

Нг- и Сd-СОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ Pd, Pt, Au, Ag СУЛЬФИДОНОСНЫХ БАЗИТОВ И ГИПЕРБАЗИТОВ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА В БАЙКАЛИДАХ СЕВЕРНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

© 2019 г. Э.М. Спиридонов^{а,*}, Д.А. Орсоев^б, А.А. Арискин^{а,с}, Г.С. Николаев^с,
Е.В. Кислов^б, Н.Н. Коротаева^а, В.О. Япаскурт^а

^а Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119234 Москва, Ленинские горы, 1

^б Геологический институт СО РАН,
Россия, 670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6А

^с Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
Россия, 119991 Москва, ул. Косыгина, 19
*e-mail: ernstspiridon@gmail.com

Поступила в редакцию 30.03.2018 г.

После доработки 10.04.2018 г.

Принята к публикации 25.04.2018 г.

Нг и Сd — редкие химические элементы в составе магматогенной минерализации платиновых металлов и золота, — типичны для такой минерализации в Йоко-Довыренском плагиоперидотит-троктолит-габбро-норитовом интрузиве позднерифейского возраста в байкалидах Прибайкалья. Рассмотрены вариации состава, ассоциации, особенности распределения Нг- и Сd-содержащих минералов Pd, Pt, Au, Ag. Большая часть минералов благородных металлов (халькогениды и интерметаллиды Pd, Pt, Au послемагматические) слагают метакристаллы и просечки в сульфидах, силикатной матрице, на контактах тех и других; возникли при участии флюидов, порожденных кристаллизующимися сульфидными Fe-Cu-Ni расплавами. Они развиты в центральной части интрузива в сульфидоносных плагиоцерцолитах (ПЦ) в низах интрузива, в сульфидоносных пегматоидных троктолитах (Т) в низах толщи троктолитов и в сульфидоносных пегматоидных анортозитах (А) вверху толщи троктолитов. От ПЦ к Т и далее к А существенно растет количество и разнообразие Нг-содержащих минералов, ртуть в них распределена крайне неравномерно; Сd-содержащие установлены только в А. В Т и А ведущие носители ртути: пневматолитовые (флюидно-метасоматические) мончеит и особенно поздний теларгпалит (Pd, Ag)₃(Te, Pb, Hg), который содержит до 11 масс.% Нг. С теларгпалитом иногда ассоциируют Нг-электрум и кюстелит, потарит PdHg. В Т развит богатый Pb потарит, в А — потарит без Pb. Заметное количество Нг в минералах благородных металлов Йоко-Довыренского интрузива вероятное свидетельство того, что их формирование произошло в условиях закрытой системы при невысоких температурах. Количество потарита в А значительно выше, а содержание ртути в теларгпалите А заметно ниже (в среднем 2.9 масс.% Нг), чем в теларгпалите Т (в среднем 5.9% Нг). Возможно, потарит возник при эпигенетических процессах серпентинизации (низкоградного метаморфизма) за счет вещества пневматолитовых ртутьсодержащих теларгпалита, котульскита, звягинцевита. Этому соответствуют особенности распределения ртути в теларгпалите, котульските и звягинцевите Т и А, и значительно большая интенсивность метаморфизма А.

Ключевые слова: сульфидоносные породы, плагиоцерцолит, троктолит, анортозит, Нг-мончеит, Нг-котульскит, Нг-звягинцевит, Нг-теларгпалит, Нг-электрум, Нг-кюстелит, потарит

DOI: 10.31857/S0016-752564143-58

ВВЕДЕНИЕ

Ртуть и кадмий — редкие химические элементы в составе магматогенной минерализации платиновых металлов и золота (Naldrett, 2004).

Наличие потарита (амальгамы палладия PdHg) в составе такой минерализации в Йоко-Довыренском гипербазит-базитовом интрузиве установлено в работах (Орсоев и др., 2003; Орсоев, 2008).

Минерализация благородных металлов в породах Йоко-Довыренского интрузива описана в работах (Конников и др., 1994; Кислов и др., 1997; Орсов и др., 2003; Орсов, 2008; Арискин и др., 2013; Ariskin et al., 2018), в которых суммированы и результаты более ранних исследований. К настоящему времени накоплен обширный новый материал, который представлен в данной статье, содержащей только оригинальные анализы. Кроме того, в породах интрузива выявлены кадмийсодержащие минералы платиновых металлов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучены многие десятки крупных штуфов, прозрачных и полированных шлифов сульфидоносных базитов и гипербазитов, проведено их петрографо-минералогическое изучение. Поиск и химический анализ минералов благородных металлов выполнены в лаборатории локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ с помощью аналитического комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ Jeol JSM-6480 LV, аналитики-исследователи — В.О. Япаскурт и Н.Н. Коротаева. Химические анализы проведены с использованием в качестве эталонов чистых металлов Ru, Os, Ir, Rh, Pt, Pd, Au, Ag, Bi, Sb, Ge, Ni, Co, Cu, Zn, пирита FeS₂ (S), алтаита PbTe (Pb, Te), колорадоита HgTe (Hg), синтетических фаз InAs (As) и CdSe (Cd, Se). Получено ~750 фотографий в отраженных электронах и ~50 карт распределения химических элементов. Это позволило провести микрозондовые анализы прицельно. Выполнены многие десятки химических анализов силикатов, апатита, хромшпинелидов, титаномагнетита, ильменита, более 150 анализов сульфидов (троилит, пирротин, кубанит, халькопирит, пентландит, талнахит, сфалерит и галенит), более 120 анализов минералов платиновых металлов и золота (мончеит, котульскит, звягинцевит, теларгпалит и иные, из них 27 — Hg-содержащие и 4 — Cd-содержащие).

