МПГ-МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В СУЛЬФИДНЫХ РУДАХ ПРОЯВЛЕНИЯ САВАБЕЙСКИЙ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ПАЙ-ХОЙ, ЮГОРСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Р. И. Шайбеков, А. В. Журавлев

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

shaybekov@geo.komisc.ru, micropalaeontology@gmail.com

В статье приводятся результаты изучения МПГ-минерализации, приуроченной к сульфидным медно-никелевым рудам, с использованием электронно-микроскопического и (впервые) рентгенотомографического методов на рудопроявлении Савабейский, расположенном в пределах хенгурского (центрально-пайхойского) габбродолеритового комплекса Пай-Хоя. МПГ-минерализация представлена висмутосурьмянистым и сурьмяно-висмутовым теллуридами палладия, котульским, сперритом, гесситом, висмутотеллуридом и золотом.

Ключевые слова: Югорский полуостров, Пай-Хой, хенгурского габбродолеритовый комплекс, сульфидная медно-никелевая минерализация, электронная микроскопия, рентгеновская томография, сульфиды, минералы платиновой группы.

PGM MINERALIZATION IN SULPHIDE ORES OF SAVABEYSKY AREA (CENTRAL PAY-KHOY, UGRA PENINSULA)

R. I. Shaybekov, A. V. Zhuravlev

Institute of Geology of the Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The paper presents the results of study of the PGM mineralization, associated with the copper-nickel sulfide ores using electron microscopy and, for the first time, X-ray microtomography methods for Savabeysky ores located within Khenguryu gabbro-dolerite complex of Pay-Khoy. PGM mineralization is represented by bismuth-antimony and antimony-bismuth palladium tellurides, kotulskite, sperrylite, hessite, bismuth-telluride and gold.

Keywords: Ugra Peninsula, Pay-Khoy, Khengur gabbro-dolerite complex, sulfide copper-nickel mineralization, SEM, XCT, sulphides, platinum group minerals.

Введение

Интрузивный магматизм, широко проявленный в центральной части Югорского полуострова, представлен силлами, реже дайками хенгурского (центрально-пайхойского) комплекса, локализованного в терригенно-карбонатных отложениях ордовика, реже силура и девона, и состоящего преимущественно из пород основного состава — долеритов, габбродолеритов и оливиновых габброноритов. Связанные с комплексом многочисленные проявления и пункты сульфидной медно-никелевой минерализации характеризуются присутствием многочисленных минералов платиновой группы (МПГ) [1, 7].

В результате проведенного нами комплекса минералогических исследований рудной минерализации рудопроявления Савабейский, в том числе впервые использованным методом рентгенотомографического анализа, были получены новые данные о эпигенетической МПГ-минерализации.

Объекты и методы исследования

Рудопроявление Савабейский (рис. 1) выявлено в 1976 году Хейягинской геолого-поисковой партией и располагается в пределах центральной части хенгурского габбродолеритового комплекса. В ходе поисковых маршрутов в районе оз. Савабейты была обнаружена сульфидная медно-никелевая минерализация шлирово-вкрапленного типа в горизонте меланократовых среднекристаллических кварцсодержащих габбродолеритов [9].

В структурном отношении рудопроявление приурочено к северо-восточному флангу сложнослоистого интрузивного тела, смятого вместе с вмещающими породами ордовика в мелкие изоклинальные склад-

ки, осложненные разнонаправленными разрывными нарушениями, и расположено в северо-восточном крыле Сопчинской антиклинальной структуры. Интрузивное тело характеризуется широким набором дифференциатов — от микро- до средне- и крупнокристаллических габбродолеритов и их оливин-кварцсодержащих разновидностей, в отдельных случаях со шлирами и линзами долерит-пегматитов [9]. По современным данным, возраст рудопроявления и габбродолеритового комплекса в целом оценивается как позднедевонский [1, 5].

Связанное с интрузией сульфидное медно-никелевое оруденение по своему минеральному составу, морфологии, приуроченности к определенному горизонту может быть подразделено на шлирово-вкрапленное *пентландит-халькопирит-пирротинное*, локализованное в среднекристаллических меланократовых габбродолеритах, и гнездово-вкрапленное, прожилково-вкрапленное *пирит-халькопирит-пирротинное*, приуроченное к горизонту кварцевых крупнокристаллических долеритов и долерит-пегматитов [9].

Пентландит-халькопирит-пирротинная шлирово-вкрапленная (0.5–30 мм) минерализация, по данным производственных работ, в пределах рудопроявления концентрируется в зоне линзовидной формы, имеет четко выраженную приуроченность к нижним дифференциатам интрузии и прослежена по канавам на 170 м при мощности от 0.6 до 10 м. Содержание сульфидов в данном типе минерализации достигает 15 %, из которых на пирротин приходится 10–13 %, на халькопирит — 2–3 %; максимальные установленные концентрации Pt + Pd + Au составили 0.94 г/т. Пирит-халькопирит-пирротинная гнездово-вкрапленная (до 8

