платиновых металлов в интрузивах Бушвелд [6], Кондёрский [7–9] и Йоко-Довыренский [10–12]. Это сравнительно высокотемпературный минерал, член непрерывного ряда кубических твердых растворов: рустенбургит Pt_3Sn – атокит Pd_3Sn – звягинцевит Pd_3Pb [2–5, 7, 13]. Такой звягинцевит содержит существенное количество Pt (до 13 мас. %) и Sn (до 11 мас. %), может содержать до 5–8 мас. % Au [1–5, 7–9, 12, 13] и заметное количество Bi и Hg (до 3–4 мас. %) [11], Sb и Te (до 0.8 мас. %) [5], Ge (до 0.6 мас. %) [12]. Его интегральный состав отвечает – $(Pd, Pt, Au, Cu)_3(Pb, Sn, Bi, Sb, Hg, Ge)_1$. По наблюдениям А.Д. Генкина [1, 2] и Э.М. Спиридонова [3–5], звягинцевит, как и ассоциирующие с ним в норильских рудах тетраферроплатина, атокит, изоферроплатина, мончеит, котульскит, представлен метакристаллами, которые замещают минералы магматогенных сульфидных руд и продукты их субсолидусных превращений, а также развиты вне контуров сульфидных руд в окружающих силикатных породах в пределах ореолов флюидного воздействия около тел магматогенных сульфидов. Таковы же соотношения звягинцевита в малосульфидных рудах Йоко-Довыренского интрузива [11, 12]. Таким образом, генезис такого звягинцевита – флюидно-метасоматический, т.е. пневматолитовый.

Первичные магнетит-пентландит-моихукит-путоранитовые руды глубоких горизонтов северного фланга Октябрьского месторождения с рас-

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
**E-mail: ernstspiridon@gmail.com*

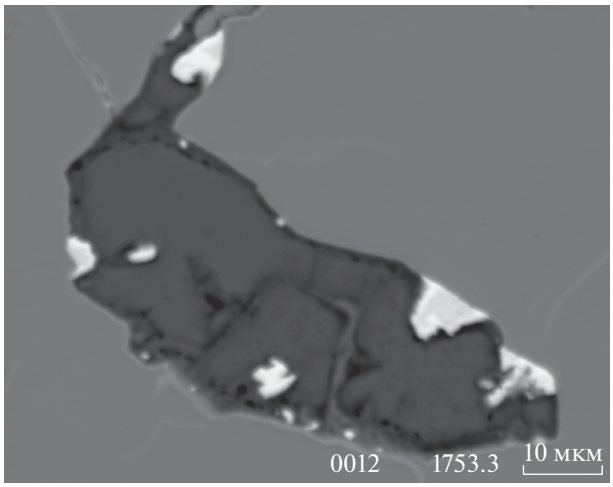

Рис. 1. Прожилковидное гнездо хиббингита (темно-серый), сидерита (черно-серый) и звягинцевита (белый) в сульфидной матрице. Звягинцевит развит на контакте хиббингита и сидерита с сульфидной матрицей, так и среди хиббингита. В отраженных электронах.

сеянным галенитом содержат заметное количество метакристаллов и микропрожилков минералов благородных металлов – станнопалладинита, тетраферроплатины, полярита, кюстелита и иных. Эти руды неравномерно тектонизированы и захвачены многостадийным низкоградным метаморфизмом в условиях пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций [14]. Распространены околотрещинные и гнездовые зернистые агрегаты борнита и магнетита (±хлорит), замещающие путоранит, моихукит и отчасти пентландит, а также прожилки магнетита и хлорита. Наибольший интерес представляют более поздние низкотемпературные образования, возникшие после дополнительной тектонизации. Это агрегаты хиббингита и сидерита с включениями беспримесных звягинцевита и серебра, заместившие магнетит и прилегающие сульфиды Cu–Fe–Ni и слагающие в них прожилки; фосгенит и звягинцевит, заместившие галенит; звягинцевит того же состава, частично заместивший пневматолитовый полярит; метасомы кадмистого сфалерита и серебра.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) метаморфогенно-гидротермального звягинцевита

