

**ЗОЛОТО-ТЕЛЛУРИДНО-ПАЛЛАДИЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ  
КАК НОВЫЙ ТИП В ГАББРО-ДОЛЕРИТАХ ХРЕБТА ПАЙ-ХОЙ  
(Югорский полуостров, Россия)**

**Р.И. Шайбеков<sup>1</sup>, Н.В. Сокерина<sup>1</sup>, С.И. Исаенко<sup>1</sup>, Н.Н. Зыкин<sup>2</sup>, С.Н. Шанина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, Россия

<sup>2</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 142717, Московская обл., Ленинский район,  
пос. Развилка, Проектируемый проезд, 1, Россия

Приводятся результаты исследования пирит-халькопирит-пирротиновой габбро-долеритовой, сфалерит-халькопиритовой кварцево-жильной и ассоциирующейся с ними золото-теллуридно-палладиевой минерализацией ранней и поздней ассоциаций в пределах рудопроявления Крутой (хр. Пай-Хой, Югорский полуостров). Установлено, что ранняя (магматическая) ассоциация золото-теллуридно-палладиевой минерализации представлена минералами тройной системы Ag—Au—Cu, антимонидами и стибителлуридами палладия и арсенидами платины, поздняя (гидротермальная) — минералами двойных систем Au—Ag и Au—Pd, теллуридами ртути, свинца и серебра. Впервые на рудопроявлении Крутой установлены минералы садбериит и тестибнопалладит, при этом последний впервые на Пай-Хое, получены их химические составы и спектры комбинационного рассеяния света. На основании изотопных исследований серы сульфидов, кислорода и углерода кальцийсодержащих минералов халькопирит-кварцевых прожилков предполагается ассимиляция мантийным рудообразующим флюидом вещества вмещающих отложений. Проведено изучение в прожилках флюидных включений, которые по составу газовой фазы делятся на азот-метановые и углекислотно-азотные. Установлено, что минералообразующий флюид отличался низкой газонасыщенностью. В составе минералообразующих флюидов преобладали соли магния и кальция. Температура образования жильного кварца халькопирит-кварцевых прожилков близка к 300—490 °С, сфалерит-халькопиритовая и связанная с ней золото-теллуридно-палладиевая минерализация поздней ассоциации сформировались при температуре не более 260 °С.

*Габбро-долериты, рудопроявление Крутой, хр. Пай-Хой, кварц-халькопиритовые прожилки, золото-теллуридно-палладиевая минерализация, флюидные включения, газовая хроматография, КР-спектроскопия.*

**GOLD–TELLURIDE–PALLADIUM MINERALIZATION, A NEW TYPE  
OF MINERALIZATION IN GABBRO-DOLERITES OF THE PAI-KHOI RIDGE  
(Yugor Peninsula, Russia)**

**R.I. Shaybekov, N.V. Sokerina, S.I. Isaenko, N.N. Zykin, and S.N. Shanina**

Data on gabbro-dolerite pyrite–chalcopyrite–pyrrhotite, quartz vein sphalerite–chalcopyrite, and associated early and late gold–telluride–palladium mineralization of the Krutoi ore occurrence (Pai-Khoi Ridge, Yugor Peninsula) are presented. The early (magmatic) gold–telluride–palladium mineralization is represented by minerals of the ternary system Ag–Au–Cu, palladium antimonides and stibiotellurides, and platinum arsenides, and the late (hydrothermal) one, by minerals of the binary systems Au–Ag and Au–Pd as well as mercury, lead, and silver tellurides. Sudburyite and testibiopalladite have been first found in the Krutoi ore occurrence; moreover, testibiopalladite has been first discovered in the Pai-Khoi Ridge. Their chemical compositions and Raman spectra have been examined. The results of sulfide sulfur, oxygen, and carbon isotope studies of calcium-containing minerals of chalcopyrite–quartz veinlets suggest assimilation of the material of the host deposits by the ore-forming mantle fluids. The fluid inclusions in the veinlets are divided into nitrogen–methane and carbon dioxide–nitrogen according to the composition of the gas phase. It has been established that the mineral-forming fluids were poorly saturated with gas. Magnesium and calcium salts were predominant in them. The temperature of the formation of quartz in the chalcopyrite–quartz veinlets is close to 300–490 °C, and sphalerite–chalcopyrite and associated late gold–telluride–palladium mineralization formed at temperatures not exceeding 260 °C.

*Gabbro-dolerite, Krutoi ore occurrence, Pai-Khoi Ridge, chalcopyrite–quartz veinlets, gold–telluride–palladium mineralization, fluid inclusions, gas chromatography, Raman spectroscopy*

## ВВЕДЕНИЕ

В пределах Югорского полуострова, расположенного на крайнем северо-востоке европейской части России, в Архангельской области, между Баренцевым и Карским морями, о присутствии сульфидной минерализации, пространственно и генетически связанной с силлами и дайками габбро-долеритов, известно давно [Устрицкий, 1954], но первые серьезные работы были проведены только в рамках геологической съемки м-ба 1:50 000 Сопчинской и Нялпейской ГПСР в 1966—1970 гг. Подробное описание геологического строения и состава интрузивных пород приведено в ряде работ [Заборин, 1975; Остащенко, 1979; Чернышов и др., 1990; и др.]. Первые сведения о присутствии благородных металлов в габбро-долеритах хр. Пай-Хой были предоставлены Ю.В. Жуковым. Позднее в работе Н.М. Чернышова приводятся результаты анализа 10 проб на платину и палладий для рудопоявлений Савабейский, Северный, Ручей, Хенгур-1, Первый и Заозерный [Чернышов и др., 1990]. В результате переопробования минерализованных зон на участке Крутой в рамках ГДП-200 ЗАО «Поляргео» были установлены Au — 0.11—0.43 и Pd — 0.03—0.10 г/т, которые не дают представления об их минеральной форме. В отчете Ю.В. Жукова с соавторами отражены лишь сведения о сульфидной минерализации и валовых содержаниях некоторых халькогенидов в габбро-долеритах. Несмотря на проведенные нами ранее исследования сульфидной и благороднометалльной минерализаций в секущих габбро-долериты кварцевых прожилках рудопоявления Крутой [Шайбеков, 2013а; Сокина и др., 2016], эти результаты включали лишь отрывочные данные, не содержащие полноценных сведений о характере их распределения, особенностях минерального состава и условиях образования, а также не давали представления о наличии благородных металлов в самих габбро-долеритах. Нами было проведено комплексное исследование рудной минерализации в габбро-долеритах осевой части силла и в секущих их маломощных кварцевых прожилках в пределах рудопоявления Крутой с целью определения парагенетической последовательности минералообразования, а также уточнения и установления характера распределения минералов благородных металлов и сульфидов с их дальнейшей типизацией.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

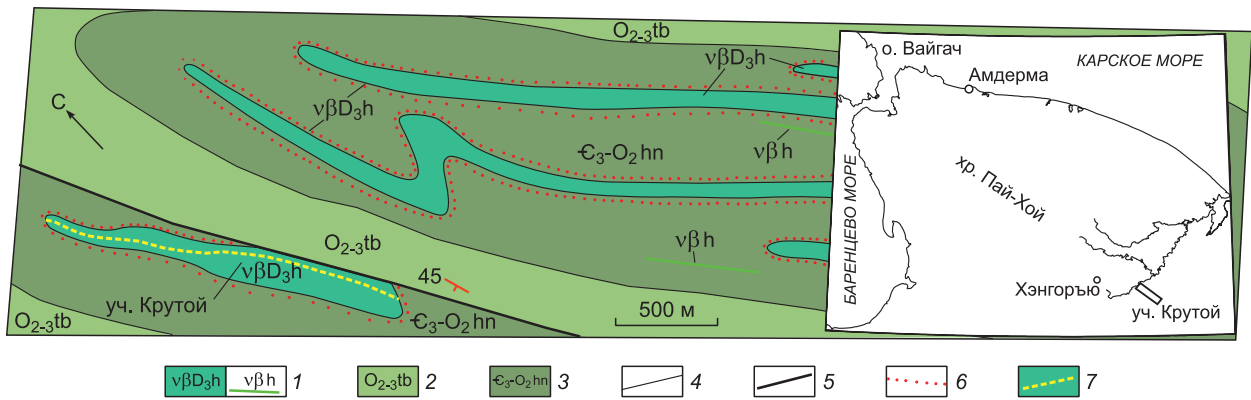
Рудопоявление Крутой (68°53' с.ш. и 63°54' в.д.) располагается в юго-западной части участка Крутой, в верхнем течении р. Хэнгорью на ее правом берегу, в 500 м юго-восточнее устья руч. Крутой и представляет собой вытянутое в северо-западном направлении пластовое тело габбро-долеритов ( $v\beta D_3h$ , рис. 1), согласно залегающее под углом 60—70° среди терригенно-осадочных пород хенгурской свиты ( $E_3-O_2hn$ ). Возраст габбро-долеритов рудопоявления Крутой, как и хенгурского комплекса в целом, до настоящего времени считался позднедевонско-раннекаменноугольным [Государственная геологическая карта..., 2000]. Полученные в последние годы U-Pb датировки цирконов позволили отнести пластовые интрузии к позднему девону [Шайбеков, 2006; Шишкин и др., 2009].

Интрузивное тело, включающее рудную минерализацию, имеет отчетливо выраженное зональное строение: долеритовые порфириты — в области эндоконтакта с вмещающими породами, мелкозернистые светло-зеленовато-серые гломерозернистые долериты — в краевой части, крупно- и среднезернистые кварцевые амфиболизированные призматически-зернистые габбро-долериты — в центральной части. При этом оно имеет по простиранию ряд раздувов и пережимов, в результате чего его видимая мощность колеблется в пределах 60—200 м.

С последними связана зона равномерно вкрапленной (1—2 мм) пирит-халькопирит-пирротиновой минерализации (5—20 %, в среднем 7—10 %) с видимой мощностью от нескольких десятков сантиметров до 20 м, которая прослежена канавами через 80—120 м на расстояние 1.5 км (рис. 2). Рудная минерализация характеризуется существенным преобладанием пирротина с подчиненным (до 1 %) количеством халькопирита и пирита и имеет четкое структурное положение в виде червеобразных прожилков, сростков, включений, плотных скоплений, ассоциируясь с кварц-альбитовым мирмецитом, заполняет интерстиции между хаотично расположенными призматическими зернами плагиоклаза, иногда с образованием прерывистых каемок вдоль их границ. Кроме того, интрузивное тело секут многочисленные маломощные (5—10 см) халькопирит-кварцевые прожилки.

Габбро-долериты, содержащие рудную минерализацию, несмотря на метаморфизм, сохранили реликтовую структуру и состоят из частично или сильно сосюритизированного плагиоклаза, в разной степени измененного клинопироксена, обрастающей его бурой роговой обманки, кварца и кварц-альбитового мирмецита, а также зерен акцессорных минералов (апатита, ильменита, титанита, пирротина, рутила, циркона и др.). Химический состав пород рудопоявления Крутой в целом идентичен составу пород хенгурского габбро-долеритового комплекса (табл. 1).

По данным предшественников (химический анализ бороздовых проб), концентрации полезных компонентов в габбро-долеритах составляли (%): меди — 0.01—0.1, никеля — 0.001—0.01, кобальта — 0.007—0.01. По последним данным на основе химанализа бороздовых, штучных, сколковых проб габ-



**Рис. 1. Геологическая карта участка Крутой.**

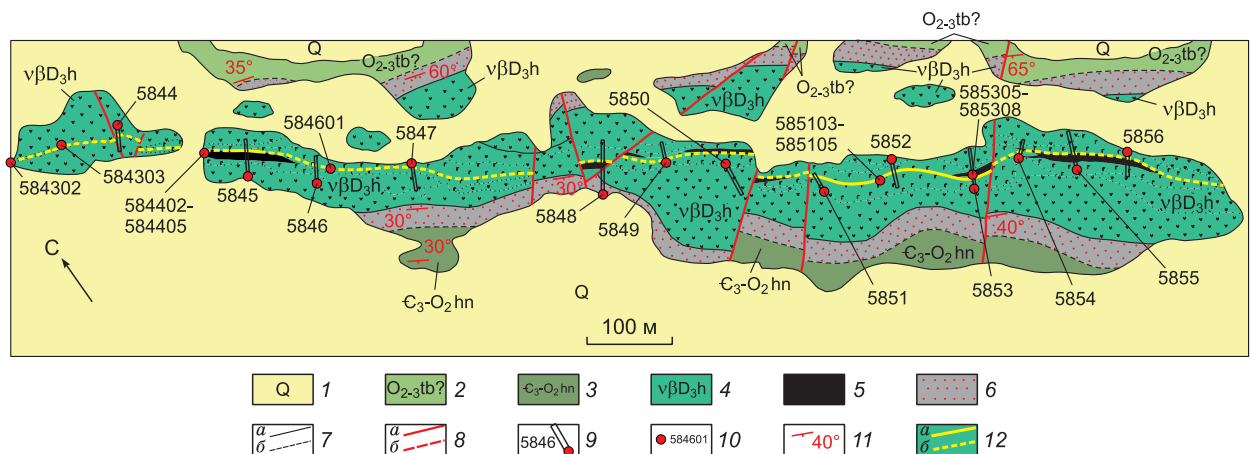
1 — хенгурский (центрально-пайхойский) габбро-долеритовый комплекс: габбро-долериты, пикродолериты, долериты; 2 — тальбейтывисская свита: известковистые песчаники, алевролиты, песчаные известняки, кремнисто-глинистые сланцы, локально — базальты, туфолавы; 3 — хенгурская свита: сланцы — глинисто-кремнистые, кремнисто-глинистые и их углеродистые разновидности, известняки, локально — базальты, туфолавы, песчаники, алевролиты, гравелиты, конгломераты, алевросланцы и углеродисто-глинистые сланцы; 4 — геологические границы; 5 — разрывные нарушения; 6 — контактовые роговики; 7 — зона распространения золото-теллуридно-палладиевой минерализации (предполагаемая).

бро-долеритов и кварц-сульфидных прожилков содержания меди составили 0.09—0.67 %, при этом концентрации никеля и кобальта оказались ниже пределов обнаружения пробирно(Рb)-атомно-абсорбционного метода.