ЙОКО-ДОВЫРЕНСКИЙ ИНТРУЗИВ

Расслоенный Йоко-Довыренский гипербазит-базитовый интрузив позднерифейского возраста размещен в байкалидах Северного Прибайкалья — на ЮЗ замыкании Олоkitского прогиба в пределах Байкало-Патомского пояса осадочных и вулканогенно-осадочных ком-

плексов неопротерозойской пассивной окраины (Parfenov et al., 2010). Площадь эрозионного среза интрузива составляет 26×3.5 км. Разрез центральной части плутона характеризуется самыми большими мощностями и разнообразием дифференциатов, в котором выделены нижняя приконтактная зона и расслоенная серия. Приконтактную зону слагают оливиновые и пикритовые габбро-норит-долериты. Расслоенную серию слагают нижняя толща бронзит-эндиопсид-плаггиоклаз содержащих дунитов и лерцоцитов (около 1/3 разреза интрузива), толща троктолитов со шширами и жилами анортозитов (около 1/3 всего разреза), верхняя толща габброидов (Гурулев, 1965; Конников и др., 1994; Ярошевский и др., 2006; Орсов, 2008; Арискин и др., 2013). На границе толщ троктолитов и перекрывающих габброидов Д.А. Орсов (Орсов и др., 2003) выделил критический горизонт — частое чередование и линзовидное переслаивание лейкотроктолитов, анортозитов, плаггиолерцолитов, вебстеритов, оливиновых габбро и габбро-норитов. U/Pb возраст магматических пород по циркону и бадделеиту — 728 ± 3 млн лет (Ariskin et al., 2018). Интрузив окружен широким ореолом контактово-метаморфизованных терригенных, известняково-доломитовых и пиритоносных углеродистых пород рифея.

Интрузив формировался в условиях гипабиссальной фации глубинности. В результате долгой термической истории минералы интрузивных пород, магнезиальных скарнов, продукты кристаллизации локально развитых сульфидных расплавов испытали интенсивные субсолидусные превращения с распадом твердых растворов (оливин, пижонит, ромбический и моноклинный пироксены, хромшпинелиды, ильменит, монтичеллит, Mss, Iss, K-Na полевые шпаты). Продукты распада сульфидных твердых растворов — Mss и Iss — часто перекристаллизованы почти полностью, продукты распада силикатных и оксидных твердых растворов — частично. Широко проявлена частичная перекристаллизации интрузивных пород — от дунитов до оливиновых габбро-норитов.

Интрузив затронут эпигенетической тектонизацией, залегает практически вертикально — «поставлен на голову». Базиты и гипербазиты локально в заметной степени, а повсеместно в слабой степени захвачены процессами низкотемпературного метаморфизма (серпентинизации...) в условиях цеолитовой, затем — пренит-пумпеллиитовой и вновь цеолитовой фации (Спирidonov и др., 2017а, 2017б). Изохронный Sm/Nd

возраст серпентинизированных оливиновых габбро Йоко-Довыренского интрузива — 673 ± 22 млн лет (Amelin et al., 1996), что на 55 млн лет моложе возраста протолита. По нашим данным, эта датировка фиксирует возраст низкоградного метаморфизма в условиях пренит-пумпеллиитовой фации, в процессе которого произошло перераспределение лантанидов: носитель лантанидов магматических пород Йоко-Довыренского интрузива апатит был замещен гидроксилapatитом без REE, и возникли метаморфогенно-гидротермальные минералы REE — монацит, алланит и редкоземельный клиноцоизит-эпидот (Спиридонов, 2017).

РУДОНОСНЫЕ ПОРОДЫ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА И ИХ СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ

Исходная магма Йоко-Довыренского интрузива была недосыщена серой (Ariskin et al., 2018). По этой причине наиболее ранние минералы платиновых металлов, слагающие протогенетичные включения в алюмохромите плагиоцерцолитов в нижней части интрузива, представлены самородным Ir- и Pt-Ir-осмием (Спиридонов и др., 2018). В ходе кристаллизационной дифференциации и, вероятно, частью за счет взаимодействия магматических образований с породами рамы и ксенолитами, возникли локально развитые рассеянные сульфидные расплавы. Заметное их количество установлено в придонной части интрузива в оливиновых и пикритовых габбро-норитах и габбро-норит-долеритах и расположенных несколько выше плагиоклазовых лерцолитах; отдельные гнезда и небольшие скопления — в пегматоидных троктолитах, анортозитах и пегматоидных анортозитах, оливиновых и безоливиновых габбро-норитах верхней части интрузива. Состав сульфидных расплавов коррелирован с составом окружающих магматических пород. Среди гипербазитов они богаты Ni и бедны Cu, продукт их кристаллизации — преимущественно Mss. В троктолитах сульфидные расплавы обогащены Ni и Cu, продукты их кристаллизации — преимущественно Iss. Габбро-нориты верхних горизонтов включали сульфидные расплавы, бедные Ni. Сидеронитовые сульфиды, их гнезда и капли в магматических породах распределены весьма неравномерно, обычно окружены оторочками пластин Si-содержащего Ti-флогопита, с ними ассоциируют Si-содержащие амфиболы и апатит (Кислов и др., 1997; Орсов, 2008; собственные наблюдения).

Маломощные прослои и линзы сульфидоносных плагиоцерцолитов находятся внизу мощной толщи перидотитов. Плагиоклазовые лерцолиты содержат рассеянные микрогнезда — сростания троилита и пентландита, без или с подчиненными кубанитом или халькопиритом (с мелкими включениями Fe-сфалерита), обычно с оторочкой и включениями пластин флогопита. Во внешней части сростаний троилита, пентландита и халькопирита обычно находятся мельчайшие выделения галенита.

