Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 553.08:543.424(470.111-234.82)

DOI: 10.19110/2221-1381-2019-7-25-32

МИНЕРАЛОГО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛА ВАВРЖИНИТ ИЗ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД ХРЕБТА ПАЙ-ХОЙ (НЕНЕЦКИЙ АВТОНОМНЫЙ ОКРУГ, РОССИЯ)

Р. И. Шайбеков, С. И. Исаенко, Е. М. Тропников

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

shaybekov@geo.komisc.ru

В статье приводятся новые сведения о минерале вавржинит, который был выделен в 2011 году в медно-никелевых рудах хенгурского габбро-долеритового комплекса Пай-Хоя. Установлено, что вавржинит находится в ассоциации с кобальтином, пирротинном, халькопиритом, пентландитом, никелином и нерудными минералами. Минерал имеет кремово-белый цвет, сильно анизотропен и характеризуется микротвердостью по Виккерсу ($VHN_{10,20}$) в интервале 111.6—146.5 кг/мм². Впервые получены КР-спектры для вавржинита Пай-Хоя в различных ориентировках, с основными полосами на 110, 192 и 218 см⁻¹.

Ключевые слова: вавржинит, рудопроявление Первый, медно-никелевые руды, хребет Пай-Хой, Югорский полуостров.

MINERALOGICAL AND SPECTROSCOPIC FEATURES OF VAVŘINITE FROM Cu-Ni ORES OF PAY-KHOY RIDGE (NENETS AUTONOMOUS DISTRICT, RUSSIA)

R. I. Shaybekov, S. I. Isaenko, E. M. Tropnikov

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The article presents new data on the mineral vavřinite (found in 2011) in copper-nickel ores of the Pay-Khoy gabbro-dolerite complex located in the far north-east of the European part of Russia, between the Barents and Kara seas, which is currently the third confirmed place of discovery in the world. The mineral is found in within Perviy ore occurrence, which is an intrusive body of a complex type, represented by gabbros and gabbro-dolerites of Late Devonian age. Three types of ore mineralization are distinguished: 1) schlieren-imbedded pentlandite, chalcopyrite, pyrrhotite (includes vavřinite) in marginal parts; 2) vein (injection)-imbedded chalcopyrite, pyrrhotite in leucocratic quartz dolerites; 3) metasomatic substantially disseminated and pyrrhotite in contact-modified rocks. Vavřinite is associated with cobaltine as well as with pyrrhotite, chalcopyrite, pentlandite, nickeline, and non-metalloferrous minerals. Vavřinite is creamy white color, highly anisotropic, and has a Vickers microhardness ($VHN_{10,20}$) of 111.6—146.5 kg/mm². The Raman spectra for Pay-Khoy vavřinite was obtained for the first time, with the main bands at 110, 192, and 218 cm⁻¹.

Keywords: vavřinite, Perviy ore occurrence, copper-nickel ores, Pay-Khoy Ridge, Ugra Peninsula.

Введение

Первые лейстовидное включение минерала вавржинит (20 мкм) и более мелкое зерно (<5 мкм) были обнаружены между зернами пентландита с каймой виоларита в сульфидных медно-никелевых рудах месторождения Кунратице в Чешской Республике в 1998 году [11, 13]. В 2005 году он был утвержден в качестве самостоятельного минерала международной минералогической ассоциацией (CNMMN 2005–045). Схожее по составу единичное зерно (UM1974-22-Te:NiSb), находящееся в сростании с пирротинном и пентландитом в герсдорфите, было отмечено в сульфидных медно-никелевых рудах месторождений Юго-Западного Китая [9, 14]. Но минерал не был утвержден [16]. В результате дополнительного исследования проявлений хромовых руд в округе Стейт-Лайн, графствах Честер и Ланкастер (Пенсильвания) получен еще один анализ, близкий по составу к вавржиниту (S11-015-016) [15]. В медно-колчеданных рудах проявления Майке

(Северный Улытау, Казахстан), локализованных в карбонатитах, упоминается одно удлиненное включение вавржинита в халькопирите размером 5 × 25 мкм [4]. Первые, очень краткие сведения о химическом составе и предполагаемом механизме образования включений вавржинита в кобальтине в медно-никелевых рудах Пай-Хоя (рудопроявление Первый) упоминаются в работе А. А. Романова с соавторами [3].

В настоящей работе приводятся новые данные о структурно-морфологических, оптических и спектроскопических особенностях вавржинита Пай-Хоя.

Месторасположение

Вавржинит был установлен в образцах минерализованных долеритов на рудопроявлении Первый, которое находится в юго-восточной части хенгурского (центрально-пайхойского) габбро-долеритового комплекса Пай-Хоя (Югорский полуостров) на правом берегу руч. Мутного, левого притока р. Хенгорью.