Более подробная петрохимическая характеристика габбро-долеритов и вмещающих пород приведена в работе В.И. Силаева [1978].

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

SEM-изображения рудной минерализации были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega3 LMN с ускоряющим напряжением — 20 кВ, током пучка — 15 нА в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (аналитики С.С. Шевчук, Е.М. Тропников, г. Сыктывкар). Ана-



**Рис. 2. Геологическая карта участка «Крутой», составленная О.В. Забориным [Жуков и др., 1969], с исправлениями и дополнениями авторов.**

1 — четвертичные отложения; 2 — тальбейтывисская свита ( $O_{2-3}tb$ ). Сланцы глинистые темно-серые тонкоплитчатые; 3 — хенгурская свита ( $\epsilon_3-O_2hn$ ). Сланцы кварц-албитовые светло-серые плитчатые; 4 — хенгурский комплекс габбро-долеритовый ( $v\beta D_3h$ ). Габбро-долериты: меланократовые кварцевые крупнозернистые, мезолейкократовые порфировидные среднезернистые и кварцсодержащие, гломерозернистые; 5 — зона вкрапленной пирит-халькопирит-пирротиновой минерализации (более 10 %); 6 — зона контактовых роговиков; 7 — геологические границы:  $a$  — достоверные,  $b$  — предполагаемые; 8 — разрывные нарушения:  $a$  — достоверные,  $b$  — предполагаемые; 9 — каналы и их номера, красные кружки — авторские точки наблюдения/точки пробоотбора; 10 — номера проб; 11 — углы залегания пород; 12 — зона распространения золото-теллуридно-палладиевой минерализации:  $a$  — достоверная,  $b$  — предполагаемая.

Таблица 1.

## Химический состав пород, мас. %

Компонент	Содержание компонентов		
	584401 (меланократовый крупнозернистый габбро-долерит, рудопоявление Крутой)	585308 (кварцсодержащий меланократовый крупнозернистый габбро-долерит, рудопоявление Крутой)	Ср. хим. состав (108 анализов) пород хенгурского комплекса [Шайбеков, 2013]
SiO <sub>2</sub>	49.20	51.21	49.04
TiO <sub>2</sub>	1.99	2.21	1.44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.10	15.19	13.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.55	2.95	3.12
MnO	0.18	0.19	0.19
MgO	5.50	4.65	7.19
CaO	7.63	6.72	10.15
Na <sub>2</sub> O	2.54	3.56	2.20
K <sub>2</sub> O	0.24	0.53	0.63
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	0.09
П.п.п.	4.22	3.89	4.01
Сумма	100.00	100.00	100.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	14.39	12.83	13.46
FeO	8.86	8.90	8.41
H <sub>2</sub> O	0.40	0.49	0.37

Примечание. Прочерк — не обнаружено (здесь и далее). Определение химического состава пород проведено рентгенофлуоресцентным методом на приборе XRF-1800 Shimadzu, аналитик С.Т. Неверов. H<sub>2</sub>O — влага, данные по содержанию FeO и п.п.п. получены методом количественного химического анализа, Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O получены на пламенном спектрофотометре FP-640.

лиз 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 и диаметром пучка 2 мкм. Время экспозиции — 500 000 импульсов. Эталоны и характеристические линии: Pt (Pt L<sub>α</sub>), Pd (Pd L<sub>α</sub>), Au (Au M<sub>α</sub>), Ag (Ag L<sub>α</sub>), Pb, Te (Pb Te, Pb M<sub>α</sub>, Te L<sub>α</sub>), Bi (Bi M<sub>α</sub>), Sb (Sb L<sub>α</sub>), Cu (Cu K<sub>α</sub>), Ni (Ni K<sub>α</sub>), Fe, S (FeS<sub>2</sub>, Fe K<sub>α</sub>, S K<sub>α</sub>), Hg (HgTe, Hg M<sub>α</sub>), Co (Co K<sub>α</sub>), Zn (Zn K<sub>α</sub>, L<sub>α</sub>), As (InAs, As L<sub>α</sub>), Se (Se L<sub>α</sub>), Cd (Cd L<sub>α</sub>), Ti (Ti K<sub>α</sub>), V (V K<sub>α</sub>), Mn (Mn K<sub>α</sub>), Ca (волластонит K<sub>α</sub>), Si, O (SiO<sub>2</sub>, Si K<sub>α</sub>), Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al K<sub>α</sub>), K (KBr K<sub>α</sub>), Mg (MgO K<sub>α</sub>), Sc (Sc K<sub>α</sub>), Na (альбит K<sub>α</sub>), U (U M<sub>α</sub>), Th (ThO<sub>2</sub> M<sub>α</sub>), P (P K<sub>α</sub>), Sn (Sn L<sub>α</sub>). Пределы обнаружения рудообразующих элементов (критерий >3σ) (мас. %): для Se, Cd, Ni — 0.1—0.2, для S, Fe, Zn, Cu, Pb, Sb, Hg, Te, Co, Sn, Pd, As, Bi, Ag — 0.2—0.4, для Pt — 0.5, для Mo — 0.6, для Au — 0.4—0.8.

Для выделения и отбора мономинеральных фракций из халькопирит-кварцевых прожилков использовалась следующая методика. Пробу весом 300 г измельчали до размерности +0.25—0.50 мм с последующим ситованием, затем пропускали через бромформ с целью отделения легкой фракции и дополнительно разделяли на магнитную и немагнитную части с помощью магнита Сочнева. После этого полученные концентраты легкой, магнитной и немагнитной фракций чистили вручную под бинокулярным микроскопом (аналитики Н.К. Хачатурян, Р.И. Шайбеков, г. Сыктывкар) с выделением монофракций рудных и нерудных минералов. Выделенные монофракции на первом этапе помещали на двухсторонний проводящий углеродный скотч с последующим напылением углеродом для изучения естественных поверхностей и полостей с применением сканирующего электронного микроскопа, на втором этапе эти же зерна минералов помещали в эпоксидную шайбу с последующей приполировкой поверхности для изучения внутреннего состава. Отдельно отбирали пробы с зернами халькопирита для проведения изотопного анализа серы и агрегаты кварц-альбит-эпидотового состава для измерения изотопного состава углерода и кислорода.

Анализ содержаний благородных металлов производился в Центральной лаборатории ФГБУ «ВСЕГЕИ» по разработанной методике № 17 (аналитики В.А. Шишлов, В.Л. Кудряшов, г. Санкт-Петербург) на основании патента РФ № 2425363 от 27.07.2011 г. «Способ определения количественного содержания благородных металлов в горных породах и отвалах горно-рудного производства», приоритет от 17.05.2010 г. Суть методики заключается в химическом разложении проб с применением комплекса концентрированных кислот, сплавлении остатка с пероксидом натрия, растворении сплава в хло-

ководородной кислоте и анализе раствора методом ICP-MS на масс-спектрометре «Agilent 7700х», обеспечивающем эффективное удаление изобарических помех (изобарических наложений) при определении ряда элементов платиновой группы. Применение данной методики позволяет достичь пределов определения 0.002 г/т для всех шести элементов.

Структура минералов определялась с помощью рентгеновского дифракционного анализа (дифрактометр Shimadzu XRD-6000 Cu-анод, ток 30 мА, напряжение 30 кВ, фильтр Ni, шаг сканирования  $2\theta$  —  $0.05^\circ$ , скорость съемки 1 г/мин) (аналитики Ю.С. Симакова, Б.А. Макеев, г. Сыктывкар), Предел допустимой систематической погрешности измерения углов  $2\theta$  составлял  $\pm 0.025^\circ$ .

Изотопный анализ серы халькопирита из халькопирит-кварцевых прожилков проводился в лаборатории стабильных изотопов ЦКП ДВГИ ДВО РАН (аналитик Т.А. Веливецкая) на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ThermoFinnigan, Bremen, Germany) с использованием двойной системы напуска по методике В.А. Гриненко [1962]. Изотопный состав серы приведен относительно стандарта CDT (сера троилита из метеорита Каньон-Дьябло). Вес анализируемых образцов составлял 10 мг. Погрешность определения  $\delta^{34}\text{S}$  ( $2\sigma$ ) составляет  $\pm 0.1\%$ .

Разложение карбонатов для масс-спектрометрических исследований проводилось в ортофосфорной кислоте. Измерения изотопного состава углерода и кислорода кальцитов (аналитик И.В. Смолева, г. Сыктывкар) проводились методом проточной масс-спектрометрии в потоке гелия (CF-IRMS) на аналитическом комплексе фирмы ThermoFisher Scientific (Бремен, Германия), включающем систему подготовки и ввода проб GasBench II, соединенную с масс-спектрометром DELTA V Advantage. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  приведены относительно стандарта PDB,  $\delta^{18}\text{O}$  — относительно SMOW. При измерениях использовались международные стандарты NBS 18 и NBS 19. Погрешность определения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  составляла  $\pm 0.1\%$ .

Изучение флюидных включений в кварце проводилось в полированных пластинах методами гомогенизации и криометрии с использованием термокриостолика THMSG600 фирмы Linkam, позволяющего проводить измерения при температурах от  $-196$  до  $600^\circ\text{C}$ . Погрешность замеров менее  $1^\circ\text{C}$ . Соленость растворов во включениях измерялась по температуре плавления льда. Солевой состав включений определялся по температуре эвтектики водно-солевой системы [Борисенко, 1977]. Сингенетичность включений определялась по их расположению. К сингенетичным включениям были отнесены первичные и первично-вторичные включения, которые располагаются поодиночке, небольшими группами либо в трещинках, не выходящих за пределы индивида.

Регистрация спектров комбинационного рассеяния света (КР) для диагностики минералов и газового состава индивидуальных включений в полированных пластинах проводилась на спектрометре LabRam HR 800 (Horiba Jobin Yvon) в ИГ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар), на базе ЦКП «Геонаука» при комнатной температуре. Условия регистрации спектров: решетка монохроматора 600 ш/мм, конфокальное отверстие 300 и 500 мкм, щель 100 мкм, время экспозиции 1—10 с, количество циклов накопления сигнала 10, мощность возбуждающего излучения He-Ne лазера (длина волны 632.8 нм) — 20 мВт, Ar<sup>+</sup>-лазера 12 мВт (514.5 нм). После регистрации спектров комбинационного рассеяния света изученных образцов с помощью свертки функций Гаусса-Лоренца стандартной программы обработки спектров LabSpec (5.36) были определены положения максимумов линий спектров.

Валовый состав газов включений был проанализирован на газовом хроматографе «Цвет 800» с приставкой для термического вскрытия включений (аналитик С.Н. Шанина, г. Сыктывкар), для анализа использовались навески кварца массой 0.5 г, фракции 0.25–0.50 мм. Вскрытие включений производилось при температурах 500, 600, 800 и  $1000^\circ\text{C}$ . Нагрев образцов проводился в реакторе в атмосфере гелия. Чувствительность метода по основным компонентам составила (мкл):  $2 \cdot 10^{-2}$  для  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$ ,  $3 \cdot 10^{-2}$  —  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ ,  $3 \cdot 10^{-3}$  —  $\text{H}_2\text{O}$  [Борисенко, 1977].

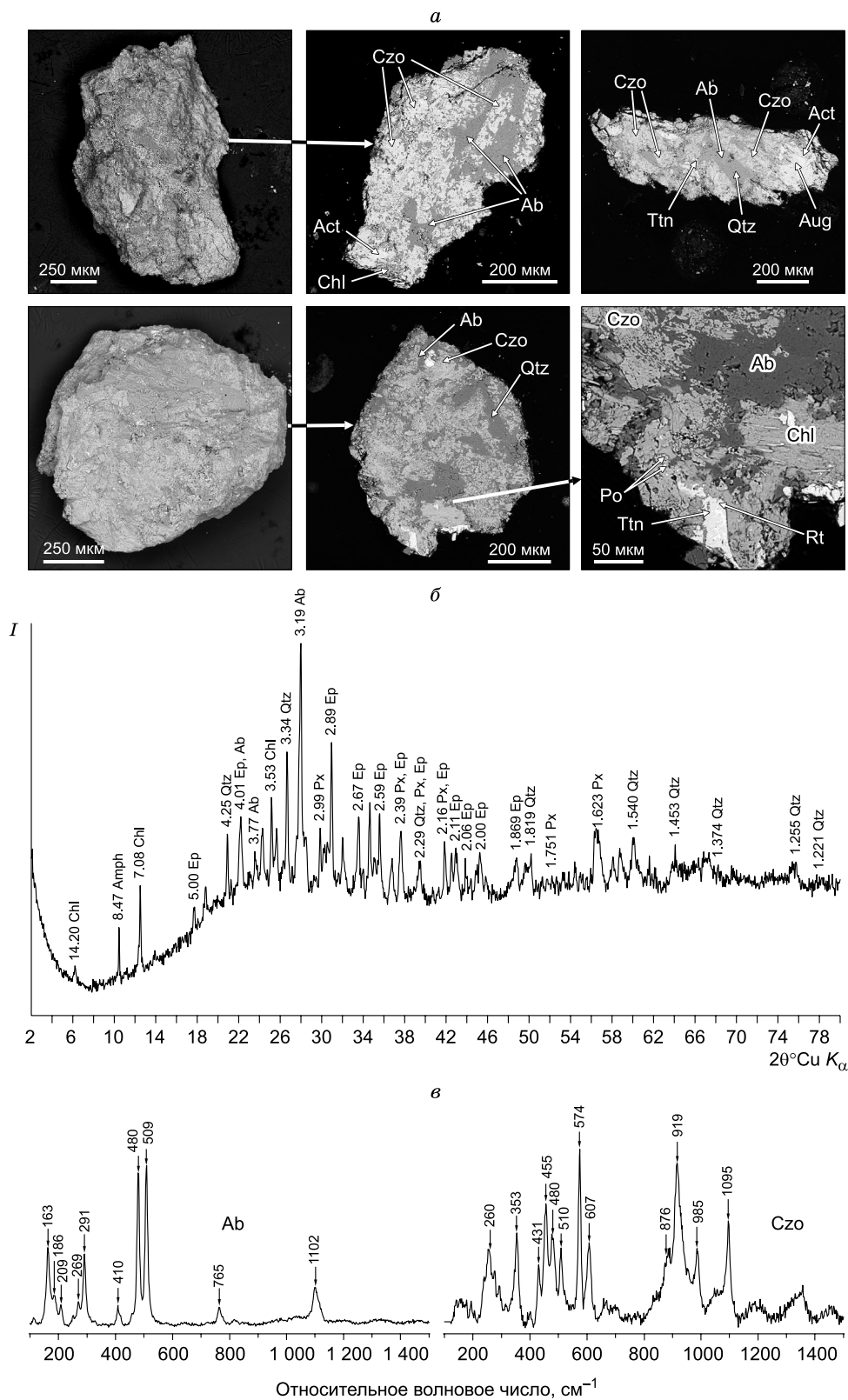
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Минералого-геохимическая характеристика.** Рудная зона в пределах интрузивного тела неравномерно распределена и приурочена преимущественно к кварцевым и кварцсодержащим меланократовым крупнозернистым габбро-долеритам. Эти данные подтверждаются полевыми наблюдениями, результатами анализа сравнительно небольшого количества бороздовых (пунктирно-бороздовых) и штупных проб [Шайбеков, 2013а].