Гнезда и секущие жилы сульфидоносных пегматоидных лейкоцерцолитов расположены в нижней части толщи троктолитов. Мощность секущих жил и грезд рудоносных троктолитов до 10 см, местами они содержат обильную сидеронитовую вкрапленность сульфидов. Рудоносные образования сложены Ca-битовнитом, хризолитом и акцессорным Ti-ферриалюмохромитом, состав которых аналогичен окружающим троктолитам. Сульфиды представлены продуктами кристаллизации обогащенного медью Ni-Cu-Fe-S расплава. Его состав, вероятно, был близок к составу распространенных здесь высокотемпературных кубических сульфидных Ni-Cu-Fe твердых растворов Iss1 и Iss2, недосыщенных серой. Продукты твердофазных превращений Iss1 — сростания кубанита, троилита, пентландита; Iss2 — кубанит, троилит и Fe пирротин, пентландит. В пирротине и в кубаните нередки тонкие ламеллы распада пентландита. Менее распространены поздние генерации высокотемпературных кубических сульфидных Ni-Cu-Fe твердых растворов — Iss3, Iss4, Iss5, которые все более богаты Cu и бедны Fe. Для продуктов превращений Iss3 характерны структуры распада кубанит (матрица) — халькопирит (ламеллы); для Iss4 — двухстадийные структуры распада кубанит (ламеллы) — халькопирит (матрица). Наиболее интересен Iss5, продукты распада которого — пластинчатые сростания халькопирит-галнахит и пентландит, кубанита в них нет.

Рудоносные сульфидсодержащие анортозиты, пегматоидные анортозиты и подчиненные оливиновые лейкогаббро-нориты слагают шпирь и жилы мощностью от первых см до метра и более в верхней части критического горизонта. Зачастую они ориентированы субгоризонтально, т.е. секут «поставленную на голову» расслоенную гипербазит-базитовую серию поперек. Участки, насыщенные рудоносными анортозитами, имеют уплощенную овальную форму, их поперечник до 15–20 м, мощность до 3–4 м. В рудоносных пегматоидных анортозитах

размер кристаллов оливина до 6 мм, Са-битовнита — до 12 мм, пойкилокристаллов диопид-авгита — до 120×40 мм, железистого бронзита — до 50 мм. Тонкая сульфидная вкрапленность в анортозитах тяготеет к участкам и полосам с заметным количеством темноцветных минералов, которые сульфиды активно замещают. Максимальная концентрация сульфидов не превышает 7%, рядовая — <1%. Сидеронитовые сульфиды представлены продуктами кристаллизации Ni-Cu-Fe-S расплава. Широко распространены мелкие кристаллы и агрегаты кристаллов Mss, превращенные в сростания троилита, Fe-пирротина, пентландита. Широко распространены мелкие кристаллы Iss1, недосыщенного серой, превращенного в сростания кубанита, троилита, пентландита. Менее распространены более медистые по составу Iss2, Iss3, Iss4, Iss5; среди продуктов твердофазных превращений Iss5 — талнахит. Кубанит, халькопирит и талнахит содержат ламелли распада пентландита.

Сульфидный расплав, продукты кристаллизации которого описаны выше, был неравновесен с породами критического горизонта, местами активно замещал оливин и титаномагнетит. В результате в крупных кристаллах магматического оливина хризолита возникли метасомы — сростания троилита и «нового» оливина — гортонолита Fe_{45-42} , который содержит лишь следы Ni и Са. Реакционный гортонолит слагает и сеть тонких прожилков в магматическом оливине. При замещении магматического титаномагнетита, уже испытавшего окислительный отжиг и представленного матрицей магнетита с решеткой ламелл ильменита, матрица магнетита местами полностью замещалась троилитом, часть ламелл ильменита сохранялась, часть растворялась, возникал «новый» ильменит, состав которого отличен от магматического ильменита — беден Fe^{3+} , Cr, Al. И так, производные сульфидного расплава формировались в восстановительных условиях, отличных от условий формирования магматических пород критического горизонта.

Во всех типах рудоносных пород в агрегатах сульфидов присутствуют новообразования кубического пентландита, который возникает при субсолидусных превращениях Mss и Iss ниже 615–610 °C (Naldrett, 2004); в кристаллах халькопирита развиты двойники полиморфного перехода кристаллической решетки из кубической в тетрагональную, который происходит ниже 550 °C. При отжиге Iss цинк и свинец были «сброшены» из твердого раствора, в результате чего возникли мелкие выделения Fe-сфалерита,

бедного Cd, и мельчайшие (редко более 5 микрон) выделения галенита, бедного Se. Обычно пластинчатые сростания минералов — продуктов распада Mss и Iss заметно перекристаллизованы, превращены в зернистые агрегаты троилита, пирротина и пентландита (Mss), кубанита, троилита и пентландита (Iss) или халькопирита, пирротина и пентландита (Iss).

В расслоенной серии Йоко-Довыренского интрузива благородными металлами обогащены сульфидоносные плагиоклазовые лерцолиты (ПЛ) внизу толщи плагиоперидотитов и дунитов; сульфидоносные пегматоидные троктолиты (Т), слагающие гнезда и секущие маломощные жилы в нижней части толщи троктолитов; сульфидоносные анортозиты и пегматоидные анортозиты (А) жилообразных секущих и субсогласных тел вверху критического горизонта с максимальной концентрацией Pd (до 7.8 г/т), Pt (до 4.1 г/т) и Au (Конников и др., 1994; Кислов и др., 1997; Орсов и др., 2003; Орсов, 2008; Арискин и др., 2013; Ariskin et al., 2018). На основе модельных расчетов А.В. Лавренчук пришел к выводу о том, что критическому горизонту отвечают особые флюидный и термальный режимы, которые обусловили максимальное накопление благородных металлов (Лавренчук, 2006).