Рис. 1. Карта фактического материала (фрагмент карты донеогеновых образований листа R-41-XXVIII масштаба 1:200000, [2]): 1 — сибирчатаяхинская свита: известняки, кремнистые известняки, известняковые конгломерксии, глинистые марганцовистые известняки; 2 — ливановская свита: известняки, карбонатно-кремнисто-глинистые сланцы; 3 — падейская свита: кварцевые песчаники, кремнисто-глинистые сланцы, силициты, известняки; 4 — путыуская свита: карбонатно-кремнисто-глинистые и углеродисто-кремнисто-глинистые сланцы, известняки; 5 — громашорская свита: фтаниты, кремнистые, глинисто-кремнистые, кремнисто-глинистые, карбонатно-кремнистые сланцы, силициты, глинистые известняки, яшмоиды, мраморы; 6 — оюская свита: углито-глинисто-кремнистые, углито-кремнисто-глинистые сланцы, кремнистые известняки, углито-фосфатно-глинисто-кремнистые сланцы, глинисто-карбонатно-кремнистые, глинисто-кремнистые сланцы и кремнистые, глинисто-кремнистые известняки; 7 — сопчинская свита: известняки — кремнистые, детритовые, глинистые, петельчатые — и сланцы — глинисто-кремнистые, кремнисто-глинистые; 8 — тальбейтивисская свита: известковистые песчаники, алевролиты, песчаные известняки, кремнисто-глинистые сланцы, локально — базальты, туфолавы; 9 — хенгурская свита: сланцы — глинисто-кремнистые, кремнисто-глинистые и их углеродистые разности, известняки, локально — базальты, туфолавы, песчаники, алевролиты, гравелиты, конгломераты, алевросланцы и углеродисто-глинистые сланцы; 10 — хенгурский (центрально-пайхойский) габбродолеритовый комплекс: габбродолериты, пикродолериты, долериты. Геологические границы (а — достоверные, b — предполагаемые): 11 — согласного залегания и интрузивные контакты. Разрывные нарушения: 12 — главный надвиг; 13 — разломы: а — достоверные, b — предполагаемые; 14 — рудопроявление Савабейский

Fig. 1. Physical and geological maps (fragment of map of preneogene formations of 1:200 000 scale of R-41-XXVIII, [2]). Legend: 1 — sibirchatayakhinskaya suite: limestones, cornstones, limestone conglobreccia, managanic marlstone; 2 — livanovskaya suite: limestones, carbonaceous-siliceous-argillaceous shales; 3 — padeyskaya suite: quartz sandstone, siliceous-argillaceous shales, silicites, limestone; 4 — putyuskaya suite: carbonaceous-siliceous-argillaceous and carboniferous-siliceous-argillaceous shales, limestones; 5 — gromashorskaya suite: phtanites, siliceous, argillaceous-siliceous, siliceous-argillaceous, carbonaceous-siliceous shales, silicites, marlstones, jasperoids, crystalline limestone; 6 — oyuskaya suite: carboniferous-argillaceous-siliceous, carboniferous-siliceous-argillaceous shales, cornstones, carboniferous- phosphatic-argillaceous-siliceous shales, argillaceous-carboniferous-argillaceous- carboniferous shales and siliceous, argillaceous-siliceous shales; 7 — sopchinskaya suite: limestones — siliceous, detritic, argillaceous, cellular, and shales — argillaceous-siliceous, siliceous-argillaceous; 8 — talbeytyviskaya suite: calcareous sandstones, siltstones, arenaceous limestone, siliceous-argillaceous shales, locally — basalts, tufolaves; 9 — Khengurskaya suite: shales — argillaceous-siliceous, siliceous-argillaceous and carbonaceous difference, limestone, locally — basalts, tufolaves, sandstones, siltstones, gritstones, conglomerates, shaly silts and carboniferous-argillaceous shales; 10 — Khengursky gabbro-dolerite complex: gabbro-dolerite, picrate-dolerite, dolerite. Geological boundaries (a — actual, b — potential): 11 — regular bedding and intrusive contacts. Faults: 12 — main thrust; 13 — faults: a — actual, b — potential; 14 — Savabey sky ores

мм) и прожилково-вкрапленная (до 1 см) минерализации представлены преимущественно ксеноморфными выделениями пирротина, неравномерно распределенными среди силикатов в количестве от первых до 10 %, нередко находящимися в сростках с халькопиритом [1].

Исследование проб с сульфидной и МПГ-минерализацией выполнено методами электронной микроскопии, ICP-MS и микрорентгеномографии.

Изображения SEM рудной минерализации были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega в Институте экспериментальной минералогии (аналитик А. А. Вирюс, г. Черноголовка) и в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (аналитик С. С.

Шевчук, г. Сыктывкар) с ускоряющим напряжением 20 кВ, током пучка 15 нА. Количественный анализ 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 и диаметром пучка 2 мкм.

Рентгеномографические исследования выполнены на микротомографе SkyScan 1173, установленном в НМСУ «Горный» (Санкт-Петербург). Съемка проводилась при ускоряющем напряжении 130 Кв (ток 61 мкА) с угловым шагом 0.16° и пространственным разрешением 17.05 мкм. При съемке использовался латунный фильтр толщиной 0.25 мм, что обеспечивало эффективную энер-

гию излучения в диапазоне 40–90 кэВ. Реконструкция томограмм осуществлялась программным обеспечением NRecon (BrukerCT) (реализован модифицированный алгоритм Хаунсфилда, который, по мнению разработчиков прибора и программного обеспечения, позволяет получать пространственное распределение линейного коэффициента поглощения рентгеновского излучения, не зависящее от морфологии и размеров объекта, с геометрической коррекцией и коррекцией beam hardening, компенсирующей изменение энергии излучения внутри образца) с последующей обработкой программами CTAn (BrukerCT), VolView (Kitware Inc.) и ImageAnalyser. Сегментация изображений и идентификация минеральных фаз проводилась в ручном режиме с учетом данных о соотношении рентгеновских плотностей минералов (NIST XCOM database [16]).