Детальные исследования рудной зоны позволили выделить пирит-халькопирит-пирротиную и сфалерит-халькопиритовую кварцево-жильную минерализацию, с которыми пространственно и генетически связана золото-теллуридно-палладиевая минерализация.

*Сфалерит-халькопиритовая кварцево-жильная минерализация* выделена впервые в рамках данной работы на рудопроявлении и приурочена к маломощным халькопирит-кварцевым прожилкам.

В результате анализа минерального состава халькопирит-кварцевых прожилков установлено, что наибольшая их часть представлена кварцем (более 98 %), 1 % приходится на сфалерит + халькопирит и менее 1 % на минеральные агрегаты кварц-альбит-эпидотового состава.



**Рис. 3. Кварц-альбит-эпидотовый агрегат.**

*a* — BSE-изображения: слева — естественная поверхность, справа — полированная поверхность; *б* — дифрактограмма агрегата; *в* — дифрактограммы альбита и клиноцоизита. Czo — клиноцоизит, Ab — альбит, Aug — авгит, Chl — хлорит, Act — актинолит, Qtz — кварц, Ttn — титанит, Po — пирротин, Rt — рутил, Ep — эпидот, Amph — амфибол, Px — пироксен.

Таблица 2. Химический состав минералов кварц-альбит-эпидотового агрегата, мас. %

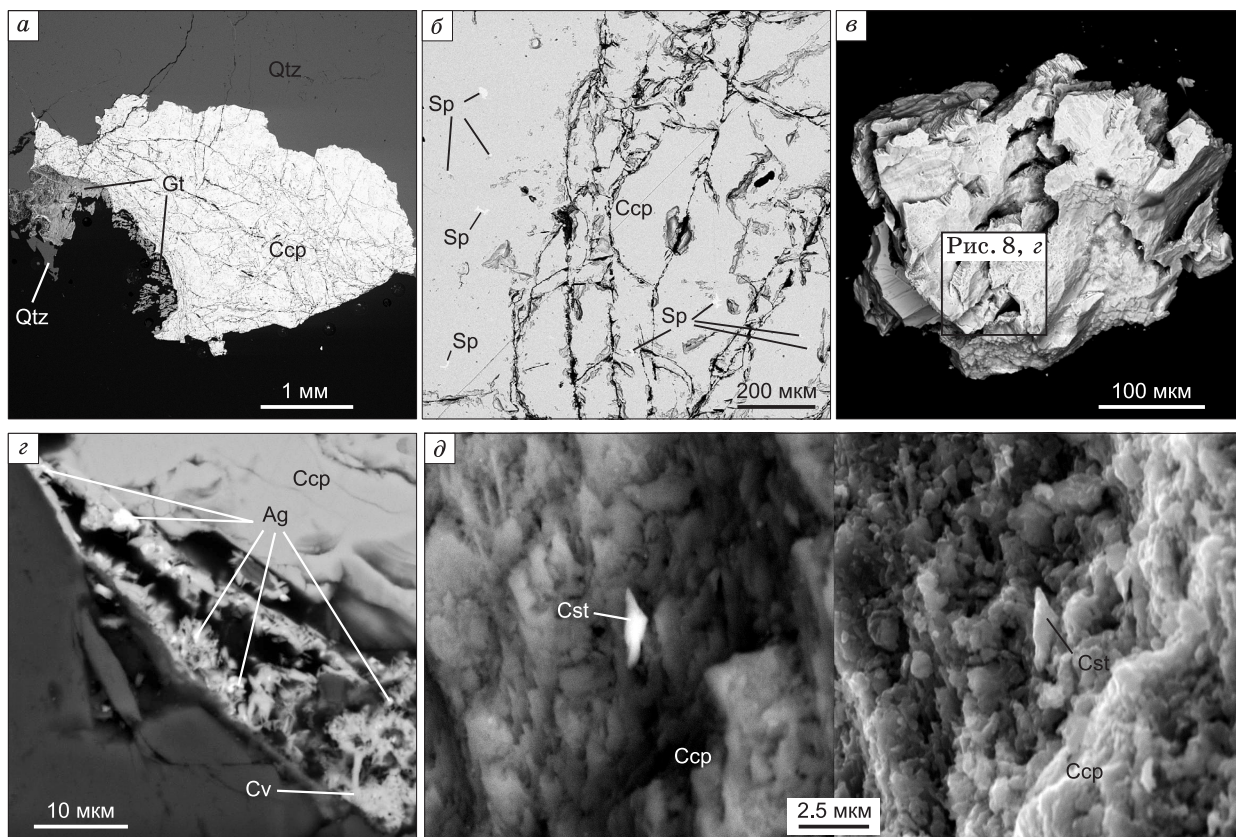
Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	FeO	Σ
<b>Эпидот (клиноцоизит)</b>											
—	—	30.71	40.80	—	22.29	—	—	—	—	3.99	97.79
2.95	—	29.49	46.06	—	17.93	—	—	—	—	2.37	98.80
—	—	31.30	39.79	—	24.21	—	—	—	—	4.77	100.07
—	—	30.69	40.23	—	24.55	—	—	—	—	4.42	99.89
—	—	32.74	39.63	—	24.68	—	—	—	—	2.26	99.31
—	—	32.55	39.95	—	24.61	—	—	—	—	2.15	99.26
—	—	31.55	40.15	—	24.22	0.33	—	—	—	3.70	99.95
<b>Плагиоклаз (альбит)</b>											
11.13	—	20.07	68.80	—	0.37	—	—	—	—	—	100.37
11.26	—	20.08	68.18	0.13	0.53	—	—	—	—	—	100.18
11.25	—	19.94	69.13	—	—	—	—	—	—	—	100.32
11.26	—	20.03	69.12	—	—	—	—	—	—	—	100.41
11.08	—	20.04	68.59	—	0.33	—	—	—	—	—	100.03
11.01	—	20.51	68.82	—	—	—	—	—	—	—	100.34
<b>Хлорит</b>											
—	17.32	20.13	27.90	—	—	—	—	—	0.27	22.91	88.54
—	16.55	19.80	29.24	—	0.15	—	—	—	0.33	21.84	87.91
<b>Амфибол (актинолит)</b>											
—	15.21	1.70	54.68	—	12.13	0.19	—	—	0.25	14.59	98.75
—	16.28	1.37	56.12	—	13.07	0.19	—	—	0.16	12.20	99.39
<b>Пироксен (авгит)</b>											
—	13.15	1.58	52.06	—	21.92	—	—	—	—	11.10	99.81
<b>Титанит</b>											
—	—	1.7	30.71	—	28.34	—	39.02	—	—	0.46	100.23
<b>Рутил</b>											
—	—	—	—	—	—	—	99.93	1.09	—	—	101.02
<b>Кварц</b>											
—	—	—	100.23	—	—	—	—	—	—	—	100.23

Примечание. Химические составы клиноцоизита, актинолита, хлорита приведены без учета H<sub>2</sub>O.

*Кварц* является основным минералом прожилков и представляет собой зерна прозрачного, молочного-белого цвета различной размерности, которые находятся в сростках с халькопиритом и агрегатами кварц-альбит-эпидотового состава. Нередко зерна кварца покрыты гидроксидами железа.

*Агрегаты кварц-альбит-эпидотового состава* диагностированы нами при изучении минералов тяжелой фракции под бинокулярном. Они представляют собой сахаровидные, неокатанные зерна угловатой формы от светло-зеленого до серого цвета с размерами зерен от долей до первых миллиметров. По данным электронно-микроскопических исследований, они представляют собой плотные сростки кварца, альбита, авгита, клиноцоизита и хлорита (рис. 3, а). По данным рентгенофазового анализа (см. рис. 3, б), кроме упомянутых выше минералов, по соотношению интенсивностей базальных рефлексов и наличию отражения  $hkl = 0.60$  с  $d/n \sim 1.497 \text{ \AA}$  можно предположить наличие диоктаэдрической слюды (мусковита). Методом рамановской спектроскопии нами были подтверждены основные минералы агрегата — альбит и клиноцоизит (рис. 3, в). Химический состав минералов кварц-альбит-эпидотового агрегата приведен в табл. 2.

*Халькопирит* является главным минералом кварцевых прожилков. Он встречается в основном в виде гнезд, шпиров размером до 2 см, реже в виде мелких (1—4 мм) вкраплений и прожилков в кварце (рис. 4, а). Поверхность его характеризуется интенсивной трещиноватостью, отмечаются пустоты, за-



**Рис. 4. Рудная минерализация кварц-сульфидных прожилков (BSE-изображения).**

*a* — халькопирит в сростке с кварцем, полированная поверхность; *б* — халькопирит с включениями сфалерита; *в* — зерно, естественная поверхность; *з* — халькопирит с каймой ковеллина с включениями серебра; *д* — халькопирит в сростке с касситеритом, справа в режиме SE (естественная поверхность). Qtz — кварц, Gt — гидрогетит, Ccp — халькопирит, Sp — сфалерит, Ag — серебро, Cv — ковеллин, Cst — касситерит.

полненные кварцем (см. рис. 4, *в*). Химический состав халькопирита ( $n = 15$ ) варьирует в следующих пределах (мас. %, в скобках — среднее): Cu — 24.82—33.86 (32.84), Fe — 28.56—34.92 (30.99), S — 33.96—39.18 (35.54) при сумме 99.31—100.88 (99.84), в одном случае установлена примесь Ni — 3.97 и Ag — 2.96 мас. % (табл. 3). Отношение Cu/Fe изменяется от 0.71 до 1.11, при средней величине 1.06. Как видно из этих значений, в минерале отмечается дефицит меди, железо и сера часто находятся в избытке. Средняя расчетная эмпирическая формула —  $Cu_{0.95}Fe_{1.02}S_{2.03}$ .

По периферии, реже по трещинам в халькопирите развиваются гидроксиды железа и ковеллин с включениями серебра (см. рис. 4, *a*, *з*; табл. 3, 4). Также в виде включений и сростков в нем отмечается сфалерит (см. рис. 4, *б*; табл. 3) с примесями Cd, Fe и Cu (последние, вероятнее всего, за счет захвата при анализе окружающей матрицы), касситерит, золото, порпецит, эмпрессит, гессит, алтаит и колорадоит.

*Гидроксиды железа (гидрогетит)* отмечаются в зонах гипергенеза и являются результатом окисления сульфидных минералов. Они имеют размеры в первые миллиметры, как правило, образуют каемки по периферии зерен халькопирита с включениями пирротина и сфалерита, нередко имеют вид образований с коломорфной концентрически-зональной текстурой (рис. 5, *a–в*). Химический состав гидроксидов железа ( $n = 23$ , см. табл. 4) следующий (мас. %):  $Fe_2O_3$  — 65.74—76.81 (73.67) и примеси: CuO — 1.81—2.49 (2.04),  $SO_3$  — 2.72—5.72 (4.26),  $SiO_2$  — 0.56—2.03 (1.04),  $Al_2O_3$  ( $n = 5$ ) — 0.17—0.28 (0.21),  $P_2O_5$  ( $n = 4$ ) — 0.23—0.39 (0.29),  $K_2O$  ( $n = 1$ ) — 0.19, CaO ( $n = 1$ ) — 0.15 при сумме (без учета  $H_2O$ ) 72.66—84.48 (81.12). Ввиду невозможности по химическому составу интерпретации минеральной принадлежности гидроксидов железа был использован метод рамановской спектроскопии (см. рис. 5), в результате получены три узких пика на 217, 287, 396  $cm^{-1}$ . Согласно [Oh et al., 1998], эти волновые числа характерны для гетита, который имеет следующие волновые числа (в скобках приводятся данные по другим источникам, но отраженные в этой же статье, жирным выделены сильные пики,  $cm^{-1}$ ): 205, 247 (245), **300 (303), 386 (390, 397)**, 418 (420), 481 (480, 485), 549 (550, 554).



Таблица 3. Химический состав сульфидных минералов, мас. %

Cu	Fe	S	Zn	Cd	Ag	Σ
<b>Халькопирит</b>						
24.82	34.92	33.96	—	—	2.96	100.63*
31.59	28.56	39.18	—	—	—	99.33
32.96	30.82	35.58	—	—	—	99.36
33.78	30.75	35.16	—	—	—	99.69
33.78	31.36	35.73	—	—	—	100.88
33.86	31.07	35.48	—	—	—	100.42
33.56	31.03	35.39	—	—	—	99.98
33.55	30.91	35.17	—	—	—	99.63
33.40	30.39	35.72	—	—	—	99.51
33.77	30.92	35.35	—	—	—	100.04
33.43	30.87	35.18	—	—	—	99.49
33.45	30.85	35.21	—	—	—	99.51
33.57	30.48	35.48	—	—	—	99.53
33.38	30.63	35.30	—	—	—	99.31
33.72	31.35	35.14	—	—	—	100.22
<b>Сфалерит</b>						
1.64	7.46	33.12	56.02	1.96	—	100.21
—	7.90	33.94	56.67	1.88	—	100.38
—	10.28	33.29	55.40	1.90	—	100.87
3.10	8.33	33.42	52.31	2.06	—	99.21
1.22	7.82	33.43	55.42	1.97	—	99.85
1.29	7.55	33.41	55.37	1.71	—	99.33
<b>Ковеллин</b>						
52.29	11.58	36.43	—	—	0.53	100.83
60.01	1.55	34.03	—	—	3.66	99.25
57.28	7.48	35.63	—	—	0.37	100.76

\* Ni — 3.97.