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ МИНЕРАЛОВ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ СУЛЬФИДОНОСНЫХ БАЗИТОВ И ГИПЕРБАЗИТОВ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА

Сульфидоносные базиты и ультрабазиты Йоко-Довыренского интрузива содержат три генетических типа минералов благородных металлов: 1. Продукты магматической кристаллизации — включения в оливине и хромшпинелиде. 2. Послемагматические метасоматические вроски в продуктах отжига интеркумулусных магматических сульфидов и в силикатной матрице, обычно недалеко от контактов с сульфидами, имеющие пневматолитовый (флюидно-метасоматический) генезис (рис. 1, 4, 5). 3. Эпигенетические метаморфогенно-гидротермальные образования, возникшие за счет вещества минералов 1-го и 2-го типов (Спиридонов и др., 2017а).

Первый генетический тип — идиоморфные кристаллы иридистого осмия и лаурита, слагающие протогенетические включения в кумулятивном алюмохромите плагиоклазовых лерцолитов (Спиридонов и др., 2018; Арискин и др., 2018).

Наиболее распространены во всех рудоносных породах минералы благородных металлов пневматолитового генезиса – мончеит, котульскит, звягинцевит, атокит, тетраферроплатина, паоловит, теларгпалит, рустенбургит, станно-

палладинит, таймырит, сперрилит, инсизваит, геверсит, фрудит, маякит, минералы ряда Au-Ag – электрум, кюстелит, золото и др., которые нередко ассоциируют с алтаитом (заместившим галенит), с фтор-хлорапатитом, хлорапатитом,