Анализ содержания благородных металлов производился на базе Центральной лаборатории ФГУП «ВСЕГЕИ» (аналитики Шишлов В. А., Кудряшов В. Л., г. Санкт-Петербург) методом ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7700х, по разработанной методике № 17 (патент РФ № 2425363 от 27.07.2011 г. «Способ определения количественного содержания благородных металлов в горных породах и отвалах горно-рудного производства»). Данная методика обеспечивает эффективное удаление изобарических помех (изобарических наложений) при определении ряда элементов платиновой группы и позволяет достичь пределов определения 0.002 г/т для определяемых шести элементов (Ir, Ru, Rh, Pt, Pd, Au).

Результаты и их обсуждение

Минеральный состав сульфидных медно-никелевых руд проявления Савабейский рассмотрен в ряде научных работ [6, 7, 9] и производственном отчете [1]. Авторами данных работ отмечается, что основными рудными минералами являются пирротин, халькопирит, пентландит и пирит, в подчиненных количествах присутствуют сфалерит, сульфиды и селенотеллуриды свинца (а также теллуровисмутиты свинца), минералы благородных и самородных металлов. Нами приводится характеристика МПГ-минерализации и включающих эти минералы сульфидов, присутствующих на проявлении Савабейский, кроме того, решается ряд противоречий, присутствующих в некоторых из вышеуказанных работ.

Пирротин ($Fe_{1-x}S$) является самым распространенным минералом на рудопроявлении. Встречается в виде крупных (до 3 см) линзо- и шпирообразных выделений, как правило трещиноватых и кавернозных, а также в виде тонкорассеянной интерстиционной вкрапленности и выделений до 2 мм в массе породообразующих минералов. Нередко зерна пирротина цементируют выделения ильменита и заполняют промежутки между его пластинами. Часто в сростках и в виде каемок в пирротине присутствуют халькопирит и пентландит. В качестве примеси в пирротине отмечается никель ($n = 13$; здесь и далее n — число точек замера), цинк ($n = 11$), в единичном случае отмечена медь. По результатам анализов химический состав пирротина ($n = 41$) следующий (в скобках среднее значение): Fe — 49.43–61.22(59.48), S — 38.45–40.79(39.95), Ni — 0.68–1.86(1.13), Zn — 0.40–0.73(0.56), Cu — 10.67, сумма — 98.19–100.86(100.20) масс. %. По средним значениям химического состава кристаллохимическая формула минерала имеет вид $Fe_{0.93}S_{1.00}$.

Халькопирит ($CuFeS_2$) является главным concentra-

тором палладиевой минерализации и вторым минералом по распространенности после пирротина. Представляет собой шпир и гнезда размером до 1 см, а также зерна неправильной угловатой формы и мелкую вкрапленность размером до 1 мм. Зачастую находится в сростках и в виде каём в пирротине, нередко замещая его. Химический состав халькопирита ($n = 58$) следующий (в скобках среднее значение): Cu — 32.21–34.55(33.40), Fe — 29.34–30.85(29.98), S — 33.46–35.48(34.57), сумма 95.07–100.84(98.05) масс. %. В виде прожилков и мелких линзообразных выделений размером от первых до 20 мкм в халькопирите отмечается *ковелин* ($n = 4$), в единичном случае с примесью никеля, имеющий следующий состав (в скобках среднее значение): Cu — 32.21–35.12(33.77), Fe — 29.34–31.92(30.83), S — 32.49–36.74(35.26) при сумме 95.07–102.23(99.84) масс. %. По средним значениям химического состава кристаллохимическая формула имеет вид $Cu_{0.97}Fe_{1.01}S_{2.02}$. Иногда в сростках с халькопиритом присутствуют *пирит* размером до 20–30 мкм, с примесью никеля и цинка и *сфалерит* до 15 мкм с примесью кадмия и меди.

Пентландит ($(Fe,Ni)_9S_8$) отмечается в рудах преимущественно в ассоциации с пирротин, образует либо сростки, каемки, либо линзовидные и пламевидные выделения вдоль трещин и имеет размеры до 30–50 мкм. В ассоциации с пентландитом отмечаются микровключения минералов свинца и серебра, иногда в виде каймы по нему развивается виоларит с примесью кобальта, в котором присутствуют включения серебросодержащего золота. В качестве примеси в пентландите присутствует кобальт ($n = 8$), в единичных случаях цинк, хотя встречаются и беспримесные формы. Химический состав пентландита ($n = 12$) следующий (в скобках среднее значение): Fe — 28.23–29.86(29.16), Ni — 34.17–36.61(35.52), S — 33.04–34.70(33.78), Co — 1.95–3.37(2.40), Zn — 0.47 при сумме 98.37–101.73(100.11) масс. %. По средним значениям химического состава кристаллохимическая формула имеет вид $(Fe_{4.00}Ni_{4.63}Co_{0.31})S_{8.94}S_{8.06}$.