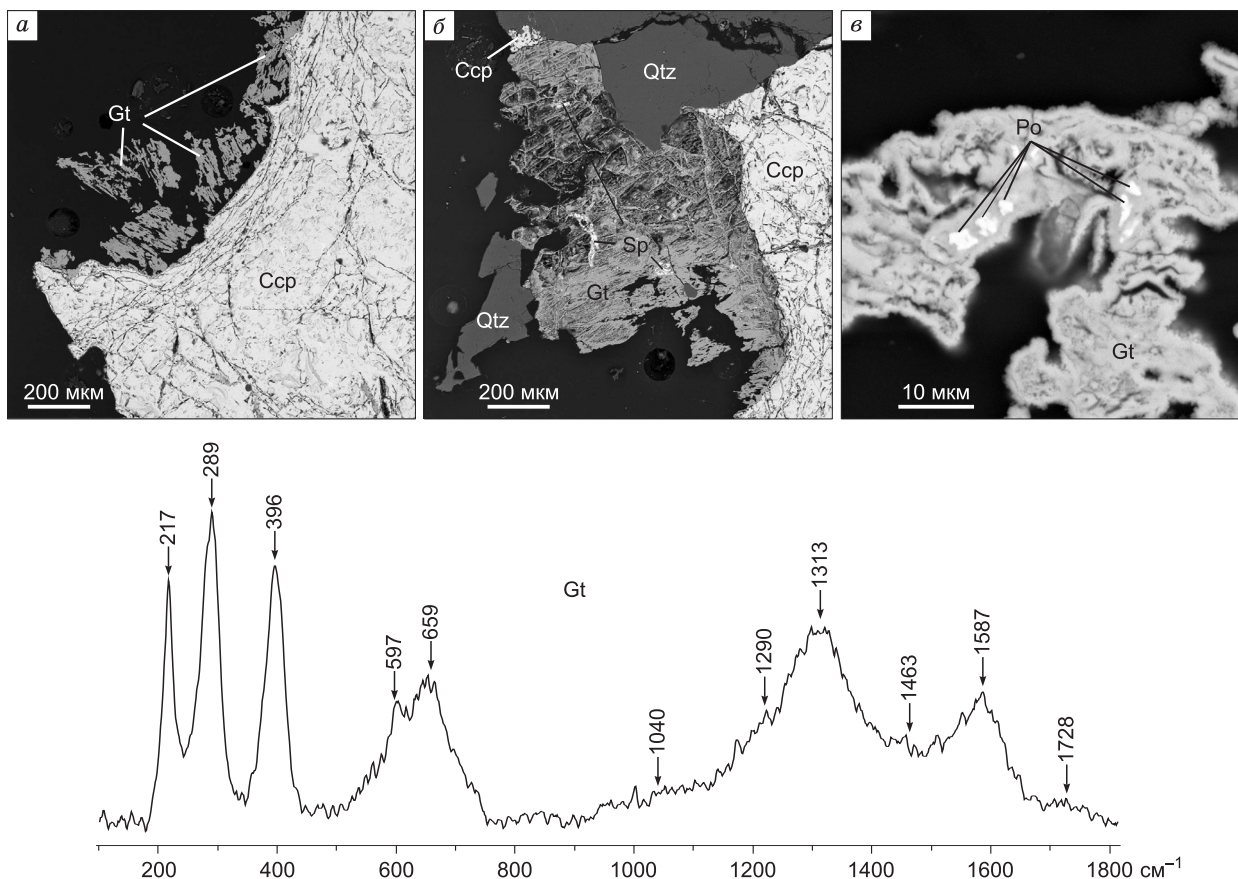
меры выделений халькопирита варьируют от первых десятков микрометров до нескольких миллиметров. Химический состав халькопирита варьирует незначительно и содержит (см. табл. 5,  $n = 6$ , мас. %): Cu — 32.26—33.78 (33.30), Fe — 29.85—32.64 (30.68), S — 34.40—35.73 (35.11) при сумме 98.09—100.88 (99.22), в качестве примеси в единичном случае зафиксирована примесь цинка. Отношение Cu/Fe изменяется от 1.06 до 1.11 при средней величине 1.09. Халькопирит данной ассоциации характеризуется более стабильным составом по сравнению с халькопиритом сфалерит-халькопиритовой ассоциации, где ярко наблюдается дефицит Cu.

Диагностированные нами титановые минералы являются, скорее всего, результатом распада твердого раствора титаномagnetита и представлены титанитом и ильменитом (см. табл. 6). Ильменит представлен преимущественно удлинёнными каплевидными зёрнами, образующими мirmekитовые структуры, реже крупные скелетные выделения, которые интенсивно замещаются титанитом, обрастающие роговой обманкой, нередко хлоритизированной. Данные образования имеют размеры от первых микрометров до 7—10 мм и находятся в ассоциации с сульфидами, которые образуют ксеноморфные зёрна в их интерстициях, что может свидетельствовать о более позднем происхождении сульфидов. В единичных случаях в виде включений размером в первые десятки микрометров в ильмените отмечается борнит.

Кроме вышеописанных рудных минералов встречены также сросток кобальтина (Co — 32.24, Ni — 2.40, As — 45.79, S — 19.20, сумма 100.03 мас. %) со сфалеритом в ильмените, включение молибденита в роговой обманке (Mo — 58.15, S — 41.37, сумма 99.52 мас. %), самородный висмут и касситерит, локализующиеся в интерстициях породообразующих минералов.

*Пирит-халькопирит-пирротиновая минерализация.* Этот тип минерализации характерен для габбро-долеритов осевой части интрузивного тела. Наиболее распространенный рудный минерал данного типа минерализации — *пирротин*. Он представляет собой ксеноморфные, кавернозные, трещиноватые зёрна (от первых микрометров до нескольких сантиметров) неправильной формы, располагающиеся среди породообразующих минералов и ассоциирующиеся с апатитом, ильменитом, титанитом, калиевыми полевыми шпатами, пиритом, халькопиритом и кварцем (рис. 6, табл. 5, 6). Пирротин имеет стабильный химический состав с незначительным дефицитом железа и избытком серы (см. табл. 5,  $n = 14$ , мас. %): Fe — 59.62—60.76 (60.09), S — 39.06—40.20 (39.50), при сумме 99.04—100.29 (99.60). Расчетная эмпирическая формула имеет вид  $Fe_{0.93}S_{1.00}$ . Кроме того, в виде включений в пирротине присутствуют *сфалерит* (в отличие от включений в халькопирите кварц-сульфидных прожилков не содержит примеси Cd), зёрна *гессита* и *алтаита*, нередко по трещинам отмечаются самородный *свинец* и *галенит* с примесью селена и теллура, в единичном случае отмечен сросток пирротина и *кубанита* (см. рис. 6, в).

*Халькопирит* встречается реже и образует самостоятельные вкрапленники в силикатах, каемки по периферии пирротина, нередко образуя с последним гнезда, где занимает центральную часть. В виде сростков с халькопиритом отмечается галенит с примесью селена. Раз-



**Рис. 5.** BSE-изображения гидроксидов железа.

*a, б* — кайма гидроксидов железа с включениями пирротина и сфалерита, *в* — формы окисления по пирротину. Нижний рисунок — рамановский спектр гидрогетита.

*Золото-теллуридно-палладиевая минерализация.* Данный тип минерализации выделяется впервые на Пай-Хое и по составу, и пространственному положению в интрузивном теле может быть разделен на две ассоциации — раннюю и позднюю.

**Р а н н я я** (минералы тройной системы Ag—Au—Cu, садбериит, тестибиопалладит и сперрилит) магматическая ассоциация, присутствующая только в связи с пирит-халькопирит-пирротиновой минерализацией осевой части габбро-долеритового силла. Проведенный нами анализ трех проб габбро-долеритов осевой части интрузива с пирит-халькопирит-пирротиновой минерализацией методом ICP-MS показал следующие концентрации элементов платиновой группы (г/т): Ru — менее 0.0020, Rh — до 0.0110, Pd — до 0.0470, Ir — до 0.0070, Pt — до 0.0190, Au — до 0.0057. Как правило, в пределах рудопроявления Крутой ранняя ассоциация золото-теллуридно-палладиевой минерализации представляет собой неравномерно рассеянную вкрапленность в пирротине, а также в роговой обманке, альбите и хлорите, при этом в последних случаях она всегда находится в ассоциации с сульфидами.

*Минералы тройной системы Ag—Au—Cu* рассматриваемой ассоциации представлены преимущественно продуктами распада твердых растворов Ag—Au—Cu, которые в виде мелких изометричных зерен размером до 5 мкм (в основном в первые микрометры) локализуются в виде включений в породообразующих минералах и пирротине (рис. 7, *a, e*). Состав триады сильно варьирует за счет присутствия значительных примесей меди и серебра, при этом не наблюдается какой-то определенной зависимости от места локализации или размера включений, что больше обусловлено незначительной выборкой. Только для двух случаев можно говорить о близости химических составов составов к *купроауриду* (AuCu<sub>3</sub>) и *тетрааурикуприду* (AuCu), остальные же являются разновидностями *медистого золота* или *золотистой меди* (табл. 7). Данное выделение условно, так как все минералы системы Ag—Au—Cu имеют различную сингонию, а размеры микровключений медистого золота не позволяют получить по ним структурные данные.

Таблица 4.

Химический состав гидроксидов железа (гидрогетита), мас. %

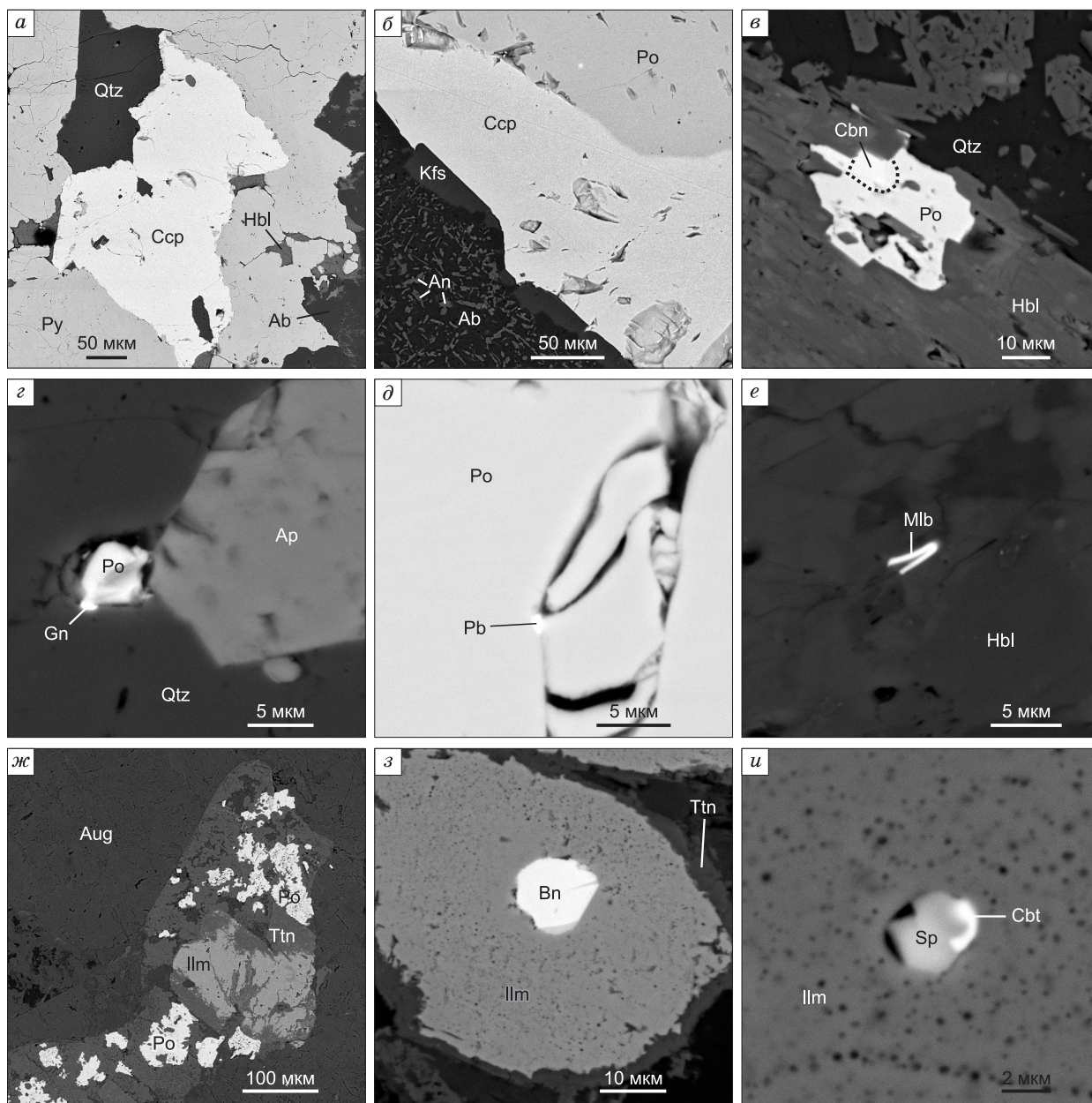
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	H <sub>2</sub> O*	Σ (без учета H <sub>2</sub> O)
0.25	1.22	—	4.40	—	—	74.03	2.49	17.61	82.39
0.17	1.75	—	2.74	—	0.15	65.74	2.10	27.34	72.66
—	1.81	0.27	3.40	—	—	72.02	1.99	20.51	79.49
—	1.05	—	2.72	—	—	72.21	1.82	22.20	77.80
—	2.03	—	3.20	—	—	71.44	1.85	21.48	78.52
—	0.70	0.23	4.41	—	—	72.31	2.11	20.24	79.76
—	0.83	—	5.63	—	—	73.46	2.01	18.08	81.92
0.19	1.30	—	3.38	—	—	72.89	1.88	20.37	79.63
—	0.94	—	3.84	—	—	72.51	1.97	20.74	79.26
—	0.65	—	4.12	—	—	72.46	2.14	20.63	79.37
—	0.79	—	4.97	—	—	74.87	2.01	17.35	82.65
—	0.56	—	5.08	—	—	76.13	1.97	16.26	83.74
0.22	0.95	0.28	3.83	—	—	76.07	2.04	16.60	83.40
—	0.68	—	5.72	—	—	75.63	1.93	16.04	83.96
—	0.66	—	5.44	0.19	—	73.70	2.46	17.55	82.45
—	0.69	—	5.48	—	—	74.90	2.24	16.69	83.31
—	0.68	—	3.68	—	—	76.81	2.03	16.80	83.20
0.20	0.92	0.39	4.18	—	—	76.74	2.05	15.52	84.48
—	0.74	—	4.06	—	—	73.94	1.99	19.28	80.72
—	0.77	—	4.68	—	—	76.79	1.94	15.82	84.18
—	1.74	—	3.64	—	—	73.56	1.91	19.15	80.85
—	1.84	—	4.52	—	—	74.77	1.81	17.06	82.94
—	0.70	—	4.80	—	—	71.51	2.08	20.91	79.09

\* Расчетные значения.