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
Pd	60.92	60.30	60.18	61.13	59.72	60.27	59.14
Pb	38.97	38.78	38.88	38.74	38.04	39.30	38.56
Cd	нпо	нпо	нпо	0.45	0.43	нпо	нпо
сумма	99.89	99.08	99.06	100.32	98.19	99.57	98.00
Число атомов в формуле в расчете на 4 атома							
Pd	3.011	3.007	3.003	3.002	2.999	2.996	2.991
Pb	0.989	0.993	0.997	0.977	0.981	1.004	1.009
Cd	–	–	–	0.021	0.020	–	–
Pb + Cd	0.989	0.993	0.997	0.998	1.001	1.004	1.009

Примечание. Pt, Ru, Os, Ir, Au, Ag, Cu, Sn, Sb, Bi, Te, Hg, Ge – не обнаружены.

В метаморфизованных магнетит-пентландит-путоранитовых рудах глубоких горизонтов северного фланга Октябрьского месторождения Норильского рудного поля беспримесный звягинцевит развит в гнездах низкотемпературных метаморфогенно-гидротермальных минералов – хиббингита $(Fe^{2+}, Mn^{2+})_2Cl(OH)_3$ и сидерита (рис. 1). Границы этого звягинцевита и хиббингита – индукционные границы совместного роста. Форма выделений этого звягинцевита обычно неправильная, их размер до 35 × 15 мкм. Изредка – в гнездах сидерита – наблюдаются мелкие кубические кристаллы звягинцевита. С беспримесным звягинцевитом ассоциирует беспримесное самородное серебро.

Состав звягинцевита из срастаний с хлоридом-гидрооксидом железа – хиббингитом устойчив и близок к стехиометричному Pd_3Pb, мас. % (n = 7): Pd 60.24 (59.14–61.13), Pb 38.75 (38.04–39.37), Cd 0 (чаще) – 0.43; его формула – $Pd_{3.001(2.991-3.011)}Pb_{0.993(0.977-1.009)}Cd_{0.006(0-0.021)}$ (табл. 1). Химический анализ минералов выполнен с помощью аналитического комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ Jeol JSM-6480 LV в лаборатории локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ. В качестве эталонов использованы чистый Pd, алтаит PbTe (Pb), синтетический CdSe (Cd).

Звягинцевит в срастаниях с хиббингитом резко отличается от пневматолитового звягинцевита сульфидных руд Норильских месторождений и руд Бушвелда, Кондёра и Йоко-Довырена по минеральным ассоциациям и отсутствием любых примесей.

Pd и Pb – химические элементы с очень сильным сродством с сульфидной серой. Поэтому интерметаллид Pd–Pb звягинцевит мог возникнуть при крайне низкой активности сульфидной серы, в поле устойчивости самородного свинца. При процессах низкоградного метаморфизма норильских сульфидных руд [4, 14] произошла возможная мобилизация Ag, Cd и отчасти Pd. Источником Pd и Pb для формирования метаморфогенно-гидротермального звягинцевита, вероятно, послужили пневматолитовые станнопалладинит Pd_5CuSn_2, полярит Pd(Pb, Bi), паларстанид $Pd_5(Sn, As, Pb)_2$, теларгпалит $(Pd, Ag)_3Te$, источником Cd – кадмий-содержащий сфалерит, рассеянные в пентландит-путоранитовых рудах.

Итак, беспримесный звягинцевит из срастаний с хиббингитом и сидеритом в метаморфизованных сульфидных рудах глубоких горизонтов северного фланга Октябрьского месторождения Норильского рудного поля – метаморфогенно-гидротермальный. Вероятно, он возник в условиях цеолитовой фации метаморфизма, т.е. при ≈250°C по [15]. Условия образования характеризовались крайне низкой f S_2.