Кроме того, *халькопирит*, *пирротин*, *реже пентландит* и очень редко *пирит* содержат многочисленные микровключения гессита, серебросвинцовистых висмутотеллуридов, галенита, сфалерита, алтаита, клаустолита и самородного свинца, последний нередко содержит примеси селена, теллура, висмута и серебра.

Наибольший интерес на рудопроявлении вызывает присутствие *золота*, *арсенидов платины*, *серебросвинцовистых висмутотеллуридов*, *теллуридов серебра и палладия*. Теллуриды палладия на рудопроявлении Савабейский впервые были описаны в работах Р. И. Шайбекова [6, 7], но небольшое на тот момент количество анализов не давали полноценного представления о его химическом составе. Полученные данные уточняют это, выделяя три минеральные фазы изоморфного ряда *соболевскит* — *садберит* ($PdBi-PdTe-PdSb$): *висмутосурьмянистый* $Pd_{1-x}(Te,Sb_{+Bi})$, где $x = 0-0.22$, и *сурьмяно-висмутитовый* $Pd_x(Te,Bi_{+Sb})_4$ *теллуриды палладия*, а также *котульскит* $Pd(Te,Bi)$.

Висмутосурьмянистый теллурид палладия представляет собой эмульсионную вкрапленность, угловатые, изометричные выделения, ассоциирующиеся с халькопиритом, и имеет размеры от 0.3 до 4 мкм. Как правило, они располагаются по трещинам, кавернам, в катаклазированных областях и на периферийных частях с породообразующими минералами (рис. 2, а–с). В одном случае был отмечен агрегат, состоящий из трех параллельно вы-

тянутых выделений размером 2.5 мкм. Химический состав ($n = 13$) данной минеральной фазы относительно устойчивый, но характеризуется недостатком палладия и единичными примесями никеля, ртути, платины, мышьяка (в скобках среднее значение): Pd — 31.51–40.62 (35.27), Te — 22.86–39.68 (30.65), Bi — 9.83–22.97 (16.60), Sb — 12.27–16.83 (14.09), Ni — 0.88, Hg — 3.25, Pt — 4.84, As — 6.31 при сумме 92.63–101.6 (97.78) масс. %. Рассчитанная нами по средним значениям химического состава кристаллохимическая формула является идеализированной, но полноценно отражающей состав данной минеральной фазы и имеет вид $Pd_{1-x}(Te, Sb_{+Bi})_x$, где $x = 0–0.22$.

Сурьмяно-висмутосурьмянистый теллурид палладия, в отличие от висмутосурьмянистой разновидности, имеет более устойчивый состав. Он локализуется преимущественно в халькопирите в виде изометричных включений, зерен с явной кристаллографической формой, сростков вдоль трещин в халькопирите и в кварцевых прожилках, нередко как эмульсионная вкрапленность присутствует на границе или среди породообразующих минералов (рис. 2, d–f). Размеры зерен варьируют от первых до 25 мкм, в качестве примеси присутствует сурьма (до 16 масс. %). Химический состав ($n = 8$) этой разновидности теллурида палладия следующий (в скобках среднее значение): Pd — 24.74–28.98 (25.90), Te — 31.07–49.69 (35.66), Bi — 19.44–36.91 (30.36), Sb — 4.73–15.68 (7.38) при сумме 96.84–100.84 (99.31) масс. %. По средним значениям химического состава кристаллохимическая формула данной фазы имеет вид $Pd_2(Te, Bi_{+Sb})_4$.

Висмутосурьмянистый теллурид палладия ($Pd(Te, Bi)$) встречается в халькопирите, в сростке с кварцем, в массе породообразующих минералов в виде угловатых, изометричных, удлиненных зерен размером от первых до 5 мкм. Корректный химический состав в виду маленьких размеров зерен удалось получить лишь по одному зерну: Pd — 38.60, Te — 31.57, Bi — 24.99, Sb — 4.15 при сумме 96.32 масс. %. Рассчитанная по средним значениям химического состава кристаллохимическая формула имеет вид $Pd_{0.95}(Te_{0.65}Bi_{0.31}Sb_{0.09})_{1.05}$.

Сперилит ($PtAs_2$) является основным носителем платины на рудопроявлении и в сульфидных медно-никелевых проявлениях Пай-Хоя, что характерно для Cu-Ni-месторождений в целом. Он представляет собой угловатые ксеноморфные включения размером до 5–6 мкм в трещинах халькопирита или на периферийных его частях на границе с пироксеном, реже находится в массе породообразующих минералов (рис. 3, a, b). В качестве примесей присутствуют теллур ($n = 2$) и сурьма. Химический состав сперилита ($n = 7$) характеризуется пониженными содержаниями платины (в скобках среднее значение): Pt — 52.04–58.49 (54.88), As — 41.70–47.60 (45.14), Te — 1.78–2.13 (1.96), Sb — 2.27 при сумме 99.66–102.31 (100.90) масс. %. По средним значениям химического состава кристаллохимическая формула имеет вид $Pt_{0.95}As_{2.05}$.