Минеральная форма платины представлена единичными зернами *сперрилита* (PtAs<sub>2</sub>) изометричной формы в альбите размером в первые микрометры (см. рис. 7, *з*). Химический состав минерала следующий ( $n = 2$ , мас. %): Pt — 54.93, 55.65 (55.29), As — 43.06, 43.36 (43.21), Fe — 0.30, 0.67 (0.49) при сумме 98.59, 99.37 (98.98). Расчетная эмпирическая формула имеет вид Pt<sub>0.91</sub>As<sub>2.09</sub>. Также в виде единичных зерен размером до 5 мкм в хлорите и амфиболе отмечены *садбериит* (PdSb) и *тестибиопалладит* (Pd(Sb, Bi)Te) (см. рис. 7, *д*, *е*; табл. 7). Первая находка минерала, близкого по составу к садберииту, была нами зафиксирована в пределах минерализованной зоны г. Хэнгорью [Шайбеков, 2018], тестибиопалладит установлен на Пай-Хое впервые. Использование рамановской спектроскопии позволило получить КР-спектры для данных минералов (см. рис. 7, *ж*). Спектр садбериита характеризуется следующими волновыми значениями: 83, 114, 174, 286 и 461 см<sup>-1</sup>. Спектр тестибиопалладита имеет значения, равные (жирным выделены сильные пики): 81, 96, **113**, 127, **142**, 155 см<sup>-1</sup>. В настоящее время существует немного работ, касающихся рамановской спектроскопии теллуридов палладия, наиболее полные данные представлены в работе [Bakker et al., 2014], но в ней нет данных по КР-спектрам садбериита и тестибиопалладита или похожим на спектры, полученные нами. Так, наиболее близкий по составу тестибиопалладинит имеет два характерных пика на 108, 136 и незначительные на 169, 187 см<sup>-1</sup>.

По з н я я (минералы двойных систем Au—Ag и Au—Pd, теллуриды ртути, свинца и серебра) гидротермальная ассоциация, приуроченная к секущим габбро-долериты халькопирит-кварцевым прожилкам и частично присутствующая в габбро-долеритах осевой части силла. Анализ халькопирита из халькопирит-кварцевых прожилков показал следующие концентрации благородных металлов (г/т): Ru — 0.031, Rh — 0.021, Pd — 0.100, Ir — 0.031, Pt — 0.140, Au — 0.420, сумма 0.740.

Минералы двойных систем Au—Ag и Au—Pd представлены сростками палладистого золота (порпечита) с халькопиритом, включениями самородного золота в халькопирите (рис. 8, *б—е*; см. табл. 7) кварцевых прожилков и роговой обманке габбро-долеритов осевой части силла (см. рис. 7, *е*; табл. 7). Преимущественно они имеют размеры от 2 до 10, в редких случаях до 100 мкм. Согласно Н.В. Петровской [1993], состав золота варьирует от среднего до весьма высокопробного.



**Рис. 6. Рудная и аксессуарная минерализация в габбро-долеритах (BSE-изображения).**

Qtz — кварц, Ccp — халькопирит, Hbl — роговая обманка, Ab — альбит, Py — пирит, Po — пирротин, Gn — галенит, Ap — апатит, Kfs — калиевый полевой шпат, An — анортит, Aug — авгит, Ilm — ильменит, Ttn — титанит, Sp — сфалерит, Cbt — кобальтин, Mlb — молибденит, Cbn — кубанит, Pb — самородный свинец, Bn — борнит.

*Колорадоит* (HgTe) был впервые описан на рудопроявлении в 2013 г. и является единственным местом находки на Югорском полуострове и, в частности, хенгурском габбро-долеритовом комплексе [Шайбеков, 2013а]. Он находится в тесной ассоциации с халькопиритом в кварцевых прожилках, образует в нем включения изометричной формы размером в несколько микрометров и приурочен к областям, подвергшимся гипергенным процессам (см. рис. 8, а). Как примеси в его составе присутствует никель, свинец и серебро (см. табл. 7). Включения с высокими содержаниями серебра и свинца (см. табл. 7), вероятнее всего, являются смесью нескольких минеральных фаз — эмпрессита (AgTe), гессита (Ag<sub>2</sub>Te), алтаита (PbTe) и колорадоита (HgTe).

Кроме того, в виде микровключений в пирротине габбро-долеритов осевой части и халькопирите кварцевых прожилков встречаются *алтаит* (PbTe), *гессит* (Ag<sub>2</sub>Te) и *эмпрессит* (AgTe). И если алтаит и гессит в пирротине — это отдельные микровключения (до 5 мкм, см. рис. 7, б, в), то в халькопирите

Таблица 5. Химический состав сульфидных минералов в габбро-долеритах, мас. %

Cu	Fe	S	Pb	Te	Se	Zn	Σ
<b>Пирротин</b>							
—	60.27	39.06	—	—	—	—	99.33
—	60.11	39.42	—	—	—	—	99.53
—	59.82	39.67	—	—	—	—	99.49
—	60.55	39.74	—	—	—	—	100.29
—	59.77	39.37	—	—	—	—	99.14
—	60.09	39.74	—	—	—	—	99.83
—	59.62	39.42	—	—	—	—	99.04
—	60.27	39.17	—	—	—	—	99.44
—	60.76	39.22	—	—	—	—	99.98
—	60.76	39.38	—	—	—	—	100.14
—	59.88	40.20	—	—	—	—	100.08
—	59.87	39.45	—	—	—	—	99.33
—	59.58	39.57	—	—	—	—	99.15
—	59.94	39.62	—	—	—	—	99.56
<b>Халькопирит</b>							
33.78	31.36	35.73	—	—	—	—	100.88
32.77	30.87	34.82	—	—	—	—	98.45
33.11	30.96	34.83	—	—	—	—	98.90
33.78	30.75	35.16	—	—	—	—	99.69
33.11	30.30	34.68	—	—	—	—	98.09
33.24	29.85	35.45	—	—	—	0.74	99.29
<b>Сфалерит</b>							
—	13.83	34.85	—	—	—	51.66	100.35
—	7.60	31.74	—	—	—	60.53	99.88
<b>Пирит</b>							
—	47.36	52.73	—	—	—	—	100.09
—	47.22	53.54	—	—	—	—	100.76
<b>Галенит</b>							
—	—	13.63	84.61	—	—	—	98.24
0.90	1.94	11.13	82.78	—	3.46	—	100.21
—	0.92	11.53	86.39	—	0.79	—	99.62
<b>Борнит</b>							
62.01	12.28	25.91	—	—	—	—	100.20
<b>Кубанит</b>							
24.33	40.50	35.05	—	—	—	—	99.88
<b>Самородный свинец</b>							
—	—	—	88.16	0.61	8.59	—	100.37
—	—	—	99.86	—	—	—	99.86
—	—	—	92.04	—	8.22	—	100.20
—	—	—	96.28	—	1.78	—	98.06

они, как правило, образуют зерна, представляющие собой тонкую смесь алтаита и эмпрессита. В связи с этим в последнем случае, ввиду очень маленьких размеров (1—2 мкм), определить точное соотношение компонентов не представляется возможным.

Схожая золото-теллуридная ассоциация минералов (порпечит, золото, алтаит, гессит, колорадоит, эмпрессит) типична для многих эпитермальных золото-теллуридных месторождений мира [Коваленкер

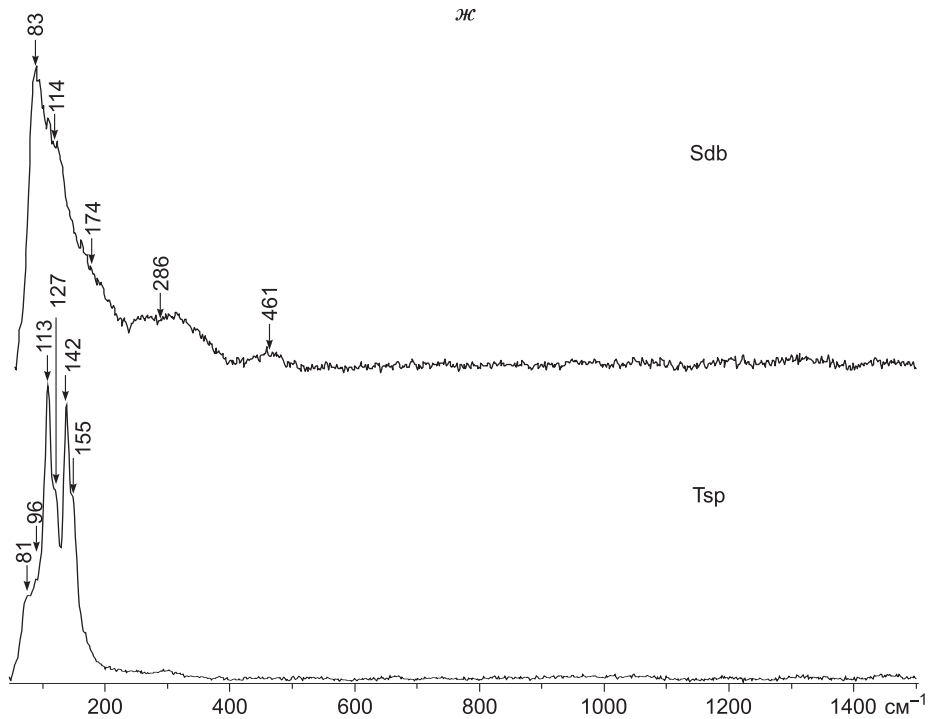
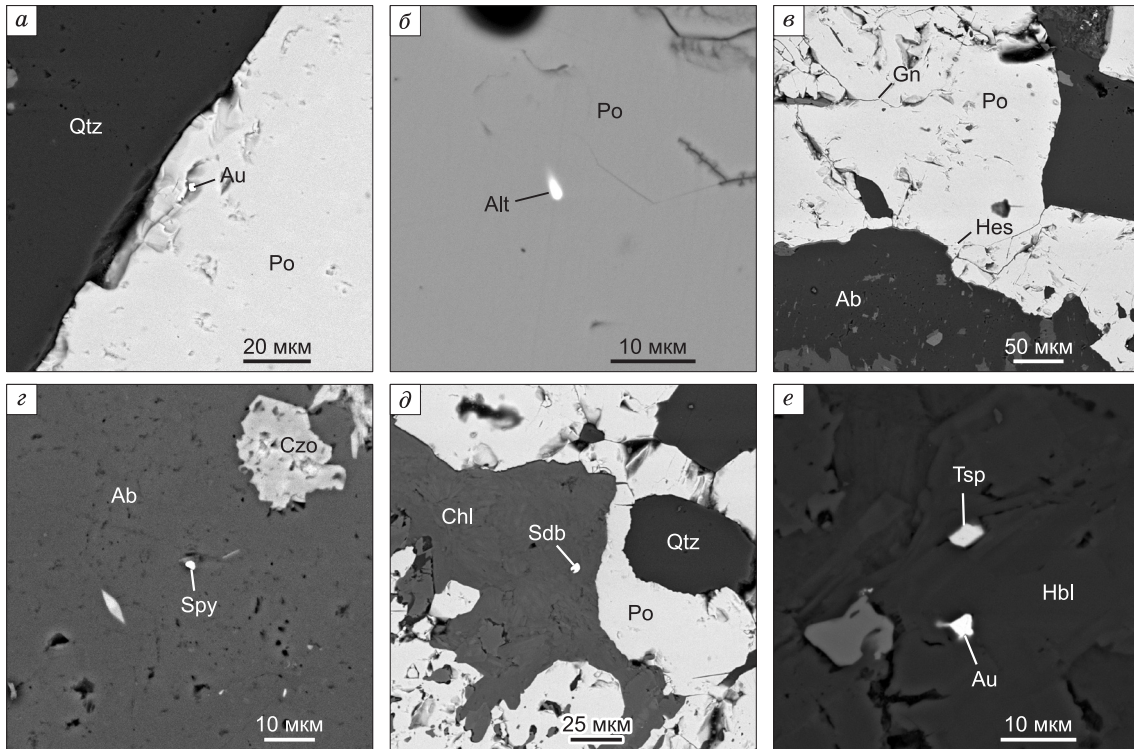
Таблица 6. Химический состав титансодержащих минералов в габбро-долеритах, мас. %

TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Σ
<b>Титанит</b>							
39.17	0.35	—	2.20	27.69	30.32	—	99.73
36.70	2.36	—	1.26	28.54	31.37	—	100.23
38.74	0.61	—	2.28	27.56	30.24	—	99.43
36.39	1.25	—	2.27	27.22	31.04	1.94	100.11
39.02	—	—	0.46	28.34	30.71	1.70	100.23
38.97	—	—	1.39	28.17	29.81	0.69	99.03
38.30	—	—	1.24	26.24	32.56	2.40	100.75
40.79	—	—	—	28.61	31.67	—	101.08
<b>Ильменит</b>							
52.49	0.63	3.75	43.61	—	—	—	100.49
51.92	0.69	3.61	43.27	—	—	—	99.50
52.72	1.51	3.72	42.64	—	—	—	100.59
53.10	—	3.76	43.62	—	—	—	100.48
52.34	1.43	3.52	42.34	—	—	—	99.63
50.98	2.48	3.16	42.94	—	—	—	99.56
53.87	—	3.98	42.82	—	—	—	100.68