Рудопоявление представляет собой интрузивное тело мощностью от 20 до 100 м (рис. 1), с видимой протяжённостью по простиранию не более 350 м и шириной около 200 м, крутопадающее на юго-запад под углом 60–90° (по другим данным 70–80°, [7]) [1].

Внутреннее строение интрузива сильно неоднородное и по степени дифференциации может быть разделено юго-западную (мелко-, среднезернистые долериты) и северо-восточную (метагаббро-долериты, габбро-пироксениты, средне-, крупнозернистые

Рис. 1. Схематическая геологическая карта рудопоявления Первый (по [1]) с дополнениями авторов.

Условные обозначения: 1 — четвертичные отложения нерасчлененные: пески, суглинки; 2 — известняки; 3 — углисто-глинисто-кремнистые сланцы; 4 — роговики различного состава; 5 — скарны пироксен-гранатовые; 6–9 — долериты: 6 — мелкозернистые, гломеропорфировые; 7 — среднезернистые, порфировидные; 8 — среднезернистые, лейкокротавые, гранофировые; 9 — мелко- и среднезернистые альбитизированные; 10 — габбро-долериты, габбро, габбро-пироксениты мелкозернистые, интенсивно серцитизированные и амфиболитизированные; 11 — зоны окварцевания, карбонатизации и их границы; 12–15 — минерализация: 12 — шпирово-вкрапленная пентландит-халькопирит-пирротинная, 13 — халькопирит-пирротинная вкрапленная и прожилково-вкрапленная, 14 — халькопирит-пирит-пирротинная вкрапленная, прожилково-вкрапленная, гнездово-вкрапленная; 15 — халькопирит-пирротинная (метасоматическая) вкрапленная, прожилково-вкрапленная, гнездово-вкрапленная; 16 — геологические границы: а — достоверная, б — предполагаемая, в — петрографических разностей; 17 — тектонические нарушения: а — достоверные, б — предполагаемые, в — предполагаемые под четвертичными отложениями; 18 — элементы залегания; 19 — место обнаружения диагностического минерала вавжинит

Fig. 1. Geological map of the ore occurrence Pervyi (by [1]) with the additions of the authors.

Legend: 1 — quaternary deposits; 2 — limestones; 3 — carbonaceous-argillaceous-siliceous shale; 4 — hornfels; 5 — pyroxene-garnet skarns; 6–9 — dolerites: 6 — fine-crystalline, glomerophytic; 7 — medium-crystalline, porphyritic; 8 — coarse-crystalline, leucocratic, graniferous; 9 — fine-medium-crystalline, albitized; 10 — gabbro-dolerite, gabbro, gabbro-pyroxenite fine-crystalline, intensively sercitized and amphibolized; 11 — zones of silicification, carbonatization and their boundaries; 12–15 — mineralization: 12 — schlieren-disseminated pentlandite-chalcopryrite-pyrrhotite; 13 — disseminated and veinlet-disseminated chalcopryrite-pyrrhotite; 14 — disseminated chalcopryrite-pyrite-pyrrhotite; 15 — disseminated, veinlet-disseminated, nest-disseminated chalcopryrite-pyrrhotite (metasomatic); 16 — geological boundaries: a — reliable, b — estimated, c — petrographic differences; 17 — tectonic dislocations: a — reliable, b — estimated, c — estimated under quaternary sediments; 18 — attitude; 19 — places of finds of r mineral vavinite

долериты) ветви. Вмещающие породы в пределах контактов сильно дислоцированы, ороговикованы, с видимыми гидротермальными изменениями и разбиты разрывными нарушениями на многочисленные разноориентированные блоки, которые не переходят в долериты. Кроме того, в них часто наблюдаются маломощные (десятки сантиметров) межпластовые инъекции долеритов. По характеру локализации и текстурно-структурным особенностям в пределах рудопоявления выделяются три типа минерализации: широко-вкрапленный пентландит-халькопирит-пирротинный (характеризуется повышенной концентрацией платиноидов) в краевых частях, вкрапленный и прожилково (инъекционно)-вкрапленный халькопирит-пирротинный в лейкократовых кварцевых долеритах и вкрапленный метасоматический существенно пирротинный в контактово-измененных породах [1, 6]. Возрасты пород рудопоявления и находящегося рядом интрузивного тела, полученные по цирконам на SHRIMP-II (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург), соответствуют (374.6 и 381.4 ± 2.0) млн лет [5].