Гессит (Ag_2Te) ассоциирует преимущественно с пирротинном и халькопиритом, реже с пентландитом и в единичных случаях с пиритом; образуется по трещинам, катклазировавшимся областям в виде сростков, микровключений изометричной, удлиненно-вытянутой, угловатой формы, иногда с выраженными кристаллографическими очертаниями (рис. 3, c, d). Размер выделений варьирует от первых до 20 мкм. Иногда гессит встречается в сростках с халькопиритом в пирротине, на границе сульфидов, в таком случае размер его не превышает 5 мкм. Тел-

Рис. 2. BSE-изображения (SEM Vega Tescan 3 LMH) висмута-сурьмянистого теллурида палладия: a, b — в халькопирите, c — в пироксене; сурьмяно-висмутосурьмянистого теллурида палладия: d — в халькопирите, e — в хлорите, f — на границе халькопирит-пирротин и включение серебросвинцовистого висмутотеллурида в пирротине

Fig. 2. BSE-images (SEM Vega Tescan 3 LMH) of bismuth-antimony telluride palladium: a, b — in chalcopyrite, c — in pyroxene; Antimony-bismuth telluride palladium: d — in chalcopyrite, e — in chlorite, f — on the border of chalcopyrite-pyrrhotite and include in silver-lead bismuth telluride

лурид серебра часто находится в ассоциации с галенитом, сфалеритом, клаустолитом, теллуридом висмута (цумоитом?), алтаитом, серебросвинцовистыми висмутотеллуридами. Химический состав гессита ($n = 35$) стабильный с редкими примесями свинца и селена (в скобках среднее значение): Ag — 49.68–67.37 (63.08), Te — 32.27–40.41 (36.03), Pb — 4.13 и 9.94, Se — 0.67 и 1.70 при сумме 92.21–101.67 (99.57) масс. %. По средним значениям химического состава кристаллохимическая формула гессита — $Ag_{2.02}Te_{0.98}$.

Еще одними минералами, содержащими серебро, являются серебросвинцовистые висмутотеллуриды. Представляют собой угловатые, изогнутые, удлиненно-вытянутые зерна размером до 15 мкм, кристаллизующиеся в пустотах и трещинах в пирротине, халькопирите, реже отмечаются выделения среди породообразующих минералов (рис. 2, f). Как правило, серебросвинцовистые висмутотеллуриды характеризуются нестабильным, со значительными вариациями составом, иногда с примесью селена. Химический состав висмутотеллуридов ($n = 6$) следующий (в скобках среднее значение): Pb — 10.09–48.66 (31.43), Ag — 1.06–18.87 (7.30), Te — 34.97–

Рис. 3. BSE-изображения (SEM Vega Tescan 3 LMH) сперилита (a, b), гессита (c, d) и золота (e, f): a — на границе халькопирит — пироксен, b — в пироксене, c — в халькопирите и в пирротине с галенитом, d — в пирротине с алтаитом, e — в кайме виоларита, f — в пироксене

Fig. 3. BSE-images (SEM Vega Tescan 3 LMH) sperrylite (a, b), hessite (c, d) and gold (e, f): a — on the border of chalcopyrite-pyroxene, b — in pyroxene; c — in chalcopyrite and pyrrhotite with galena, d — in pyrrhotite with altaite, e — in the border of violarite, f — in pyroxene

40.15 (39.01), Bi — 9.59–31.92(20.70) при сумме 90.59–101.43 (98.59) масс. %.

Золото (Au) на рудопроявлении встречается часто, преимущественно в самородном виде, реже в виде сростков и эмульсионной вкрапленности в халькопирите и среди породообразующих минералов. В отобранных пробах из первичных и вторичных ореолов обнаружилось большое разнообразие золотин с различной морфологией: комковатые, дендритовидные, слабоокатанные зерна (до 0.5 мм), пластинки (от 0.02 до 0.25 мм) прямоугольной, остроугольной и округлой форм, чешуйки. Золото ввиду значительной примеси серебра и небольшого количества меди имеет пробность, равную 780 ‰ и следующий химический состав (n = 25, сред.): Au — 78.13, Ag — 21.17, Cu — 0.7 % [2]. Нами также отмечено три микровключения серебросодержащего золота (рис. 3, e, f): одно выделение низкопробного золота (Au — 69.54, Ag — 26.39, сумма 95.93 масс. %) в виоларитовой кайме пентландита, два выделения среднепробного золота — среди породообразующих минералов вблизи сульфидных выделений (Au — 83.11, Ag — 17.19, сумма 100.50 масс. %) и в пентландите (Au — 79.52, Ag — 22.51, сумма 102.03 масс. %).

Методом рентгеновской томографии в изученном образце меланократового габбродолерита размером 1×1.5 см, со шлирово-вкрапленной минерализацией были установлены следующие содержания рудных и породообразующих минералов: пироксен — 73.952, плагиоклаз — 5.565, пирротин — 0.33, халькопирит — 0.126 и теллуриды палладия — 0.004 %, на неидентифицированные фазы приходится 20.023 %. Данный метод диагностики, как и метод электронной микроскопии, подтверждает, что теллуриды палладия приурочены преимущественно к халькопириту, при этом позволяя выявить его присутствие и более крупные (по сравнению с методом электронной микроскопии) выделения минеральных фаз в массе породообразующих минералов (рис. 4).

В настоящее время существует небольшое количество работ, касающихся благороднометалльной минерализации габбродолеритового комплекса Пай-Хоя и рудопроявления Савабейский в частности. Но и в них присутствуют некоторые несоответствия, которые мы постарались объяснить в данной работе.