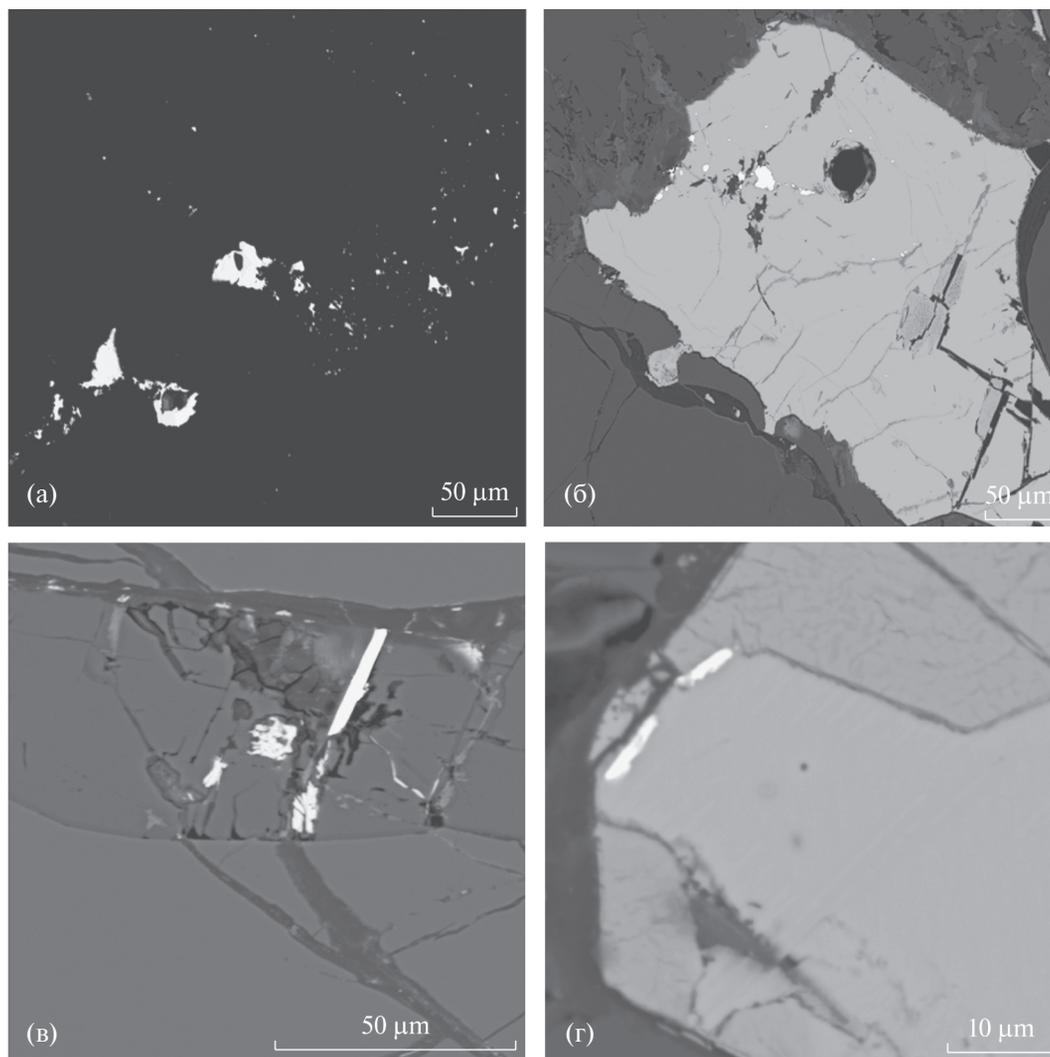


Рис. 1. Морфология кристаллов мончеита в породах Йоко-Довыренского интрузива: а – гнездо метакристаллов мончеита в сростании с майчнеритом, котульскитом и алтаитом (белое) в силикатной матрице (черное) сульфидоносных троктолитов; б – цепочки метакристаллов мончеита в сростании с майчнеритом, котульскитом и алтаитом (белое) на контакте кубанита (серое) с силикатной матрицей (черное) и в кубаните сульфидоносных троктолитов; в – метакристалл – пластина мончеита (белое) (ан. 14 Т, табл. 4) в битовните у контакта с оливином в сульфидоносных троктолитах; г – пластинчатые метакристаллы мончеита (белое) различного состава (ан. 12 Т и 13 Т, табл. 4) на контакте кубанита и пентландита, у края кристалла Iss в сульфидоносных троктолитах; д – неоднородное по составу выделение мончеита в силикатной матрице сульфидоносных троктолитов (черное). Мончеит белого участка (справа) обогащен ртутью и свинцом (ан. 3 Т), в соседних участках мончеита ртуть не обнаружена (ан. 1 Т и 2 Т, табл. 1); е – неоднородный по составу уплощенный метакристалл мончеита (ан. 4 Т - 6 Т, табл. 2) на контакте кубанита (серый) и силикатной матрицы сульфидоносных троктолитов (черное); ж – небольшое гнездо – сростание неоднородных по составу мончеита (белое и светло-серое) и котульскита (серое) в силикатной матрице сульфидоносных троктолитов (черное). Мончеит белого участка (слева) обогащен Hg (ан. 8 Т), в мончеите участка светло-серого цвета Hg не обнаружена (ан. 7 Т, табл. 3). В составе котульскита сильно изменчивы содержания Hg и Bi (ан. 9 Т - 11 Т); з – уплощенный метакристалл мончеита овальной формы (белое) (ан. 15 А) на контакте троилита (серое) и силикатной матрицы в сульфидоносных анортозитах. В верхней части снимка множество мелких неправильной формы выделений алтаита (белое), заместившего галенит. Изображения в отраженных электронах.

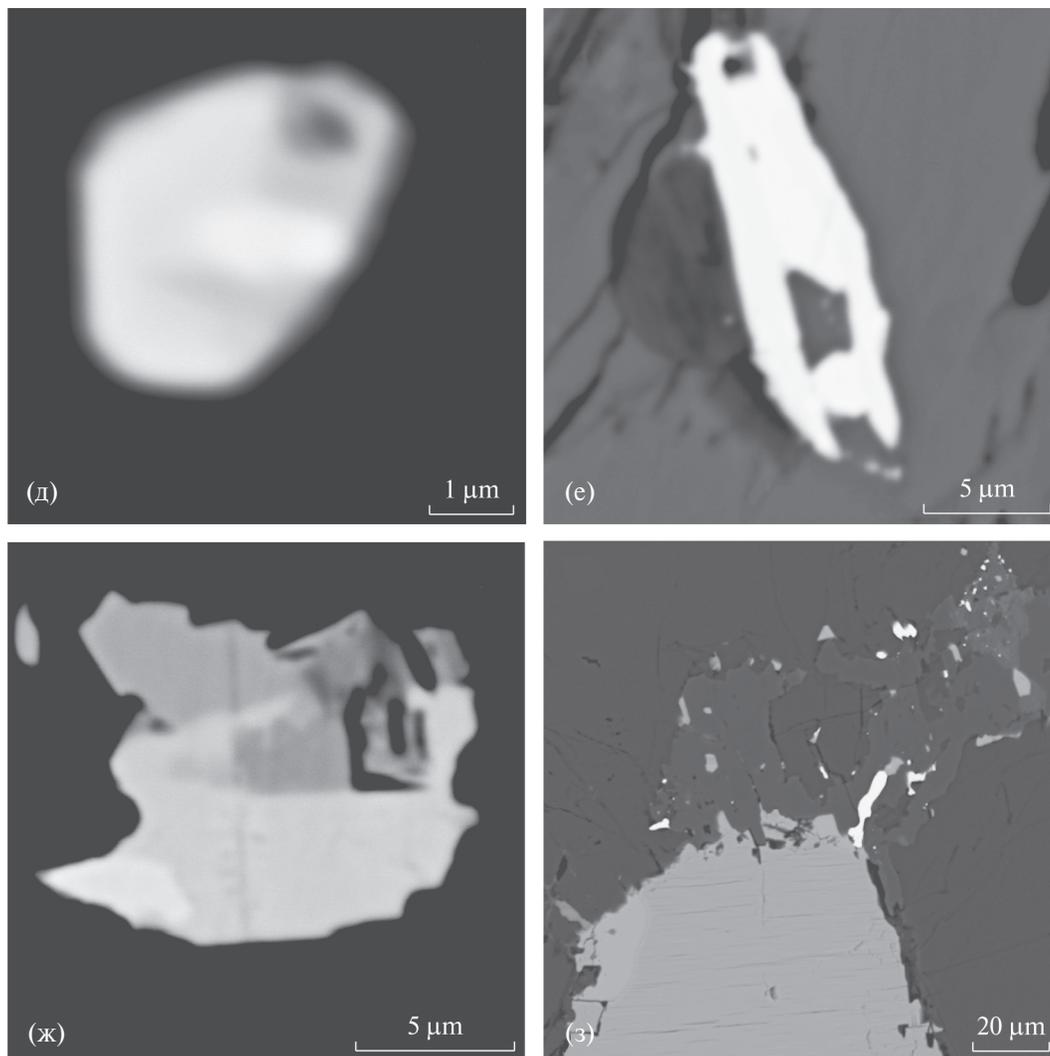


Рис. 1. (Продолжение)

содержащими хлор-флогопитом и амфиболами. Количество минералов благородных металлов существенно увеличивается от нижних плагио-лерцолитов к пегматоидным троктолитам и далее к пегматоидным анортозитам. Размер кристаллов этих минералов обычно менее 10 мкм, изредка до 60 мкм. Редкие выделения электриума достигают 200 мкм. Распределены минералы благородных металлов крайне неравномерно.