Методика исследований

Оптические свойства минералов изучались с использованием универсального микроскопа Nikon Eclipse LV100ND. SEM-изображения рудной минера-

лизации были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega3 LMH в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (аналитик Е. М. Тропников, г. Сыктывкар) с ускоряющим напряжением 20 кВ, током пучка 15 нА. Анализ химического состава минералов был выполнен в режиме EDS с использованием INCA X-MAX 50 mm фирмы Oxford Instruments с напряжением 20 кВ, силой тока 15 нА, вакуумом 0.05 Па, диаметром пучка 2 мкм, временем экспозиции 500000 импульсов. Эталонные, характеристические линии, нижние пределы обнаружения (мас. %): Pd (Pd, L α , 0.10 и 0.16 для анализов 7 и 8 в таблице), Te (PbTe, TeL α , 0.26–0.35), Bi (Bi, M α , 0.28), Sb (Sb, L α , 0.21–0.30), Ni (Ni, K α , 0.19–0.25), Co (Co, K α , 0.11).

Определение твердости производилось с помощью микротвердометра ПМТ-3, согласно методике С. И. Лебедевой [2], с нагрузкой 10 и 20 грамм, с единичными измерениями для каждого из зерен вавржинита.

Регистрация спектров комбинационного рассеяния света (КР-спектров) проводилась на высокоразрешающем микроспектрометре LabRam HR 800 (Horiba Jobin Yvon) в ИГ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар), на базе ЦКП «Геонаука». Условия регистрации спектров: решетка монохроматора – 600 ш/мм, конфокальное отверстие – 300 мкм, щель – 100 мкм, время экспо-

Химический состав вавржинита The chemical composition of vavřinite

№	Компоненты, мас. % Components, wt. %							Σ	Формульные единицы (на 5 атомов) Formula units (for 5 atoms)							
	Ni	Sb	Te	Fe	Pd	Bi	Co		Ni	Sb	Te	Fe	Pd	Bi	Co	As
Рудопоявление Первый, Пай-Хой, Россия (авторские данные, n = 10) Perviy occurrence, Pay-Khoy, Russia (author's data, n = 10)																
1	22.39	22.49	50.31	2.02	n/d	n/d	n/d	99.21	1.91	0.93	1.98	0.18	n/d	n/d	n/d	n/d
2	21.05	24.08	50.91	n/d	n/d	1.43	2.26	99.73	1.79	0.99	1.99	n/d	n/d	0.03	0.19	n/d
3	24.71	24.32	50.52	n/d	n/d	n/d	n/d	99.55	2.07	0.98	1.95	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
4	22.80	24.82	50.33	2.12	n/d	n/d	n/d	100.06	1.90	0.99	1.92	0.19	n/d	n/d	n/d	n/d
5	22.19	24.40	48.10	5.51	n/d	n/d	n/d	100.20	1.79	0.95	1.79	0.47	n/d	n/d	n/d	n/d
6	22.40	24.52	49.01	3.48	n/d	n/d	n/d	99.41	1.85	0.98	1.87	0.30	n/d	n/d	n/d	n/d
7	22.89	24.34	50.79	1.77	0.31	n/d	n/d	100.11	1.91	0.98	1.95	0.15	0.01	n/d	n/d	n/d
8	20.04	24.08	47.88	3.19	3.93	n/d	n/d	99.12	1.69	0.98	1.86	0.28	0.18	n/d	n/d	n/d
9	22.33	24.95	50.33	1.78	n/d	n/d	n/d	99.40	1.88	1.01	1.95	0.16	n/d	n/d	n/d	n/d
10	22.77	24.81	48.68	3.11	n/d	n/d	n/d	99.38	1.89	0.99	1.85	0.27	n/d	n/d	n/d	n/d
ср.	22.36	24.28	49.69	2.87	2.12	1.43	2.26	99.62	1.87	0.98	1.91	0.25 (n=8)	0.06 (n=2)	0.03 (n=1)	0.19 (n=1)	n/d
Месторождение Кунратце, Чешская Республика (a – природный, n = 3 [14]; b – синтетический, n = 5 [12]) Kunratice deposit, Czech Republic (a – natural, n = 3 [14]; b – synthetic, n = 5 [12])																
a	22.92 (22.54– 23.35) 23.85	23.65 (23.56– 23.78) 24.33	49.95 (49.78– 50.06) 51.77	1.29 (1.24– 1.33) n/d	1.29 (1.29– 1.34) n/d	0.33 (0.23– 0.52) n/d	n/d	99.43	1.93	0.96	1.93	0.11	0.06	0.01	n/d	n/d
б	23.69– 24.02)	24.13– 24.52)	51.34– 52.14)	n/d	n/d	n/d	n/dv	99.95	2.01	0.99	2.00	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
Сульфидные медно-никелевые месторождения, Юго-Западный Китай (n = 1) [15] Sulphide copper-nickel deposits, South Western China (n = 1) [15]																
б/н	22.00	26.00	46.00	n/d	3.00	1.00	n/d	98.00	1.94	1.11	1.87	n/d	0.15	0.02	n/d	n/d

Примечание: n/d – не обнаружено, n/a – нет данных, б/н – без номера.