В отчете Д. В. Зархидзе [1] в пробе № 3-19 дается описание минерала вавржинит (Ni_2SbTe_2), который встречается в виде изометричных зерен размером до 20 мкм и находится в тесной ассоциации с кобальтином, но в тексте приписывается то к рудопроявлению Савабейский, то к проявлению Первый. Позднее в работе А. А. Романова [3] этот минерал, вероятнее всего, из-за той же путаницы с пробами в отчете был ошибочно отнесен к рудопроявлению Савабейский (что подтверждается более поздней публикацией [2]). На это указывают и отличие в минеральном составе образцов, и данные по пространственной привязке рудных тел. Так, на рудопроявлении Первый основными рудными минералами являются пирротин, халькопирит, пентландит, кобальтин, ильменит, никелин, герсдорфит, бравоит, миллерит, арсенопирит, борнит, марказит, пирит и гидротермит, а на рудопроявлении Савабейский — пирротин, халькопирит, кубанит, пентландит, пирит [6, 7, 9]. При этом вавржинит ассоциирует исключительно с кобальтином [1–3], а установленные нами теллуриды палладия [6, 7] и «боровскит» (проба № 8715, [1]) концентрируются в халькопирите. Теллуриды палладия отличаются от вавржинита большими содержаниями палладия, присутствием висмута и отсутствием никеля. Выделение минерала «боровскит» несколько ошибочно ввиду существенных отличий от классического состава минерала, пониженными содержаниями теллура, сурьмы, повышенными палладия и примесью висмута до 10 %. По своему составу «боровскит» (n = 10, Pd — 36.30–44.23(ср. 40.16), Te — 31.83–46.43(ср. 38.01), Sb — 14.26–23.88(ср. 20.21), Bi — 4.61 и 11.58 при сумме 100.00 масс. %), выявленный Д. В. Зархидзе и др. [1], может быть отнесен к выделяемому нами висмутосурьмянистому теллуриду палладия и имеет формулу, близкую к $Pd_{1-x}(Te, Sb, Bi)_2$.

В ранее опубликованных работах Р. И. Шайбекова [6, 7] отражены несколько неполные данные по генезису сульфидов и благородных металлов на проявлении Савабейский. Проведенные дополнительные исследования позволяют более подробно рассмотреть вопросы генезиса рудной минерализации на изучаемом рудопроявлении.

Наиболее высокотемпературными сульфидами являются пирротин, халькопирит и пентландит. По экспериментальным данным, температура кристаллизации наиболее высокотемпературного гексагонально-

Рис. 4. Пространственные соотношения минеральных фаз на томографическом сечении образца (microtomograph SkyScan 1173): Pl — плагиоклаз; Pyx — пироксен; Po — пирротин; Csp — халькопирит; Te — теллурид палладия

Fig. 4. Spatial relations of minerals at the tomographic section (microtomograph SkyScan 1173): Pl — plagioclase; Pyx — pyroxene; Po — pyrrhotite; Csp — chalcopyrite; Te — palladium telluride

го пирротина (mss) соответствует 1191–1100 °С (стабилен до 100 °С [12]). Образование пирротина рудопроявления Савабейский происходило при более низких температурах, после процесса распада твердого раствора титаномagnetита на магнетит и ильменит, который ограничен 700 °С. Температура кристаллизации пентландита, по одним данным, ограничена 615 °С, по другим — 610 °С, для высокотемпературной формы она составляет 865 °С [17]. Пламевидная структура распада пентландита, присутствующая в пирротине на рудопроявлении, возникла при температуре 450 °С. Халькопирит (тетрагональный) стабилен при температуре ниже 557 °С, образуясь в поле пиритового твердого раствора (iss), далее при понижении температуры по трещинам в нем происходила кристаллизация (507 °С) ковеллина [10]. При последующих вторичных гидротермальных-метасоматических процессах сульфиды становились неустойчивыми (кроме халькопирита), в результате чего мы видим замещение пентландита виоларитом, который устойчив при температуре до 460 °С [17].

Как известно, Pd, Pt, Ag и Au практически не концентрируются в твердых растворах. Они остаются в остаточном расплаве, отделяющемся от кумулятивной массы, который, насыщаясь летучими компонентами и полуметаллами As, Te, Sb, Bi, начинает мигрировать в пределах рудопроявления, образуя висмутеллиды, антимониды, арсениды и висмутиды. Образование в халькопирите теллуридов палладия, относящихся к минералам изоморфного ряда соболевскит–садбериит (система PdBi-PdTe-PdSb), происходила при температурах 600–480 °С. По экспериментальным данным, садбериит при 600 °С формирует полный изоморфный ряд с котульским PdTe и неравновесные твердые растворы между PdTe и PdTe_2 , которые образуются в интервале 575–710 °С [15]. Температуры же плавления висмутидов пал-

ладия еще ниже: так, синтетический фрудит PdBi_2 плавится при 480 °С, а PdBi — при 610 °С. Благодаря полному изоморфизму между Sb, Te и Bi происходило последовательное замещение сурьмы и теллура висмутом [13], в результате этого температура кристаллизации снижалась. Упомянутый в тексте на рудопроявлении Первый минерал вавжинит, устойчивый при температуре 400 °С, выделился из твердого раствора состава $\text{NiTe-NiTe}_2\text{-NiSb}$ [2, 3], температура же кристаллизации вмещающего его никелистого кобальтина колеблется в пределах 650–400 °С [14]. Самыми поздними образованиями являющиеся сперрилит, гессит, золото и самородные выделения олова, свинца и серебра. Гессит, присутствующий в виде включений в пирротине, на границе халькопирит – пирротин и непосредственно в халькопирите в ассоциации с низкотемпературным сфалеритом, галенитом, теллуридом висмута и серебросвинцовистыми висмутотеллуридами, по экспериментальным данным, может быть отнесен к нижним температурам промежуточной модификации [по 11], стабильной при 802–145 °С.