Неправильные выделения минералов благородных металлов третьего генетического типа (сульфоарсениды – платарсит, осарсит, ирарсит, руарсит, холингвортит; интерметаллиды – нильсенит $PdCu_3$, купроплатина – туламинит, серебро, амальгама серебра; сульфиды серебра и др.) развиты в гнездах и прожилках хлорита, серпентина, клиноцоизита и иных метаморфогенно-гидротермальных минералов, с включениями борнита, халькозина, самородной меди и др.

Максимальное разнообразие минералов Pd, Pt, Au, в том числе содержащих Hg и Cd, характерно для сульфидоносных пегматоидных анортозитов.

РТУТЬСОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ СУЛЬФИДОНОСНЫХ БАЗИТОВ И ГИПЕРБАЗИТОВ ЙОКО- ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА

Мончеит $Pt(Te, Vi)_2$ – самый распространенный минерал платиновых металлов Йоко-Довыренского интрузива. Мончеит развит в виде мелких <60 микрон метакристаллов пластинчатой и неправильной формы, их сростаний, метасоматических вростков (мономинеральных и в сростаниях с котульскитом, тетраферроплатиной, майчнеритом) в силикатной матрице сульфидоносных базитов и гипербазитов, в гнездах сульфидов среди них, на контактах сульфидов – продуктов распада Mss и Iss и силикатной

матрицы (рис. 1). Состав мончеита весьма изменчив. Даже в пределах крохотного выделения (рис. 1д) содержания Hg, Pb, Bi, Pd изменяются в несколько раз (табл. 1). В пределах мелкого пластинчатого метакристалла (рис. 1е) содержания Hg и Pb изменяются в 10 раз, Bi – в 6 раз, Pb, Ru и Rh – в 3 раза (табл. 2). В пределах небольшого срастания с котульскитом (рис. 1ж) в мончеите содержания Hg и Pb изменяются во много раз, Bi – в 6 раз (табл. 3). В метакристаллах мончеита, удаленных друг от друга на несколько десятков микрон (рис. 1а), содержания Hg, Pb, Bi меняются в десятки раз. Это яркое свидетельство неоднородного состава рудоносных флюидов, при воздействии которых возник мончеит. Мончеит в рудоносных троктолитах содержит до 8.9 мас.% Hg, в рудоносных анортозитах – до 9.4 мас.% Hg (табл. 3, 4). Вариации содержаний Hg, Pb и Te в мончеите отражены на рис. 2.

Котульскит (PdTe) – весьма распространенный минерал благородных металлов. Слагает мелкие метасоматические вроски и метакристаллы в силикатной матрице рудоносных магматических пород, в гнездах сульфидов, на контактах сульфидов и силикатной матрицы (рис. 1а, б, ж; 6). Состав котульскита столь же изменчив, что и состав мончеита. Так, в одном его небольшом выделении (рис. 1ж) содержания ртути изменяются в 15 раз, висмута – в 10 раз (ан. 9 Т – 11 Т, табл. 3). В сульфидоносных троктолитах ртуть содержит каждое девятое из анализированных зерен котульскита. В сульфидоносных анортозитах Hg не обнаружена ни в одном из 8 анализированных зерен котульскита. В целом, состав котульскита в рудоносных троктолитах и рудоносных анортозитах близок (рис. 3).

Звягинцевит (Pd₃Pb) – один из распространенных минералов платиновых металлов в рудоносных магматических породах Йоко-Довыренского интрузива. Ртутьсодержащий звягинцевит обнаружен в сульфидоносных плагиоцерцолитах (ан. 18 ПЛ). В сульфидоносных троктолитах Hg содержит каждое пятое из анализированных зерен звягинцевита (ан. 19 Т, табл. 4). В сульфидоносных анортозитах Hg не обнаружена ни в одном из 8 анализированных зерен звягинцевита.

Станнопалладинит (Pd₅CuSn₂). Мелкий, <6 микрон метакристалл Hg-содержащего (0.85 мас.% Hg) станнопалладинита установлен в одном образце оруденелых анортозитов, его формула: (Pd_{4.68}Pt_{0.16}Ru_{0.04})_{4.88}Cu_{1.09}(Sn_{1.96}Te_{0.04}Hg_{0.03})_{2.03}.

Теларгналит (Pd, Ag)₃Te – распространенный поздний пневматолитовый минерал рудоносных

Таблица 1. Химический состав различных участков одного метакристалла мончеита (рис. 1д) из сульфидоносных пегматоидных троктолитов (Т) Йоко-Довыренского интрузива

Компонент	№ анализа		
	1 (Т)	2 (Т)	3 (Т)
мас.%			
Pt	39.02	35.47	34.50
Pd	1.24	3.39	2.64
Rh	0.40	0.44	0.47
Ru	0.33	0.42	0.71
Te	48.47	49.74	42.06
Bi	6.49	6.91	1.92
Pb	2.96	2.61	10.33
Hg	нпо	нпо	6.98
Сумма	99.21	98.98	99.61
Число атомов в формуле			
Pt	0.94	0.83	0.83
Pd	0.05	0.15	0.12
Rh	0.02	0.02	0.02
Ru	0.02	0.02	0.03
Te	1.76	1.77	1.56
Bi	0.14	0.15	0.04
Pb	0.07	0.06	0.24
Hg	-	-	0.16
Сумма	3	3	3

Примечания. Здесь и далее: в тексте и таблицах сквозная нумерация анализов; нпо – ниже предела обнаружения. Os, Ir, Au, Ag, Ni, Co, Cu, Zn, Cd, Sn, Sb, As, S, Se не обнаружены.