Note: n/d – not detected, n/a – not available, б/н – no number

зиции — 1–10 сек, количество циклов накопления сигнала — 10, мощность возбуждающего излучения He-Ne-лазера (632.8 нм) — 2 мВт. В полученных КР-спектрах изученных образцов были определены положения максимумов линий с помощью свертки функций Гаусса–Лоренца в стандартной программе обработки спектров LabSpec (5.36).

Результаты и их обсуждение

Минерал вавржинит установлен нами в медно-никелевых рудах проявления Первый преимущественно в виде изометричных и удлиненно-вытянутых зерен до 25 мкм в никельсодержащем пирротине (рис. 2, а, с, е, h, i), реже в виде удлиненных зерен до 20 мкм (рис. 2, d, f) в халькопирите, а также угловатых удлиненно-вытянутых зерен до 6 мкм на границе зерен роговой обманки и клинопироксена (рис. 2, g).

В ассоциации с интенсивной мелкой вкрапленностью и иголочками алтаита вавржинит образует зерна размером до 3 мкм по периферии кобальтина, граничащего с халькопиритом и пентландитом (рис. 2, b). Зерна вавржинита из рудопроявления Первый имеют кремово-белый цвет со слабым плеохроизмом в коричневых оттенках. Минерал сильно анизотропный, но в двух случаях нами были отмечены изотропные разности. Подобный факт был установлен (с вопросом) для близкого по составу минерала из сульфидных медно-никелевых руд месторождений Юго-Западного Китая [9, 14]. Эту особенность можно объяснить тем, что кристаллы средних сингоний (вавржинит — гексагональный минерал) хоть и являются анизотропными, однако имеют одно направление (оптическая ось), проходя по которому луч света не испытывает двулучепреломления ввиду совпадения с осью симметрии высшего порядка.

Рис. 2. BSE-изображения включений вавржинита в сульфидных медно-никелевых рудах проявления Первый. Аббревиатуры: Ccp — халькопирит, Spy — сперрилит, Cpx — клинопироксен, Nc — никелин, Amp — амфибол, Cbt — кобальтин, Po — пирротин, Chl — хлорит, Ab — альбит, Alt — алтаит, Pn — пентландит, Hbl — роговая обманка, Vvr — вавржинит. Цифровое обозначение на изображениях соответствует номеру в таблице

Fig. 2. BSE images of vavřinite inclusions in sulphide copper-nickel ores occurrence Pervyi. Abbreviations: Ccp — chalcopyrite, Spy — sperrylite, Cpx — clinopyroxene, Nc — nickeline, Amp — amphibole, Cbt — cobaltite, Po — pyrrhotite, Chl — chlorite, Ab — albite, Alt — altaite, Pn — pentlandite, Hbl — hornblende, Vvr — vavřinite. The digital designation on the images corresponds to the number in the table

Из-за небольшого размера зерен вавржинита единичные измерения микротвердости удалось произвести только для двух наиболее крупных включений (рис. 2, а, и). В первом случае она составила $VHN_{20}=111.6$ кг/мм² (анализ 1, таблица), во втором — $VHN_{10}=146.5$ кг/мм² (анализ 9, таблица). Ф. Лауфек (F. Laufek) с соавторами для синтетического аналога вавржинита получили значения микротвердости (VHN_{10} , 20 измерений по 6 зернам) в интервале 73.4–111.7 (ср. 92) кг/мм² [11], для природного включения было получено значение $VHN_5=280$ кг/мм² [9, 14].

Кроме изучения структурно-морфологических особенностей и химического состава нами была предпринята попытка диагностировать вавржинит с помощью метода комбинационного рассеяния света (КР). В результате были получены КР-спектры по разноориентированным зернам, находящимся в ассоциации с различными по составу сульфидами (рис. 3). Полученные КР-спектры имеют три основных полосы: сильную 109–112 и две слабые 191–192 и 217–219 см⁻¹. В спектре 6 из-за маленького размера зерна и влияния окружающей матрицы мы наблюдаем дополнительную полосу, соответствующую халькопириту. Кроме того, в левой части спектра 8 происходит образование полосы 109 с плечом 120 см⁻¹ и уширенной полосы 144 см⁻¹, что может обуславливаться присутствием примеси палладия (до 4 мас. %).