Таблица 7. Химический состав минералов золото-теллуридно-палладиевой минерализации, мас. %

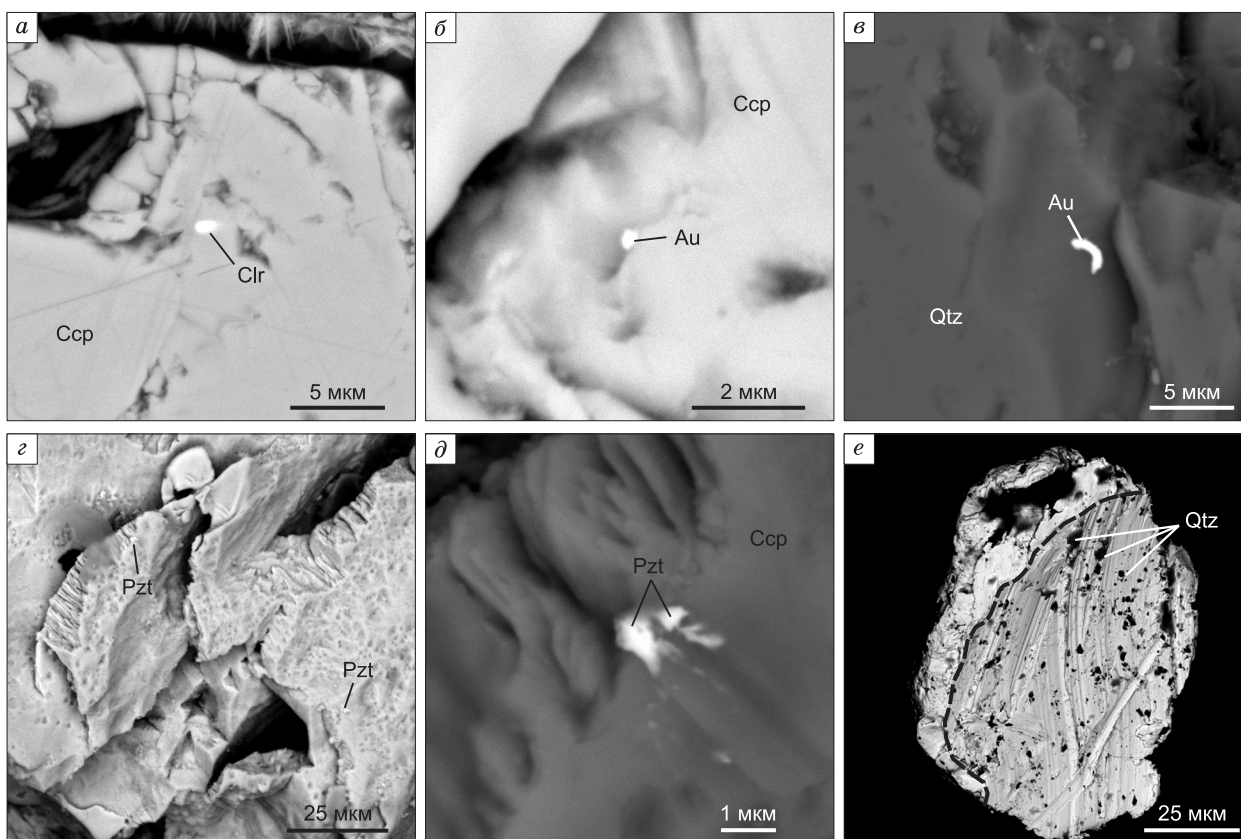
Au	Ag	Pd	Cu	Ni	Pb	Te	Sb	Hg	Σ	Примечание
<b>Ранняя ассоциация</b>										
58.44	10.16	—	30.68	—	—	—	—	—	99.28	Au <sub>0.68</sub> Ag <sub>0.22</sub> Cu <sub>1.11</sub>
68.79	10.21	—	21.46	—	—	—	—	—	100.46	Au <sub>0.89</sub> Ag <sub>0.24</sub> Cu <sub>0.86</sub>
85.43	—	—	14.19	—	—	—	—	—	99.62	Cu <sub>1.36</sub> Au <sub>1.64</sub>
61.67	2.78	—	35.71	—	—	—	—	—	100.17	Au <sub>0.35</sub> Ag <sub>0.03</sub> Cu <sub>0.62</sub>
72.07	—	—	27.92	—	—	—	—	—	99.99	AuCu (Au <sub>0.91</sub> Cu <sub>1.09</sub> )
33.13	2.69	—	64.68	—	—	—	—	—	100.50	Au <sub>0.14</sub> Ag <sub>0.02</sub> Cu <sub>0.84</sub>
35.50	2.77	—	61.30	—	—	—	—	—	99.56	Au <sub>0.15</sub> Ag <sub>0.02</sub> Cu <sub>0.82</sub>
—	—	44.54	—	—	—	4.10	51.14	—	99.84	Pd <sub>0.97</sub> (Sb <sub>0.96</sub> Te <sub>0.07</sub> ) <sub>1.03</sub>
—	—	27.69	—	—	—	32.28	26.14	—	99.62	(Pd <sub>0.95</sub> Fe <sub>0.13</sub> ) <sub>1.08</sub> Te <sub>0.93</sub> (Sb <sub>0.79</sub> Bi <sub>0.20</sub> ) <sub>0.99</sub> (Fe – 2.04, Bi – 11.33)
<b>Поздняя ассоциация</b>										
94.83	—	5.10	—	—	—	—	—	—	99.93	Pzt (Pd <sub>0.09</sub> Au <sub>0.91</sub> )
96.14	—	3.66	—	—	—	—	—	—	99.80	Pzt (Pd <sub>0.07</sub> Au <sub>0.93</sub> )
85.02	15.30	—	—	—	—	—	—	—	100.32	Au (847 ‰)
92.01	7.43	—	—	—	—	—	—	—	99.50	Au (925 ‰)
100.80	—	—	—	—	—	—	—	—	100.80	Au
99.99	—	—	—	—	—	—	—	—	99.99	»
92.55	7.26	—	—	—	—	—	—	—	99.81	Au (кайма, 927 ‰)
98.80	—	—	—	—	—	—	—	—	98.80	Au (центр)
—	1.13	—	—	—	—	41.02	—	57.60	99.76	Clr ((Hg <sub>0.93</sub> Ag <sub>0.03</sub> ) <sub>0.96</sub> Te <sub>1.04</sub> )
—	47.82	—	—	—	8.07	31.13	—	13.92	100.94	Mix (Clr+Alt+Em)
—	1.77	—	—	0.54	4.72	37.74	—	55.10	99.87	Clr ((Hg <sub>0.89</sub> Pb <sub>0.07</sub> Ag <sub>0.05</sub> Ni <sub>0.03</sub> ) <sub>1.04</sub> Te <sub>0.96</sub> )
—	5.22	—	—	1.59	13.88	31.42	—	45.87	97.97	Mix (Clr+Alt+Em)
—	19.46	—	—	—	—	33.23	—	46.67	99.36	Mix (Clr+Em)
—	62.73	—	—	—	—	36.71	—	—	99.44	Hes
—	—	—	—	—	62.94	36.67	—	—	99.61	Alt

Примечание. Au – золото, AuCu – тетраурикуприд, Pzt – порпечит, Clr – колорадоит, Alt – алтаит, Em – эмпрессит.



**Рис. 7. Ранняя ассоциация золото-теллуридно-палладиевой минерализации (BSE-изображения).**

*a–в* — включения в пирротине: *a* — золота, *б* — алтаита; *г–е* — включения в интерстициях породообразующих минералов: *г* — сперрилита, *д* — садберрита с золотом ранней ассоциации, *е* — золота и тегстибиопалладита; *ж* — рамановские спектры (notch filter = 83–85 см<sup>-1</sup>) садберрита и тегстибиопалладита. Au — золото, Alt — алтаит, Gn — галенит, Hes — гессит, Ab — альбит, Spy — сперрилит, Sdb — садберрит, Tsp — тегстибиопалладит, Chl — хлорит, Qtz — кварц, Po — пирротин, Hbl — роговая обманка, Czo — клиноцоизит.



**Рис. 8. Поздняя ассоциация золото-теллуридно-палладиевой минерализации (BSE-изображения).**

*a* — колорадоит в халькопирите, *б* — золото в халькопирите, *в* — золото в кварце, *г* — сростки порцепита с халькопиритом, *д* — сросток порцепита с халькопиритом, *е* — зерно золота с весьма высокопробным центром и серебросодержащей каймой. *a–в, д, е* — полированная поверхность, *г* — естественная поверхность. Ccp — халькопирит, Clr — колорадоит, Au — золото, Qtz — кварц, Pzt — порцепит.

и др., 1990; Cooke, Phail, 2001; Pals, Spry, 2003; Shackleton et al., 2003; Ciobanu et al., 2004; Spry, Scherbarth, 2006; Voudoris, 2006; Николаев и др., 2013; Zhai, Liu, 2014; и др.].

В отношении халькопирит-кварцевых прожилков, включающих продуктивную позднюю ассоциацию золото-теллуридно-палладиевой минерализации, были произведены дополнительные исследования.

**Изотопный состав серы, углерода и кислорода халькопирит-кварцевых прожилков.** Сера изученных халькопиритов характеризуется значениями  $\delta^{34}\text{S}$  от  $-2.4$  до  $-2.5$  ‰ (CDT), близкими к изотопному составу серы магматических образований с мантийным источником вещества ( $\delta^{34}\text{S} = -1.5$  до  $+1.5$  ‰) [Ohmoto, Rye, 1979; Фор, 1989]. В то же время незначительная обогащенность халькопиритов легким изотопом ( $^{32}\text{S}$ ) относительно «мантийной» серы свидетельствует о контаминации магматических образований серой сульфидов осадочных пород [Ohmoto, Rye, 1979]. Отмечается, что изотопный состав серы из монофракций халькопирита ( $n = 5$ ) показывает чрезвычайную выдержанность, что указывает на единый источник серы гомогенного состава.

На значительное участие в составе рудообразующих флюидов корового вещества указывает и изотопный состав углерода и кислорода кальцита жильных образований. Изотопный состав кислорода кальцита из кварц-альбит-эпидотового агрегата ( $n = 5$ ) показал значения  $\delta^{18}\text{O} = +15.3$  ‰ (SMOW), что значительно превышает значения  $\delta^{18}\text{O} = +7$  ‰, характерные для неизмененных магматических образований [Тейлор, 1977]. Расчет равновесного с водной фазой изотопного состава кислорода углекислоты для установленных по флюидным включениям температур показывает, что  $\text{CO}_2$  рудообразующего флюида характеризуется значениями  $\delta^{18}\text{O} = +25 \div +30$  ‰ (SMOW) и, по всей видимости, формировалась при термической диссоциации вмещающих карбонатов. На участие вещества вмещающих осадочных пород указывает и изотопный состав углерода кальцитов, где  $\delta^{13}\text{C} = -17.7$  ‰ (PDB), что характерно для углерода карбонатов, формировавшихся в магматических и гидротермальных процессах при значительном участии органического вещества корового происхождения.



**Исследования флюидных включений в кварце халькопирит-кварцевых прожилков.** Для определения условий образования жильного кварца и связанной с ним рудной минерализацией нами были изучены сингенетичные флюидные включения в жильном кварце. Особое внимание было уделено включениям в зонах выделения сульфидов, которые в основном представлены халькопиритом. К сингенетичным включениям были отнесены включения, которые располагаются поодиночке, небольшими группами либо в трещинках, не выходящих за пределы индивида. Иногда такие включения имеют площадное распространение.

*Газовый состав* отдельных включений был изучен методом КР-спектроскопии. По газовому составу нами выделены азот-метановые и углекислотно-азотные включения. Это может свидетельствовать о двух источниках газов, которые могут иметь мантийное, коровое или смешанное происхождение. Проблема происхождения газов в составе включений обсуждалась в работах [Mazzini et al., 2011; Сокерина и др., 2013; Смирнов и др., 2014; Зыкин, Сокерина, 2015; и др.].

При изучении валового состава флюидных включений методом газовой хроматографии установлено, что газонасыщенность пород незначительна [Сокерина и др., 2016] и включения в основном содержат воду (около 99 %), что хорошо согласуется с визуальными наблюдениями. Среди газовых компонентов преобладает углекислый газ, в меньших количествах присутствуют метан и азот. Причем при стандартном нагреве кварца до 500 °С азот не обнаружен. Его выделение, так же как и основной части метана, начинается после 500 °С и продолжается до 800 °С. С учетом того, что при КР исследованиях присутствие этих газов в составе включений было достоверно установлено, мы предполагаем, что они принадлежат флюидным включениям, а не являются результатом разложения органического вещества при нагревании образцов.

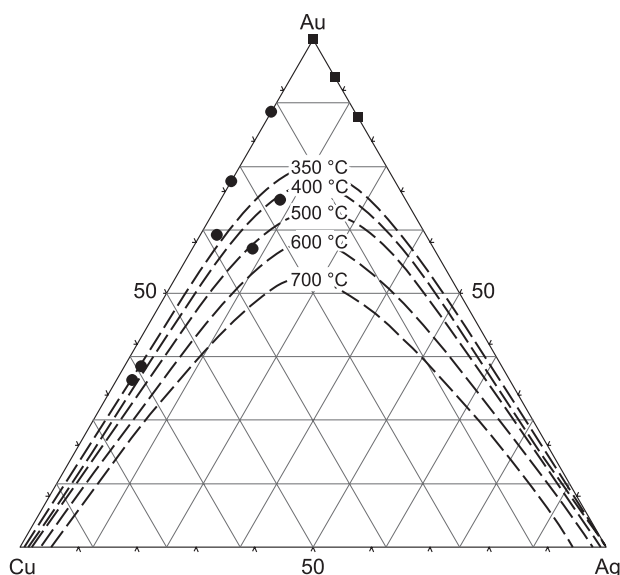
### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранние исследования рудной минерализации в габбро-долеритах хенгурского комплекса показали, что благороднометалльная минерализация имеет преимущественно магматогенно-гидротермальную природу образования [Шайбеков, 2013б].