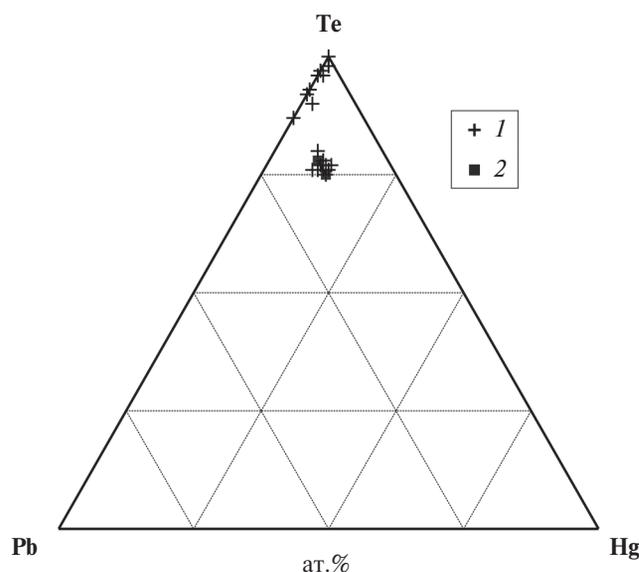


Рис. 2. Вариации состава мончеита сульфидоносных пород Йоко-Довыренского интрузива. Условные обозначения: 1 – мончеит из троктолитов, 2 – мончеит из анортозитов.

Таблица 2. Химический состав различных участков одного метакристалла мончеита (рис. 1е) из сульфидоносных пегматоидных троктолитов (Т) Йоко-Довыренского интрузива

Компонент	№ анализа		
	4 (Т)	5 (Т)	6 (Т)
мас. %			
Pt	38.33	39.00	37.76
Rh	0.22	0.46	0.16
Ru	0.79	0.35	1.00
Ir	нпо	1.51	нпо
Ni	0.27	0.18	0.26
Te	39.86	48.50	39.59
Bi	2.29	5.88	1.02
Pb	9.74	3.06	10.04
Hg	8.16	0.93	9.80
Сумма	99.66	99.87	99.63
Число атомов в формуле			
Pt	0.95	0.93	0.93
Rh	0.01	0.02	0.01
Ru	0.04	0.02	0.05
Ir	-	0.04	-
Ni	0.01	0.01	0.01
Te	1.50	1.76	1.50
Bi	0.05	0.13	0.02
Pb	0.23	0.02	0.23
Hg	0.20	0.02	0.24
Сумма	3	3	3

Примечания. Os, Pd, Au, Ag, Co, Cu, Zn, Cd, Sn, Sb, As, Se, S не обнаружены.

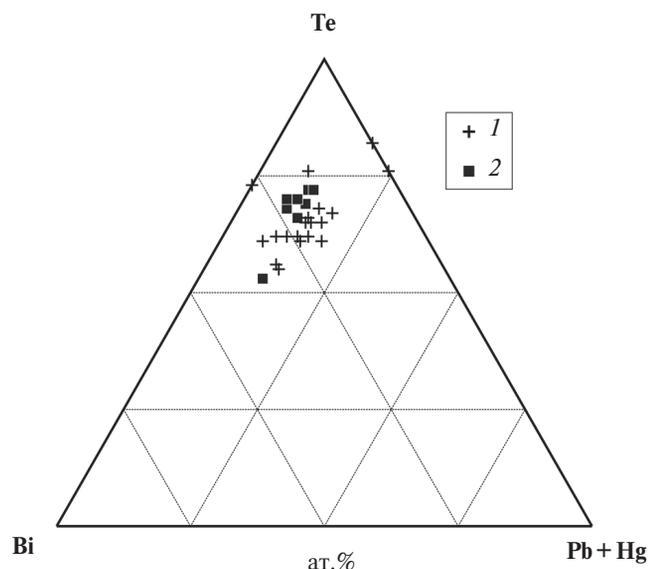


Рис. 3. Вариации состава котульскита сульфидоносных пород Йоко-Довыренского интрузива. Условные обозначения: 1 – котульскит из троктолитов, 2 – котульскит из анортозитов.

троктолитов и анортозитов. Слагает псевдоморфозы по тетраферроплатине и майчнериту (рис. 4), мончеиту и котульскиту (рис. 5) и палловиту. Обычно содержит реликты замещенных минералов платиновых металлов (рис. 4б). Ртуть обнаружена в 16 из 18 анализированных зерен теларггалита троктолитов. В теларггалите троктолитов соотношение Pd : Ag варьирует от 1.8:1 до 1:1; заметная часть Te замещена Pb и/или Hg, изредка и Sn; содержание Hg – от следов до 11.1%, среднее – 5.9 мас.%; содержание Pt – от следов до 4.9 мас.%; Ni – от следов до 1.5%; небольшие примеси Au, Ru, Rh, Cu (ан. 20 Т – 26 Т, табл. 5; рис. 6). Ртуть обнаружена в 6 из 10 анализированных зерен теларггалита рудоносных анортозитов. В теларггалите рудоносных анортозитов соотношение Pd : Ag относительно постоянно – 1.3-1.4:1; заметная часть Te замещена Pb и Hg, изредка и Bi; содержание Hg – от следов до 7.1%, среднее – 2.9 мас.%; примеси Au, Rh (ан. 27 А – 32 А, табл. 6; рис. 6). Формирование теларггалита связано с накоплением в остаточных рудоносных флюидах Ag и Hg.