Согласно данным [13], вавржинит был впервые установлен на месторождении Кунратице в Чешской Республике. Он обнаружен между зернами пентландита и ассоциирует с пирротинном, халькопиритом,

виоларитом, Ni-содержащим пиритом, мелонитом, сперрилитом и алтаитом. В отраженном свете синтетический аналог вавржинита бело-кремовый, слабоблеохроичный, от бледно-светло-коричневого до светло-коричневого, анизотропный, что хорошо сопоставляется с нашими исследованиями. Состав природного минерала вавржинита соответствует $(Ni_{1.93}Fe_{0.11}Pd_{0.06})_{2.10}(Sb_{0.96}Bi_{0.01})_{0.97}Te_{1.93}$, синтетического аналога $Ni_{2.01}Sb_{0.99}Te_{2.00}$ (см. таблицу). В первом случае минерал содержит примесь Fe до 1.33, палладия — до 1.34 и висмута — до 0.52 мас. %. Установленный в сульфидных медно-никелевых рудах месторождений Юго-Западного Китая [9, 14] минерал соответствует $(Ni_{1.94}Pd_{0.15})_{2.09}(Sb_{1.11}Bi_{0.02})_{1.13}Te_{1.87}$ и в качестве примесей содержит палладий (3 мас. %) и висмут (1 мас. %). В работе А. А. Романова с соавторами [3] впервые приводятся данные по 8 зернам вавржинита (размером до 20 мкм) на Пай-Хое, которые преимущественно находятся в сростках с кобальтином и ассоциируются с никелином и золотом. В качестве примеси в нем содержится палладий, кобальт ($n = 4$, 0.04–0.12 (ср. 0.07) ф.е.) мышьяк ($n = 4$, 0.04–0.12 (ср. 0.1) ф.е.) и в единичном случае отмечены железо и сера (0.04 и 0.08 ф.е. соответственно). Средняя эмпирическая формула вавржинита соответствует $(Ni_{1.79}Pd_{0.12})_{1.91}Sb_{0.96}Te_{1.99}$. К сожалению, иных данных в этих материалах не приводится, в том числе нет исходных данных по химическому составу.

В нашем же случае мы фиксируем примесь железа до 5 мас. %, в двух случаях отмечается примесь палладия до 4 мас. %. И только в одном зерне, на периферии кобальтина (рис. 2, б), присутствуют примеси кобальта (2.26 мас. %) и висмута (1.43 мас. %). Средняя эмпирическая формула имеет вид $(Ni_{1.87}Pd_{0.06})_{1.93}Sb_{0.98}Te_{1.91}$. Химический состав и структурные взаимоотношения вавржинита в рассматриваемых работах [3, 9, 13, 14] отражают тот факт, что его основными минералообразующими элементами являются Ni, Sb и Te, при этом характерными примесями можно считать лишь Pd и Bi, тогда как Fe, Co, As и S захватываются при анализе из вмещающих минерал пирротина, халькопирита, пентландита или кобальтина. Анализ диаграммы состава сосуществующих минералов в тройной системе Ni–Sb–Te при 400 °C (рис. 4) показал, что вавржинит Пай-Хоя располагается преимущественно в области λ_1 , соответствующей составу $NiSb_{1-x}Te_{2x}$ ($0.28 < x < 0.66$). В эту же область попадает расчетный состав вавржинита, а также синтетический состав и природные разности из месторождения Кунратице и месторождений Юго-Западного Китая. Точки анализов 2, 3 и 8 незначительно отступают от данной области из-за особенностей химического состава, размеров включений и используемого EDS-метода диагностики. Стоит отметить, что в отличие от ряда месторождений [4, 13–15], где был диагностирован минерал вавржинит в виде редких единичных включений, для рудопроявления Первый было зафиксировано несколько десятков включений, в том числе размером < 2 мкм, по которым не удалось получить корректные химические составы.

Учитывая структурно-морфологические особенности локализации вавржинита, его ассоциацию с сульфидными минералами, расположение в

Рис. 3. КР-спектры вавржинита. Нумерация соответствует значениям в таблице и рис. 2.

Fig. 3. Raman spectra of vavřinite. The numbering corresponds to the values in the table and figure 2.

Рис. 4. Аналитические составы сосуществующих фаз в системе Ni—Sb—Te при 400 °C [13]. Положение вавржинита Ni_2SbTe_2 в поле λ_2 обозначено стрелкой. Индексы на диаграмме соответствуют: λ_1 : $\text{Ni}(\text{Sb}_{1-x}\text{Te}_x)_{1+y}$ ($0 < x < 1$, $0.09 \leq y \leq 1$), λ_2 : $\text{NiSb}_{1-x}\text{Te}_{2x}$ ($0.28 < x < 0.66$), γ_1 : $\text{NiTe}_{0.775}$, β_2 : $\text{Ni}_{3-8}\text{Te}_2$ ($\delta = 0.12$), A: $\text{Ni}_{5.66}\text{SbTe}_2$. Нумерация соответствует значениям в таблице и рис. 2