Как уже упоминалось выше, в отчете Д. В. Зархидзе [1] по двум штучным пробам из отвалов канавы № 17, представленных меланократовыми габбродолеритами с обильной халькопирит-пирротиновой гнездово-вкрапленной минерализацией, были установлены (в лаборатории ЗАО «Механообр Инжиниринг Аналит» пробирно(Pb)-атомно-абсорбционным методом, г. Санкт-Петербург) значимые суммарные содержания Pt + Pd + Au до 0.94 г/т; в отчете Н. М. Чернышева и др. [4] по 4 пробам для рудопроявления Савабейский установлены содержания Pt + Pd до 0.083 г/т. Нами также были получены данные по Au, Pt, Pd, Rh, Ir, Ru в сульфидизированных габбродолеритах по 3 пробам из канав: № 36 — Pd — 0.19, Ir — 0.0021, Pt — 0.078, Au — 0.016 г/т; № 32 — Pd — 0.022, Pt — 0.028, Au — 0.15 г/т; № 17 — Ru — 0.0021, Pd — 0.022, Ir — 0.0039, Au — 0.017 г/т. Как следует из геохимических и минералогических данных, наибольшие концентрации благородных металлов фиксируются в пробах с интенсивной халькопиритовой минерализацией, претерпевших вторичные гидротермально-метасоматические изменения.

Закключение

В результате исследования сульфидной медно-никелевой минерализации проявления Савабейский была установлена благороднометалльная минерализация магматического и гидротермально-метасоматического генезиса.

Основными минералами МПГ являются гессит, сперрилит, серебросвинцовистые висмутотеллуриды, теллуриды палладия и золото. Наибольшее разнообразие имеют теллуриды палладия, которые характеризуются изменчивостью состава и относятся к промежуточным минералам изоморфного ряда соболевскит – садбериит. Наиболее высокотемпературными платиноидами являются теллуриды палладия, самыми низкотемпературными — сперрилит, гессит, висмутотеллуриды и золото.

Повсеместное присутствие МПГ-минерализации на рудопроявлении Савабейский и в ряде других рудопроявлений и пунктах минерализации Пай-Хоя и относительно высокие их концентрации в рудах (Pt + Pd — до 1 г/т) вызывают большой интерес ввиду перспективности района в отношении благороднометалльной минерализации.

Авторы выражают благодарность А. А. Штырляевой (НМСУ «Горный», г. Санкт-Петербург) за проведение рентгенотомографической съемки.

Работа выполнена при поддержке грантов фундаментальных научных исследований УрО РАН №15-18-5-46 и №15-15-5-73.

Литература

1. Зархидзе Д. В., Малых О. Н., Войтович З. Н. и др. Геологическое доизучение масштаба 1:200000 листов R-41-XXVIII, XXIX (Карская площадь): Отчет. Нарьян-Мар, 2010. 1080 с. (Кomi ТГФ).
2. Петраков, Н. А., Романов А. А. Благороднометаллическая минерализация в габбро-дolerитах Центрального Пай-Хоя // Проблемы недропользования: Сб. науч. тр. Междунар. форума-конкурса молодых ученых (23–25 апр. 2014 г.). СПб., 2014. Ч. 2. С. 238.
3. Романов А. А., Юферова Е. А., Зархидзе Д. В. Находка минерала вавриинит (Ni_2SbTe_2) в габбро-дolerитах хенгурского комплекса // Минералогические перспективы: Материалы международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2011. С. 267–269.
4. Чернышов Н. М., Переславцев А. В., Кузнецов А. Н. и др. Формационные типы ультрамафит-мафитовых интрузий Пайхойской провинции и перспективы их никеленосности / Воронежский государственный университет, R-41. Воронеж, 1990. 227 с. (Кomi ТГФ).
5. Шайбеков Р. И. Дolerитовое тело (Сопча) Центрального Пай-Хоя и его датирование с использованием U-Pb-метода (SHRIMP II) // Третья Сибирская международная конференция молодых ученых по наукам о Земле. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 2006. С. 246–248.
6. Шайбеков Р. И. Новые данные о благороднометаллической минерализации рудопоявления «Савабейский» (Центральный Пай-Хой) // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 19-й научной конференции. Сыктывкар: Геопринт, 2010. С. 206–210.
7. Шайбеков Р. И. Платиносульфидная минерализация в габбро-дolerитах Пай-Хоя. Сыктывкар, 2013. 108 с.
8. Шишкин М. А., Шкарубо С. И., Маркина Н. М., Молчанова Е. В., Калаус С. В. Основные итоги создания комплексной государственной геологической карты м-ба 1:1000000 (3-е поколение) листа R-41 (Амдерма) // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Мат. конф. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2009. Т. II. С. 183–185.
9. Юшкин Н. П., Кунц А. Ф., Тимонин Н. Н. Минерогения Пай-Хоя. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 291 с.
10. Cabri L. J. New Data on Phase Relations in the Cu-Fe-S System. Econ. Geol. 68. 1973. P. 443–454.
11. Cabri L. J. Phase relations in the Au-Ag-Te system and their mineralogical significance // Econ Geol 60: 1965. P. 1569–1609.
12. 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.
13. Hoffman E. Phase relations of michenerite and merenskyite in the Pd-Bi-Te system / E. Hoffman, W. H. Maclean // Economic Geology, 1976. V. 71. P. 1461–1468.
14. 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. Vol. 103(3), 1965. P. 205–255.
15. Makovicky E. Temary and quaternary phase systems with PGE // The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements. CIM S. V. 54 / L.J. Cabri, Ed. Montreal: Canad. ins. of mining and metal, 2002. P. 131–175.
16. NIST XCOM database at URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>
17. Sugaki A., 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. Can. Min. Vol. 42, 2004. P. 17–42.