Выделенная нами ранняя ассоциация золото-теллуридно-палладиевой минерализации рудопроявления Крутой, согласно проведенным исследованиям, представлена минералами системы Ag—Au—Cu (преимущественно медистым золотом и золотистой медью), сперрилитом, садберриитом и тестибиопалладитом.

Наиболее высокотемпературными минералами рассматриваемой ассоциации можно считать садберриит, тестибиопалладит и сперрилит. Первым из них кристаллизуется садберриит, синтетический аналог которого плавится при температуре 800 °С, а уже при 600 °С формирует полный изоморфный ряд с котульским PdTe и неравновесными твердыми растворами между PdTe и PdTe<sub>2</sub>, образующимися в интервале 575—710 °С [Kim, Chao, 1991; Barkov et al., 2002; Makovicky, 2002]. Согласно ряду авторов [Dare et al., 2010; Barnes et al., 2016; и др.], сперрилит классифицируется как высокотемпературный минерал с температурами кристаллизации 900–1200 °С. В то же время другие исследователи [Hanley 2007; Piña et al., 2012; Helmy et al., 2013; Bai et al., 2017; и др.] придерживаются мнения, что сперрилит, наряду с тестибиопалладитом, может образовываться в магматических сульфидных рудах путем кристаллизации из остаточного сульфидного расплава при относительно низкой температуре, которая ограничивается, по [Craig, Kullerud, 1969], нижним диапазоном температуры плавления обогащенной медью магматической сульфидной жидкости.

Как правило, медистое золото рассматривается во многих работах в рамках бинарной системы Au—Cu, которая включает в себя твердые растворы и интерметаллиды (аурикуприд, купроаурид, тетрааурикуприд и CuAu<sub>3</sub>), но так как мы часто наблюдаем в нем примесь Ag, которая достигает ино-



**Рис. 9.** Составы (мас. %) золота ранней (черные кружки) и поздней (черные квадраты) ассоциаций золото-теллуридно-палладиевой минерализации на диаграмме Au—Ag—Cu с изотермами твердого раствора на основе экспериментальных данных, по [Мурзин, Варламов, 2018].

гда больших значений, то его анализ более корректно рассматривать в системе Ag—Au—Cu. Еще в 1939 г. М.П. Ложечкиным [1939] было показано, что медистое золото обладает фазовой неоднородностью в результате распада Au—Cu—Ag твердого раствора и представляет собой пластинчатые сростания медистого золота и электрума. Гораздо позднее В.В. Мурзиным с соавторами [1987] было показано, что состав медистого золота соответствует фазе AuCu, а электрум имеет пробность 470—610 ‰. Экспериментальными исследованиями для тройной системы Ag—Au—Cu установлено, что растворимость всех компонентов триады существенно снижается при падении температуры от 700 до 350 °С и ниже [Chang et al., 1977]. Такое уменьшение температуры сильно ограничивает образование минералов Ag—Au—Cu, но при этом не препятствует образованию бинарных Au—Ag и Au—Cu фаз широкого диапазона составов [Мурзин, Варламов, 2018]. Положение точек анализов медистого золота на диаграмме Ag—Au—Cu с изотермами тройных твердых растворов показывает, что температура его образования могла находиться в диапазоне 350—500 °С, тогда как для купроаурида и тетрааурикуприда она несколько ниже (рис. 9). Согласно [Okamoto et al., 1987], температура фазового перехода CuAu II (35—65 ат. % Au, т.е. Cu<sub>2</sub>Au—CuAu<sub>2</sub>, «рожковит») в CuAu I (40—60 ат. % Au, т.е. Cu<sub>3</sub>Au<sub>2</sub>—Cu<sub>2</sub>Au<sub>3</sub>, тетрааурикуприд) составляет около 385 °С.

Поздняя ассоциация золото-теллуридно-палладиевой минерализации представлена сростками порпечита, а также включениями самородного золота и серебра, алтаита, эмпрессита (гессита) и колорадоита в халькопирите кварцевых прожилков, и в виде включений алтаита и гессита встречается в пирротине габбро-долеритов осевой части рудопроявления.

А.М. Афифи с соавторами [Afifi et al., 1988a,b] один из первых обобщил имеющиеся на тот момент данные по термодинамике фазовых равновесий теллуридов, в том числе с применением для рудных месторождений в интервале температур от 100 до 300 °С с позиции вариаций  $f_{Te_2}$ ,  $f_{S_2}$  и  $f_{O_2}$ . Исходя из этих данных, образование рассматриваемой ассоциации происходило с понижением температуры и  $f_{Te_2}$  и с относительным увеличением активности  $f_{S_2}$ , что может быть связано со смешением высокотемпературных восстановленных гидротермальных флюидов с насыщенной кислородом морской водой [Cabri, 1965; Afifi et al., 1988a,b; Maslennikov et al., 2013]. Согласно ряду авторов, одновременное осаждение самородного золота, серебра, теллуридов (алтаита, гессита, колорадоита и эмпрессита) происходило при температуре около 150—200 °С (по другим данным 130—200 °С [Vikentyev, 2006], для электрума, алтаита и гессита 230—260 °С [Maslennikov et al., 2013]) и pH около 6—8 [Hannington, Scott, 1989; Бортников и др., 2003]. Кроме того, согласно экспериментальным данным, эмпрессит стабилен при температуре ниже 210 °С [Honea, 1964], по последним данным — до 191 °С ( $\pm 16$  °) [Voronin et al., 2017], промежуточная фаза низкотемпературного моноклинного  $\alpha$ Ag<sub>2</sub>Te гессита стабильна до 145 °С [Karakaya, Thompson, 1991].

При изучении флюидных включений халькопирит-кварцевых прожилков установлено, что их образование происходило на фоне снижения температуры с 490—300 до 260—134 °С, что характерно для формирования золото-кварц-сульфидных жил и было установлено при изучении таких уральских месторождений, как Новогоднее, Монто, Петропавловское, Березняковское, Быньговское, Кочканарское и др. [Прокофьев, Спиридонов, 2000; Андреев, Мансуров, 2008; Плотинская, Грознова, 2008; Клюкин, 2012; Мансуров, 2013; и др.]. На этих месторождениях развита золото-теллуридная минерализация. Часто указывается на окислительные условия минералообразования месторождений [Прокофьев, Спиридонов, 2000; Плотинская, Грознова, 2008; Клюкин, 2012; и др.], которые выражаются в преобладании углекислого газа в составе флюида и в наличии включений с высокоплотной углекислотой. Под воздействием «углекислотной волны» происходила переработка бедных, рассеянных руд с формированием промышленных [Ройзенман, 2008]. На рудопроявлении Крутой зоны «пропаривания» богатыми углекислотой флюидными растворами не наблюдается, образование кварцевых жил и связанной с ними благороднометаллической минерализации происходило в восстановительных условиях, о чем свидетельствуют исследования состава флюидных включений методом КР-спектроскопии. Газонасыщенность минералообразующего флюида была незначительная, количество флюида при нагреве до 500 °С не превышает 360 мкг/г, основную часть которого составляет вода. Изменчивость солевого состава включений, которая выразилась в довольно большом диапазоне температур эвтектики, вероятно, можно объяснить присутствием в кварце иголок тремолита (Ca<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>(OH)<sub>2</sub>[Si<sub>4</sub>O<sub>11</sub>]), при образовании которого принимали участие ионы магния и кальция. Довольно значительная солёность может свидетельствовать о магматогенном происхождении минералообразующих растворов. Наблюдается прямая связь между солёностью и температурой гомогенизации, что характеризует процесс постепенного остывания минералообразующей среды.

Золото-теллуридно-палладиевую минерализацию рудопроявления Крутой сложно сравнить с золоторудными объектами Урала и Сибири ввиду различий в геологическом строении, возрасте, составе рудовмещающих пород, геодинамике, генезисе, локализации рудных минералов и т.д. Наиболее близ-

ким по минеральному составу к рудопроявлению Крутой на Урале является рудопроявление Озерное, в котором наблюдается тесная ассоциация благородных металлов с сульфидами меди, а также присутствие в довольно значительных количествах примесей и минералов палладия и теллура [Кузнецов и др., 2014]. В Сибири наиболее близкими являются месторождения Норильского рудного поля, где отмечается большое количество низкотемпературных минеральных ассоциаций, содержащих Au, Ag, As, Pd, Pt, Sn, Bi, Sb, Te [Спиридонов, Гриценко, 2009]. Согласно данным ICP-MS по халькопириту из кварцевых прожилков и вмещающих их габбро-долеритов с сульфидной минерализацией установлено, что первые являются основными концентраторами благородных металлов. При этом, если палладий был нами установлен в виде минерала порпечит, то формы нахождения платины в халькопирит-кварцевых прожилках на настоящий момент остаются дискуссионными. С учетом того, что температура кристаллизации сульфидов в халькопирит-кварцевых прожилках нами была определена ниже 260 °С, можно предположить, что платина в них может находиться либо в виде микропримеси, что характерно для сульфидов магматических медно-никелевых месторождений [Cabri, 2002; Dare et al., 2010, 2011; Helmy et al., 2013; и др.], либо в виде микропримеси в колорадоите [Augé et al., 2002]. Возможным источником платины также может являться золото и его палладиевая разновидность, которые часто содержат микропримеси платины, не превышающие первых сотых и десятых долей процента, что просто не улавливается используемым нами EDS методом анализа. Либо имеют место неустановленные нами включения низкотемпературных минералов платины, в частности, по экспериментальным данным, из гидротермальных растворов в сульфидах при температуре около 230—240 °С может образовываться куперит (PtS) [Evstigneeva, Tarkian, 1996], в работах [Плюснина и др., 2007; Плюснина, Лихойдов, 2009] описывается кристаллизация в гидротермальной системе металлической платины при температурах 200—300 °С и сперрилита при 300 °С и ниже. Похожее утверждение приводится в работе [Watkinson, Melling, 1992], где сперрилит находится в ассоциации с низкотемпературными сульфидами меди. Кроме того, минералы платины отмечаются в низкотемпературных гидротермальных ассоциациях Норильского рудного поля [Спиридонов, Гриценко, 2009]. Несмотря на то, что платина отмечена в сульфидах габбро-долеритов осевой части рудопроявления Крутой в виде сперрилита, значимых ее концентраций, по данным ICP-MS в них не фиксируется.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальные исследования рудной зоны рудопроявления Крутой на Пай-Хое позволили выделить два типа сульфидной минерализации: пирит-халькопирит-пирротиновую габбро-долеритовую и сфалерит-халькопиритовую кварцево-жильную, с которыми пространственно и генетически связана золото-теллуридно-палладиевая минерализация. Образование халькопирит-кварцевых жил с золото-теллуридно-палладиевой минерализацией на рудопроявлении Крутой соответствует представлениям о гидротермальном этапе минералообразования, когда на заключительных стадиях происходила концентрация рудных компонентов в остаточном флюиде, который принял участие в образовании постмагматической гидротермальной минерализации, на что указывает как характер взаимоотношений халькопирит-кварцевых прожилков и вмещающих их габбро-долеритов, так и состав газовой-жидких включений.

Установлено, что температура образования жильного кварца близка к 300—490 °С, а сфалерит-халькопиритовая и связанная с ней золото-теллуридно-палладиевая минерализация поздней ассоциации образовались при температурах, не превышающих 260 °С. В составе минералообразующего раствора присутствовали соли магния и кальция, избыток которых привел к формированию в жильном кварце нитевидных кристаллов тремолита. Минералообразующий флюид отличался низкой газонасыщенностью. Изотопный состав серы, углерода и кислорода изученных минералов, формировавшихся в магматических и гидротермальных процессах, соответствуют представлениям о контаминации магматических образований серой, кислородом и углеродом вмещающих осадочных пород.

Выделение золото-теллуридно-палладиевой минерализации с разделением на одновременные ассоциации является новым для исследуемого района и вызывает большой интерес в связи с присутствием теллуридов, висмутотеллуридов, минералов золота и палладия в других рудопроявлениях и точках минерализации в пределах габбро-долеритовых комплексов Пай-Хоя, что свидетельствует о перспективности этого района в целом. Полученные рамановские спектры садбериита и тестибиопалладита в габбро-долеритах осевой части рудопроявления Крутой позволяют использовать рамановскую спектроскопию как дополнительный метод идентификации данных минералов.

Работа выполнена на базе Центра коллективного пользования «Геонаука», по теме НИР госзадания (Гр № АААА-А17-117121270036-7) ИГ Коми НЦ УрО РАН и при частичной финансовой поддержке гранта фундаментальных исследований УрО РАН №15-15-5-73.

## ЛИТЕРАТУРА

**Андреев А.В., Мансуров Р.Х.** Новогодненское золоторудное поле (Полярный Урал) // Материалы конференции: Актуальные проблемы геологического изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых. М., ВИМС, 2008, с. 20—23.

**Борисенко А.С.** Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика, 1977 (8), с. 16—27.

**Бортников Н.С., Кабри Л., Викентьев И.В., Тагиров Б.Р., Мак Мэйхон Г., Богданов Ю.А., Ставрова О.О.** Невидимое золото в сульфидах субмаринных колчеданных построек // Геология рудных месторождений, 2003, т. 45, № 3, с. 228—240.

**Государственная геологическая карта Российской Федерации.** М-б 1:1 000 000 (новая серия). Лист R-(40)-42-о. Вайгач — п-ов Ямал. Объяснительная записка / Ред. Л.Л. Подсорова. СПб., ВСЕГЕИ, 2000, (МПР России, ВСЕГЕИ, ЗапСибГеоНац, ВНИИОкеангеология), 357 с.

**Гриненко В.А.** Приготовление двуокиси серы для изотопного анализа // Журнал неорганической химии, 1962, т. 7, с. 2578—2582.

**Заборин О.В.** Основные магматические породы Центрального Пай-Хоя (Югорский полуостров): Автореф. дис.... к.г.-м.н., Л., ЛГИ, 1975, 24 с.

**Зыкин Н.Н., Сокерина Н.В.** Генезис вод гидротермальных месторождений Приполярного Урала // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2015, № 9, с. 18—23.

**Клюкин Ю.И.** Флюидный режим формирования золото-теллуридного оруденения Быньговского месторождения, Средний Урал // Литосфера, 2012, № 3, с. 127—138.