Fig. 4. Analytical compositions of coexisting phases in the system Ni—Sb—Te at 400 °C [13]. The position of the mineral vavřinite Ni_2SbTe_2 from field λ_2 is indicated by an arrow. The indices in the diagram correspond to: λ_1 : $\text{Ni}(\text{Sb}_{1-x}\text{Te}_x)_{1+y}$ ($0 < x < 1$, $0.09 \leq y \leq 1$), λ_2 : $\text{NiSb}_{1-x}\text{Te}_{2x}$ ($0.28 < x < 0.66$), γ_1 : $\text{NiTe}_{0.775}$, β_2 : $\text{Ni}_{3-8}\text{Te}_2$ ($\delta = 0.12$), A: $\text{Ni}_{5.66}\text{SbTe}_2$. The numbering corresponds to the values in the table and figure 2

интерстициях породообразующих минералов, можно говорить о его поздней природе кристаллизации. Согласно экспериментальным данным [8], температура кристаллизации гексагонального пирротина достигает 1191 °C (моноклинный пирротин стабилен при температуре 254 °C). Ввиду того, что в рудах мы наблюдаем структуры распада титаномагнетита, температура распада которого ограничена 700 °C, а по некоторым данным, титаномагнетит промежуточного состава стабилен до 550 °C, кристаллизация пирротина происходила при более низких температурах. Далее кристаллизовался пентландит, температура образования которого, по одним данным, ограничена 615 °C, по другим — 610 °C [17]. При дальнейшем снижении температуры в поле халькопиритового твердого раствора (iss) происходило образование тетрагонального халькопирита, который стабилен при температуре ниже 557 °C [7]. Температура кристаллизации никелистого кобальтина колеблется в пределах 650—400 °C [9]. Согласно Лауфеку с соавторами [12], природный вавржинит месторождения Кунратице, имеющий близкий к идеальному состав, на основе экспериментальных данных (рис. 4) мог образоваться при температуре ниже 400 °C, что обосновывается низким изоморфизмом между Sb и Te и их близким отношением, тогда как при более высоких температурах перераспределение между элементами может быть существенным.

Заключение

В результате изучения структурно-морфологических, оптических и спектроскопических особенностей вавржинита Пай-Хоя установлено, что он име-

ет кремово-белый цвет со слабым плеохроизмом в коричневых оттенках, характеризуется сильной анизотропностью и микротвердостью ($\text{VHN}_{10,20}$), равной 111.6—146.5 кг/мм². Вавржинит находится в ассоциации не только с кобальтином, но и повсеместно присутствует в основных сульфидных — пирротине и халькопирите — и нерудных минералах. Интенсивное его распространение в пределах рудопроявления Первый на Пай-Хое отличает его от других мест локализации, где он обнаружен в виде единичных зерен. Исследование минерала с использованием метода комбинационного рассеяния света позволило впервые получить КР-спектры для данного минерала с основными полосами 110, 192 и 218 см⁻¹. Образование вавржинита, вероятнее всего, связано с распадом твердого раствора NiTe — NiTe_2 — NiSb при температурах, близких к 400 °C.

Работа выполнена по теме НИР госзадания (ГР № АААА-А17-117121270036-7) ИГ Коми НЦ УрО РАН, при частичной поддержке проекта фундаментальных исследований УрО РАН № 18-5-5-57 (ГР № АААА-А17-117121140076-3).

Литература

1. Жуков Ю. В., Заборин О. В., Маршанский И. И. и др. Геологическое строение территории листов R-41-103-B (в, г), Г (в, г); 104-B (в, г); 116-Г (а, б); 117-A (в, г), Б (в, г), В (а, б), Г (а, б); 118-B (а, б): Отчет Нялпейской ГПСИ по результатам геолого-съёмочных и поисковых работ м-ба 1:50 000 за 1968—1970 гг. / Коми ТГФ. Воркута, 1971. 298 с.
2. Лебедева С. И. Определение микротвердости минералов. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 124 с.

3. Романов А. А., Юферова Е. А., Зархидзе Д. В. Находка минерала вавржинит (Ni_2SbTe_2) в габбродолеритах хенгурского комплекса // Минералогические перспективы: Материалы международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2011. С. 267—269.

4. Степанец В. Г., Левин В. Л., Бекенова Г. К., Ли Е. С., Жуков Н. М., Хакимжанов М. С. Минералы благородных металлов и редких элементов в рудах Куратургайского и Майкейского типов Маятасского рудного района (Северный Улытау, Казахстан) // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. 2019. Т. 2. № 434. С. 21—29. doi: 10.32014/2019.2518-170X.34.

5. Шишкин М. А., Шкарубо С. И., Маркина Н. М., Молчанова Е. В., Калаус С. В. Основные итоги создания комплексной государственной геологической карты м-ба 1:1 000 000 (3-е поколение) листа R-41 (Амдерма) // Мат. конференции: Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России. Т. II. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2009. С. 183—185.