References

1. Zarhidze D. V., Malykh O. N., Wojtowicz Z. N., et al. *Otchet "Geologicheskoe doizuchenie masshtaba 1:200 000 listov R-41-XXVIII, XXIX (Karskaya ploschad)* (Report "Geological additional exploration of scale 1: 200 000 sheet R-41-XXVIII, XXIX (Kara area)) Naryan-Mar, 2010, 1080 pp
2. Petrakov N. A., Romanov A. A. *Blagorodnometallnaya mineralizatsiya v gabbro-doleritah Tsentralnogo Pai-Hoya* (Noble metal mineralization in gabbro-dolerites of Central Pay-Khoy). Problems subsurface resources management: collection of research papers intern. forum-competition for young scientists (April 23–25. 2014). St. Petersburg, 2014, Part 2, pp. 238.
3. Romanov A. A., Yuferova E. A., Zarhidze D. V. *Nahodka minerala vavzhinit (Ni_2SbTe_2) v gabbro-doleritah hengurskogo kompleksa* (Find of mineral vavrinite (Ni_2SbTe_2) in gabbro-dolerites of Khengursky complex). Mineralogical Perspectives: Proceedings of the International Mineralogical Seminar. Syktyvkar, Geoprint, 2011, pp. 267–269.
4. Chernyshov N. M., Pereslavytsev A. V., Kuznetsov A. N. et al. *Formatsionnye tipy u'tramafit-mafitovykh intruzii Paihoiskoi provintsii i perspektivy ih nikelenosnosti* (Formational types of ultramafic-mafic intrusions of Pay-Khoy province and prospects of their nickel content). Voronezh State University, Voronezh, 1990, 227 pp.
5. Shaybekov R. I. *Doleritovoe telo (Sopcha) Tsentralnogo Pai-Hoya i ego datirovanie s ispolzovaniem U-Pb metoda (SHRIMP II)* (Dolerite body (Sopcha) of Central Pay-Khoy and its dating by U-Pb method (SHRIMP II)). Third Siberian International Conference of Young Scientists on Earth sciences. Novosibirsk Branch of RAS, 2006, pp. 246–248.
6. Shaybekov R. I. *Novye dannye o blagorodnometallnoi mineralizatsii rudoproyavleniya "Savabeiskii" (Tsentralnyi Pai-Hoi)* (New data on the noble metals mineralization «Savabeysky» (Central Pay-Khoy)). Structure, substance and history of the lithosphere of the Timan-Severouralsk segments: Materials of the 19th scientific conference. Syktyvkar, Geoprint, 2010, pp. 206–210.
7. Shaybekov R. I. *Platinosulfidnaya mineralizatsiya v gabbro-doleritah Pai-Hoya* (Platinum-sulphide mineralization in gabbro-dolerite rocks of Pay-Khoy). Syktyvkar, 2013, 108 pp.
8. Shishkin M. A., Shkarubo S. I., Markina N. M., Molchanova E. V., Kalaus S. V. *Osnovnye itogi sozdaniya kompleksnoi gosudarstvennoi geologicheskoi karty m-ba 1:1000000 (3-e pokolenie) lista R-41 (Amderma)* (Main results of the creation of a comprehensive national geological map at scale 1: 1000000 (3rd generation) sheet R-41 (Amderma)). Mat. conference: Geology and mineral resources of the European North-East of Russia, V. II, Syktyvkar, IG Komi SC UB RAS, 2009, pp. 183–185.
9. Yushkin N.P., Kunz A.F., Timonin N.N. *Minerageniya Pai-Hoya* (Minerageny of Pay-Khoy). Ekaterinburg, UB RAS, 2007, 291 pp.
10. Cabri, L. J. New Data on Phase Relations in the Cu-Fe-S System. Econ. Geol. 68. 1973. pp. 443–454.
11. Cabri L. J. Phase relations in the Au-Ag-Te system and their mineralogical significance. Econ Geol 60: 1965, pp. 1569–1609.
12. 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, 1968, pp. 344–358.
13. Hoffman, E. Phase relations of michenerite and merenskyite in the Pd-Bi-Te system / E. Hoffman, W. H. Maclean // Economic Geology, 1976, V. 71, pp. 1461–1468
14. 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. Vol. 103(3), 1965, pp. 205–255.
15. Makovicky E. Temary and quaternary phase systems with PGE. The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements. CIM S. V. 54 / L.J. Cabri, Ed. Montreal: Canad. ins. of mining and metal, 2002, pp. 131–175.
16. NIST XCOM database at URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>
17. Sugaki A., 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. Can. Min. Vol. 42, 2004, pp. 17–42.