**Коваленкер В.А., Залибекян М.А., Лапутина И.П., Малов В.С., Сандомирская С.М., Гараско М.И., Мхитарян Дж.В.** Сульфидно-теллуридная минерализация Меградзорского рудного поля в Армении // Геология рудных месторождений, 1990, № 3, с. 65—81.

**Кузнецов С.К., Майорова Т.П., Шайбеков Р.И., Сокерина Н.В., Филиппов В.Н.** Минеральный состав и условия формирования золото-платино-палладиевых проявлений севера Урала и Пай-Хоя // Материалы конференции: Благородные, редкие и радиоактивные элементы в рудообразующих системах. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2014, с. 342—347.

**Ложечкин М.П.** Новые данные о химическом составе «медистого» золота // Докл. АН СССР, 1939, т. 24, № 5, с. 454—457.

**Мансуров Р.Х.** Геолого-структурные условия локализации Петропавловского золоторудного месторождения: Автореф. дис.... к.г.-м.н. М., 2013, 23 с.

**Мурзин В.В., Варламов Д.А.** Химический состав самородного золота в магнетитовых рудах Каганского ультрабазитового массива (Юж. Урал) // Ежегодник-2017. Труды Института геологии и геохимии УрО РАН, 2018, вып. 165, с. 194—199.

**Мурзин В.В., Кудрявцев В.И., Берзон Р.О., Суставов С.Г.** Медистое золото в зонах родингитизации // Геология рудных месторождений, 1987, т. 29, № 5, с. 96—99.

**Николаев Ю.Н., Прокофьев В.Ю., Аплеталин А.В., Власов Е.А., Бакшеев И.А., Калько И.А., Комарова Я.С.** Золото-теллуридная минерализация Западной Чукотки: минералогия, геохимия и условия образования // Геология рудных месторождений, 2013, т. 55, № 2, с. 114—144.

**Осташенко Б.А.** Петрология и оруденение центрально-пайхойского базальтоидного комплекса. Л., Наука, 1979, 113 с.

**Петровская Н.В.** Золотые самородки. М., Наука, 1993, 191 с.

**Плотинская О.Ю., Грознова Е.О.** Условия образования на эпитептермальном Au-Ag-Te-Se месторождении Березняковское, Южный Урал // Материалы XIII Международной конференции по термобарогеохимии и IV симпозиума AРIFIS. М., ИГЕМ, 2008, т. 2, с. 101—103.

**Плюснина Л.П., Лихойдов Г.Г.** Поведение платины в гидротермальных условиях // Вестник ДВО РАН, 2009, № 4 (146), с. 30—37.

**Плюснина Л.П., Лихойдов Г.Г., Щека Ж.А.** Поведение платины в гидротермальных условиях по результатам экспериментов (300—500°C, 1 кбар) // Геохимия, 2007, т. 45, № 11, с. 1216—1222.

**Прокофьев В.Ю., Спиридонов Э.М.** Состав метаморфизованных флюидов и условия преобразования руд Кочканарского золоторудного месторождения // Материалы конференции: Петрография на рубеже XXI века, итоги и перспективы. Сыктывкар, 2000, т. 3, с. 88—90.

**Ройзман Ф.М.** Теория богатого флюидного рудообразования под воздействием «углекислотной волны». М., МЮИ, 2008, 84 с.

**Силаев В.И.** Минералогия и литогенез ордовикских отложений Центрального Пай-Хоя. Л., Наука, 1978, 84 с.

**Смирнов С.З., Бортников Н.С., Гоневчук Г.Н., Гореликова Н.В.** Составы расплавов и флюидный режим кристаллизации редкометалльных гранитов и пегматитов Тигриного Sn-W-месторождения (Приморье) // ДАН, 2014, т. 456, № 1, с. 95—100.

**Сокерина Н.В., Шанина С.Н., Зыкин Н.Н., Исаенко С.И., Пискунова Н.Н.** Условия формирования золоторудной минерализации на проявлении Синильга, Приполярный Урал (по данным изучения флюидных включений) // Зап. РМО, 2013, № 6, с. 89—105.

**Сокерина Н.В., Шайбеков Р.И., Шанина С.Н., Исаенко С.И.** Флюидный режим формирования золото-теллуридно-палладиевой минерализации на рудопроявлении Крутой (Пай-Хой) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016, № 8, с. 9—13.

**Спиридонов Э.М., Гриценко Ю.Д.** Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. М., Научный мир, 2009, 145 с.

**Тейлор Х.П.** Применение изотопии кислорода и водорода к проблемам гидротермального изменения вмещающих пород и рудообразования // Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. М., Мир, 1977, с. 213—294.

**Устрицкий В.И.** Стратиграфия, фации и тектоника палеозойских отложений Пай-Хоя. Л., НИИГА, 1954, 471 с.

**Фор Г.** Основы изотопной геологии (пер. с англ.) М., Мир, 1989, 590 с.

**Чернышов Н.М., Переславцев А.В., Кузнецов А.Н., Козлов М.Т., Кудрявцева О.А.** Формационные типы ультрамафит-мафитовых интрузий Пайхойской провинции и перспективы их никеленосности. Воронеж, Воронежский государственный университет, 1990, 227 с.

**Шайбеков Р.И.** Долеритовое 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.

**Шайбеков Р.И.** Золото-теллуридная минерализация в кварц-сульфидных прожилках рудопроявления участка «Крутой» (Пай-Хой) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2013а, вып. 223 (7), с. 13—16.

**Шайбеков Р.И.** Платиносульфидная минерализация в габбро-долеритах Пай-Хоя. Сыктывкар, 2013б, 108 с.

**Шайбеков Р.И.** Первые сведения о минерале садбериит на Пай-Хое // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения-2018): материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар, ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2018, с. 216—217.

**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) // Материалы конференции: Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России. Т. II. Сыктывкар, ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2009, с. 183—185.

**Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J.** Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermodynamical data and calculated equilibria // Econ. Geol., 1988a, v. 83, p. 377—394.

**Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J.** Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: II. Application to telluridebearing ore deposits // Econ. Geol., 1988b, v. 83, p. 395—404.

**Augé T., Salpeteur I., Bailly L., Mukherjee M.M., Patra R.N.** Magmatic and hydrothermal platinum-group minerals and base-metal sulphides in the Baula Complex, India // Canad. Miner., 2002, v. 40, p. 277—309.

**Bai L., Barnes S.-J., Baker D.R.** Sperrylite saturation in magmatic sulfide melts: Implications for formation of PGE-bearing arsenides and sulfarsenides // Amer. Miner., 2017, v. 102 (5), p. 966—974.

**Bakker R.J.** Application of combined micro-Raman and electron probe microanalysis to identify platinum group minerals // 11th EMAS regional workshop on electron probe microanalysis of materials today — Practical Aspects, 2014, p. 215—233.

**Barkov A.Y., Laflamme J.H.G., Cabri L.J., Martin R.F.** Platinum-group minerals from the Wellgreen Ni-Cu-PGE deposit, Yukon, Canada // Canad. Miner., 2002, v. 40, p. 651—669.

**Barnes S.J., Fisher L.A., Godel B., Pearce M.A., Maier W.D., Paterson D., Howard D.L., Ryan C.G., Laird J.S.** Primary cumulus platinum minerals in the Monts de Cristal Complex, Gabon: magmatic microenvironments inferred from high-resolution X-ray fluorescence microscopy // Contr. Miner. Petrol., 2016, v. 171 (3), p. 18, doi:10.1007/s00410-016-1232-1.

**Cabri L.J.** Phase relations in the Ag-Au-Te systems and their mineralogical significance // Econ. Geol., 1965, v. 60, p. 1569—1606.

**Cabri L.J.** The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements. Montréal, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002, Special Volume 54, 852 p.

- Chang Y.A., Goldberg D., Neumann J.P.** Phase diagrams and thermodynamic properties of ternary gold-copper-silver systems // *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1977, v. 6, p. 621—669.
- Ciobanu C., Cook N.J., Damian G., Damian F., Buia G.** Telluride and sulphosalt associations at acarimb // Eds. N.J. Cook, C.L. Ciobanu // *Gold-silver-telluride deposits of the Golden Quadrilateral, South Apuseni Mts., Romania. IAGOD Guidebook Series*, 2004, v. 12, p. 145—186.
- Cooke D.R., Mc Phail D.C.** Epithermal Au—Ag—Te mineralization, Acupan, Baguio District, Philippines: numerical simulations of mineral deposition // *Econ. Geol.*, 2001, v. 96, p. 109—131.
- Craig J.R., Kullerud G.** Phase relations in the Cu—Fe—Ni—S system and their application to magmatic ore deposits // *Econ. Geol. Monogr.*, 1969, v. 4, p. 344—358.
- Dare S.A.S., Barnes S.-J., Prichard H.M., Fisher P.C.** The timing and formation of platinum-group minerals from the Creighton Ni-Cu-platinum-group element sulfide deposit, Sudbury, Canada: Early crystallization of PGE-rich sulfarsenides // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, p. 1071—1096.
- Dare S.A.S., Barnes S.-J., Prichard H.M., Fisher P.C.** Chalcophile and platinum-group element (PGE) concentrations in the sulfide minerals from the McCreedy East deposit, Sudbury, Canada, and the origin of PGE in pyrite // *Miner. Deposita*, 2011, v. 46 (4), p. 381—407.
- Evstigneeva T., Tarkian M.** Synthesis of platinum-group minerals under hydrothermal conditions // *Eur. J. Miner.*, 1996, v. 8, p. 549—564.
- Hanley J.J.** The role of arsenic-rich melts and mineral phases in the development of high-grade Pt-Pd mineralization within komatiite-associated magmatic Ni-Cu sulfide horizons at Dundonald Beach South, Abitibi subprovince, Ontario, Canada // *Econ. Geol.*, 2007, v. 102, p. 305—317.
- Hannington M.D., Scott S.D.** Sulphidation equilibria as guides to gold mineralization in volcanogenic massive sulfides: evidence from sulfide mineralogy and composition of sphalerite // *Econ. Geol.*, 1989, v. 84 (7), p. 1978—1995.
- Helmy H.M., Ballhaus C., Fonseca R.O.C., Wirth R., Nagel T.J., Tredoux M.** Noble metal nanoclusters and nanoparticles precede mineral formation in magmatic sulphide melts // *Nat. Commun.*, 2013, 4:2405, 7 p., doi:10.1038/ncomms3405.
- Honea R.M.** Empressite and stuetzite redefined // *Amer. Miner.*, 1964, v. 49, p. 325—338.
- Karakaya I., Thompson W.T.** The Ag—Te (silver—tellurium) system // *J. Phase Equilib.*, 1991, v. 12 (1), p. 56—63.
- Kim Won-Sa, Chao G.Y.** Phase relations in the system Pd—Sb—Te // *Canad. Miner.*, 1991, v. 29, p. 401—409.
- Makovicky E.** Ternary and quaternary phase systems with PGE // *The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements* / Ed. L.J. Cabri. *Can. Inst. Mining Metall. Petroleum*, 2002, Spec. vol. 54, p. 131—175.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., Herrington R.J., Stanley C.J.** Tellurium-bearing minerals in zoned sulphide chimneys from Cu-Zn massive sulphide deposits of the Urals, Russia // *Miner. Petrol.*, 2013, v. 107, p. 67—99.
- Mazzini A., Svensen H., Etiope G., Onderdonk N., Banks D.** Fluid origin, gas fluxes and plumbing system in the sediment-hosted Salton Sea Geothermal System (California, USA) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2011, v. 205, p. 67—83.
- Oh S.J., Cook D.C., Townsend H.E.** Characterization of iron oxides commonly formed as corrosion products on steel // *Hyperfine Interact.*, 1998, v. 112, p. 59—65.
- Ohmoto H., Rye R.O.** Isotopes of sulfur and carbon // *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York, John Wiley & Sons, 1979, p. 509—567.
- Okamoto H., Chakrabarti D.J., Laughlin D.E., Massalski T.B.** The Au-Cu (gold-copper) system // *Bull. Alloy Phase Diagrams*, 1987, v. 8, p. 453—474.
- Pals D.W., Spry P.G.** Telluride mineralogy of the low-sulfidation epithermal Emperor gold deposit, Vatukoula, Fiji // *Miner. Petrol.*, 2003, v. 79, p. 285—307.
- Piña R., Gervilla F., Barnes S.-J., Ortega L., Lunar R.** Distribution of platinum-group and chalcophile elements in the Aguablanca Ni-Cu sulfide deposit (SW Spain): Evidence from a LA-ICP-MS study // *Chem. Geol.*, 2012, v. 302—303, p. 61—75.
- Shackleton J.M., Spry P.G., Bateman R.** Telluride mineralogy of the golden mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia // *Canad. Miner.*, 2003, v. 41, p. 1503—1524.
- Spry P.G., Scherbath N.L.** Vanadium silicates and oxides in the Tuvatu gold-silver telluride deposit, Fiji // *Miner. Petrol.*, 2006, v. 87, p. 171—176.
- Vikentyev I.V.** Precious metal and telluride mineralogy of large volcanic-hosted massive sulfide deposits in the Urals // *Miner. Petrol.*, 2006, v. 87, p. 305—326.

**Voronin M.V., Osadchii E.G., Brichkina E.A.** Thermochemical properties of silver tellurides including empressite (AgTe) and phase diagrams for Ag—Te and Ag—Te—O // *Phys. Chem. Miner.*, 2017, v. 44, p. 639—653.

**Voudoris P.** A comparative mineralogical study of Te-rich magmatic-hydrothermal systems in northeast Greece // *Miner. Petrol.*, 2006, v. 87, p. 1438—1468.

**Watkinson D.H., Melling D.P.** Hydrothermal origin of the platinum mineralization, Alaska // *Econ. Geol.*, 1992, v. 87 (1), p. 175—184.

**Zhai D., Liu J.** Gold-telluride-sulfide association in the Sandaowanzi epithermal Au—Ag—Te deposit, NE China: implications for phase equilibrium and physicochemical conditions // *Miner. Petrol.*, 2014, v. 108, p. 853—871.

*Рекомендована к печати 28 августа 2019 г.  
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию 30 января 2018 г.,  
после доработки — 30 июля 2019 г.*