6. Юшкин Н. П., Давыдов В. П., Остащенко Б. А. Магматические образования Центрального Пай-Хоя и их металлогенические особенности // Вопросы петрографии севера Урала и Тимана. Сыктывкар, 1972. С. 3—34. (Труды Ин-та геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 17).

7. Cabri L. J. New Data on Phase Relations in the Cu-Fe-S System // Econ. Geol. 68, 1973. P. 443—454. doi: 10.2113/gsec-ongeo.68.4.443.

8. Craig J. R. and Kullerud G. Phase relations in the Cu-Fe-Ni-S system and their application to magmatic ore deposits // Economic Geology Monograph, v. 4, 1969. P. 344—358. doi: 10.5382/Mono.04.25.

9. Fleischer M., Pabst A., Mandarino J. A., Chao G. Y., Cabri L. J. New mineral names // American Mineralogist: 61, 1976. P. 182 (concerns UM1974-22-Te: NiSb).

10. Klemm D. D. Synthesen und analysen in den dreiecksdiagrammen $\text{FeAsS}-\text{CoAsS}-\text{NiAsS}$ und $\text{FeS}_2-\text{CoS}_2-\text{NiS}_2$ // Neues Jahrb. Mineral., Abh. v. 103(3), 1965. P. 205—255.

11. Laufek F., Drábek M., Skála R., Haloda J., Táborský Z., Čisarová I. Vavřinite, Ni_2SbTe_2 , a New Mineral Species from the Kunratice Cu—Ni Sulfide Deposit, Czech Republic // The Canadian Mineralogist: 45(5), 2007. P. 1213—1219. doi: 10.2113/gscanmin.45.5.1213.

12. Laufek F., Drábek M. The system Ni—Sb—Te at 400 °C // The Canadian Mineralogist: 48(5), 2010. P. 1069—1079. doi: 10.3749/canmin.48.5.1069.

13. Vavřín J. and Frýda J. Pt-Pd-As-Te mineralization from the Kunratice and Rožany copper-nickel deposits of the Šluknov area // Bulletin of the Czech Geological Survey: 73(2), 1998. P. 177—180 (in Czech with English abstract).

14. Research Group, Microprobe Analysis Laboratory, X-ray Powder Photograph Laboratory, Mineral Dressing Laboratory, Kweiyang Institute of Geochemistry, Academia Sinica. Tellurostibnide of palladium and nickel and other new minerals and varieties of platinum metals // Geochimica 3, 1974. P. 169—181 (in Chinese with English abstract).

15. Smith R. C. II, and Barnes J. H. Geochemistry and mineralogy of platinum group elements in some chromite occurrences in the State Line District, Chester and Lancaster Counties, Pennsylvania // Pennsylvania Geology, v. 41, no. 3/4, 2012. P. 3—13.

16. Smith Dorian G. W. and Nickel Ernest H. A System of Codification for Unnamed Minerals: Report of the Subcommittee for Unnamed Minerals of the IMA Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification // The

Canadian Mineralogist v. 45, 2007. P. 983—1055. doi: 10.2113/gscanmin.45.4.983.

17. Sugaki A. and Kitakaze A. The phase relations between $\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_{4.5}\text{S}_8$ and Co_9S_8 in the system Fe—Ni—Co—S at temperatures from 400° to 1100 °C // The Canadian Mineralogist, v. 42, 2004. P. 17—42. doi: 10.2113/gscanmin.42.1.17.

References

1. Zhukov, Yu. V., Zaborin, O. V., Marshansky, I. I. et al. *Geologicheskoye stroeniye territorii listov R-41-103-V* (v, g), *G* (v, g); *104-V* (v, g); *116-G* (a, b); *117-A* (v, g), *B* (v, g), *V* (a, b), *G* (a, b); *118-V* (a, b). (Geological structure of the territory of sheets R-41-103-B (c, d), D (c, d); 104-B (c, d); 116-G (a, b); 117-A (c, d), B (c, d), B (a, b), D (a, b); 118-B (a, b)). Report of the Nalpayan CST on the results of geological surveying and prospecting works, scale 1:50 000 for 1968-1970. Report. 1971, Vorkuta, 298 p. Komi territorial geological fund.

2. Lebedeva S. I. *Opredeleniye mikrotverdosti mineralov* (Determination of the microhardness of minerals). Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1963, 124 p.

3. Romanov A. A., Yuferova Ye. A., Zarkhidze D. V. *Nakhodka minerala vavrzhinit (Ni_2SbTe_2) v gabbrodoleritakh khengurskogo kompleksa* (Find of mineral vavrinite (Ni_2SbTe_2) in gabbro-dolerites hengursk complex). Mineralogical Perspectives: Proceedings of the International Mineralogical Seminar. Syktyvkar: Geoprint, 2011, pp. 267—269.