Автор благодарен Н.Н. Коротаевой – за высокое качество микрозондовых анализов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-00490), с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Генкин А.Д., Муравьева И.В., Тронева Н.В.* // Геология рудных месторождений. 1966. Т. 8 (1). С. 94–99.
2. *Генкин А.Д., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л. и др.* Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 234 с.
3. *Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М.* // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46 (2). С. 175–192.
4. *Спиридонов Э.М.* // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 1356–1378.
5. *Спиридонов Э.М. и др.* // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 5. С. 447–466.
6. *Oberthűr T., Melcher F., Gast L. et al.* // Canad. Mineral. 2004. Vol. 43. P. 563–582.
7. *Некрасов И.Я., Ленников А.М., Октябрьский Р.А. и др.* Петрология и платиноносность кольцевых щелочно-ультраосновных комплексов. М.: Наука. 1994. 321 с.
8. *Мочалов А.Г., Полеховский Ю.С., Горячева Е.В. и др.* // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49 (4). С. 357–366.
9. *Мочалов А.Г., Якубович О.В.* // Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. М.: ИГЕМ РАН. 2018. С. 220–222.
10. *Орсоев Д.А.* // Благородно-метальная минерализация в расслоенных ультрабазит-базитовых массивах юга Сибирской платформы. Новосибирск: Параллель. 2008. С. 89–194.
11. *Спиридонов Э.М., Орсоев Д.А., Николаев Г.С. и др.* // Геохимия. 2019. Т. 64 (1). С 43–58.
12. *Спиридонов Э.М., Орсоев Д.А., Николаев Г.С. и др.* // Геохимия. 2019. Т. 64 (5). С. 554–558. https://doi.org/10.1134/S0016702919050112
13. *Оненштетер Д., Ваткинсон Д.Х.* // VII Международ. платин. симп. М.: 1994. С. 80–81.
14. *Spiridonov E.M., Serova A.A., Kulikova I.M. et al.* // Canad. Mineral. 2016. V. 54. P. 429–452. . https://doi.org/10.3749//canmin.1500028
15. *Philpotts A.R., Ague J.J.* Principles of igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press. 2009. 667 p.

NEW METAMORPHOGENIC-HYDROTHERMAL GENETIC TYPE OF THE ZVYAGINTSEVITE Pd_3PB

E. M. Spiridonov[#]

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[#]*E-mail: ernstspiridon@gmail.com*

Represented by Academician of the RAS N. S. Bortnikov Januar 18, 2021

Palladium and lead intermetallide, namely, zvyagintsevite, is relatively abundant mineral of magmatogenic sulfide ores of Norilsk deposits and ores in Bushveld, Konder and Yoko-Dovyren intrusives. This is a relatively high-temperature pneumatolytic mineral and a term of continuous series of solid solutions: rustenburgite Pt_3Sn – atokite Pd_3Sn – zvyagintsevite Pd_3Pb. Zvyagintsevite usually contains a significant amount of Pt and Sn, up to 5–8 wt % of Au, an appreciable amount of Bi, Hg, Te, Cu and Ge. The composition is: $(Pd, Pt, Au)_3(Pb, Sn, Bi, Sb, Hg, Ge)_1$. A different type of zvyagintsevite was investigated in metamorphosed magnetite-pentlandite-putoranite ores of deep horizons in the northern flank of the Oktyabrskoye deposit within the Norilsk ore field. Almost pure zvyagintsevite Pd_3Pb develope in small nests and miniveins of low-temperature metamorphogenic-hydrothermal hibbingite $(Fe^{2+}, Mn^{2+})_2Cl(OH)_3$ and siderite. Zvyagintsevite and hibbingite have induction boundaries of joint growth. The size of metamorphogenic-hydrothermal zvyagintsevite accretions is up to 35 × 15 microns. The composition is stable and close to stoichiometric, wt % ($n = 7$): Pd 60.24 (59.14–61.13), Pb 38.75 (38.04–39.37), Cd 0 (more often) – 0.43; the formula is: Pd 3.001 (2.991–3.011) Pb 0.993 (0.977–1.009) Cd 0.006 (0–0.021). Metamorphogenic-hydrothermal zvyagintsevite differs from pneumatolytic one by mineral associations and composition, specifically, by the absence of Pt, Sn, Au, Bi, Te, Sb, Hg, and Ge impurities. Metamorphogenic-hydrothermal zvyagintsevite in Norilsk ores probably arose under the conditions of zeolite facies with extremely low sulfide sulfur fugasity in the stability field of native lead ($\log fS_2 < -25$ at 250 °C).

Keywords: metamorphogenic-hydrothermal zvyagintsevite, Oktyabrskoye deposit, Norilsk ore field