4. Stepanets V. G., Levin V. L., Bekenova G. K., Li E. S., Zhukov N. M., Khakimzhanov M. S. Minerals of noble and rare elements in Karaturgay and Mayke ore types of Mayatas ore region (North Ulytau, Kazakhstan). News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences. V. 2(434), 2019, pp. 21—29. doi: 10.32014/2019.2518-170X.34.

5. Shishkin M. A., Shkarubo S. I., Markina N. M., Molchanova Ye. V., Kalaus S. V. *Osnovnyye itogi sozdaniya kompleksnoy gosudarstvennoy geologicheskoy karty m-ba 1:1 000 000 (3-e pokoleniye) lista R-41 (Amderma)* (Main results of the creation of an integrated state geological map for the 1: 1 000 000 (3rd generation) of the sheet R-41 (Amderma)). Geology and mineral resources of the European Northeast of Russia: conference. Syktyvkar: Institute of geology Komi SC UB RAS, 2009, V. 2, pp. 183—185.

6. Yushkin N. P., Davydov V. P., Ostashchenko B. A. *Magmaticheskoye obrazovaniya Tsentral'nogo Pay-Khoy i ikh metallogenicheskiye osobennosti* (Magmatic formations of the Central Pai-Khoi and their metallogenic features). In: Questions of petrography of the north of the Urals and Timan. Proceedings of the Institute of Geology of the Komi Branch of the Academy of Sciences of the USSR. V. 17, Syktyvkar, 1972, pp. 3—34.

7. Cabri L. J. New Data on Phase Relations in the Cu-Fe-S System. Econ. Geol. 68, 1973, pp. 443—454. doi: 10.2113/gsec-ongeo.68.4.443.

8. Craig J. R. and Kullerud G. Phase relations in the Cu-Fe-Ni-S system and their application to magmatic ore deposits. Economic Geology Monograph, V. 4, 1969, pp. 344—358. doi: 10.5382/Mono.04.25.

9. Fleischer M., Pabst A., Mandarino J. A., Chao G. Y., Cabri L. J. New mineral names. American Mineralogist: 61, 1976, pp. 182 (concerns UM1974-22-Te: NiSb).

10. Klemm D. D. Synthesen und analysen in den dreiecksdiagrammen $\text{FeAsS}-\text{CoAsS}-\text{NiAsS}$ und $\text{FeS}_2-\text{CoS}_2-\text{NiS}_2$. Neues Jahrb. Mineral., Abh. V. 103(3), 1965, pp. 205—255.

11. Laufek F., Drábek M., Skála R., Haloda J., Táborský Z., Císařová I. Vavřinite, Ni_2SbTe_2 , a New Mineral Species from the Kunratice Cu–Ni Sulfide Deposit, Czech Republic // *The Canadian Mineralogist*: 45(5), 2007. P. 1213–1219. doi: 10.2113/gscanmin.45.5.1213.
12. Laufek F., Drábek M. The system Ni–Sb–Te at 400 °C // *The Canadian Mineralogist*: 48(5), 2010, pp. 1069–1079. doi: 10.3749/canmin.48.5.1069.
13. Vavřín J. and Frýda J. Pt–Pd–As–Te mineralization from the Kunratice and Rožany copper-nickel deposits of the Šluknov area // *Bulletin of the Czech Geological Survey*: 73(2), 1998. P. 177–180 (in Czech with English abstract).
14. Research Group, Microprobe Analysis Laboratory, X-ray Powder Photograph Laboratory, Mineral Dressing Laboratory, Kweiyang Institute of Geochemistry, Academia Sinica. Tellurostibnide of palladium and nickel and other new minerals and varieties of platinum metals. *Geochimica* 3, 1974, pp. 169–181.
15. Smith R. C., II, and Barnes J. H. Geochemistry and mineralogy of platinum group elements in some chromite occurrences in the State Line District, Chester and Lancaster Counties, Pennsylvania. *Pennsylvania Geology*, V. 41, No. 3/4, 2012, pp. 3–13.
16. Smith Dorian G. W. and Nickel Ernest H. A System of Codification for Unnamed Minerals: Report of the Subcommittee for Unnamed Minerals of the IMA Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification. *The Canadian Mineralogist* v. 45, 2007, pp. 983–1055. doi: 10.2113/gscanmin.45.4.983.
17. Sugaki A. and Kitakaze A. The phase relations between $\text{Fe}_{4.5}\text{Ni}_{4.5}\text{S}_8$ and Co_9S_8 in the system Fe–Ni–Co–S at temperatures from 400° to 1100 °C. *The Canadian Mineralogist*, V. 42, 2004, pp. 17–42. doi: 10.2113/gscanmin.42.1.17.