Потарит (PdHg) – характерный минерал телетермальных низкотемпературных U-Se, Au-U-Se, Au-Se формаций (Jedwab, 1999; Fleet et al., 2002), также развит в составе магматогенных концентраций платиновых металлов, захваченных процессами низкоградного метаморфизма – серпентинизации (Prichard et al., 1994; Moreno et al., 1999; Спиридонов и др., 2000). В сульфидоносных пегматоидных троктолитах Йоко-Довыренского интрузива развит потарит состава Pd(Hg_{0.80}Pb_{0.20}) (ан. 38 Т, табл. 7). В сульфидоносных анортозитах потарита гораздо больше (Орсоев и др., 2003; Орсоев, 2008), это стехиометричный PdHg (ан. 39 А, табл. 7).

Амальгамы Au-Ag. В рудоносных троктолитах ртутистые электрум и кюстелит иногда ассоциируют с теларггалитом и Pb-потаритом, в рудоносных анортозитах – ртутистое золотистое серебро с потаритом. Ртутистый электрум содержит 1.3–2.1 мас. % Hg (ан. 33 Т, 34 Т, табл. 7), ртутистый кюстелит – 1.8–13.9% Hg (ан. 35 Т, 36 Т), ртутистое золотистое серебро – 11.7–12.1% Hg (ан. 37 А, 38 А, табл. 7).

Амальгама Ag. В секущих прожилках хлорита и серпентина среди агрегатов сульфидов рудоносных анортозитов и около них изредка находятся агрегаты мельчайших зерен амальгамы серебра (рис. 7), с которыми местами ассоциирует акантит Ag₂S. Состав амальгамы серебра, ан. 45, мас. %: Ag 44.53; Cu 0.89; Hg 53.37; сумма

Таблица 3. Химический состав неоднородных по составу кристаллов мончеита (7-8) и котульскита (9-11) (срастание на рис. 1з) из сульфидоносных пегматоидных троктолитов (Т) Йоко-Довыренского интрузива

Компонент	№ анализа				
	7 (Т)	8 (Т)	9 (Т)	10 (Т)	11 (Т)
мас. %					
Pt	37.76	33.53	нпо	нпо	1.85
Pd	1.16	1.91	39.59	37.44	37.67
Ru	0.37	0.71	нпо	нпо	0.61
Rh	1.17	0.65	0.25	0.28	0.42
Ni	0.13	0.15	нпо	нпо	0.38
Cu	0.25	0.63	0.35	0.17	нпо
Ag	нпо	нпо	нпо	2.39	нпо
Te	59.67	41.34	31.57	34.06	37.57
Bi	6.16	1.07	16.75	12.63	1.12
Pb	нпо	10.43	11.00	11.37	13.54
Hg	нпо	8.95	нпо	0.41	6.51
Сумма	99.69	99.37	99.51	98.75	99.67
Число атомов в формуле					
Pt	0.87	0.81	-	-	0.02
Pd	0.06	0.09	0.98	0.91	0.91
Ru	0.02	0.03	-	-	0.02
Rh	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01
Ni	0.01	0.01	-	-	0.02
Cu	0.01	0.05	0.01	0.01	-
Ag	-	-	-	0.06	-
Сумма	1.02	1.02	1.00	0.99	0.98
Te	1.85	1.52	0.65	0.70	0.76
Bi	0.13	0.02	0.21	0.16	0.01
Pb	-	0.23	0.14	0.14	0.17
Hg	-	0.21	-	0.01	0.08
Сумма	1.98	1.98	1.00	1.01	1.02

Примечания. Os, Ir, Au, Co, Zn, Cd, Sn, Sb, As, Se, S не обнаружены.

Таблица 4. Химический состав ртути содержащих мончеита (12-16), котульскита (17), звягинцевита (18-19), сульфидоносных плагиолерцолитов (ПЛ), пегматоидных троктолитов (Т) и анортозитов (А) Йоко-Довыренского интрузива

Компонент	№ анализа							
	12 (Т)	13 (Т)	14 (Т)	15 (А)	16 (А)	17 (Т)	18(ПЛ)	19 (Т)
мас.%								
Pt	39.04	38.02	35.68	31.74	40.03	4.12	нпо	2.73
Pd	нпо	нпо	1.35	2.41	нпо	36.98	60.37	55.22
Ru	0.33	0.78	0.86	0.57	нпо	нпо	нпо	нпо
Rh	0.44	0.21	0.17	0.23	нпо	0.22	нпо	нпо
Ir	нпо	нпо	нпо	1.20	нпо	нпо	нпо	1.31
Os	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	1.51
Au	нпо	нпо	нпо	1.59	нпо	нпо	нпо	нпо
Ni	нпо	нпо	0.14	0.19	0.28	нпо	нпо	нпо
Te	49.04	40.88	39.96	41.55	38.29	31.05	0.35	нпо
Bi	5.60	2.16	1.45	нпо	нпо	14.77	нпо	нпо
Pb	2.91	9.18	10.52	11.16	10.84	12.40	36.19	34.72
Hg	0.89	7.69	8.93	8.09	9.40	0.69	1.59	2.77
Se	нпо	нпо	0.23	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	99.69	98.92	99.29	98.67	98.84	100.23	98.50	98.26
Число атомов в формуле								
Pt	0.94	0.94	0.88	0.78	1.01	0.05	-	0.08
Pd	-	-	0.06	0.11	-	0.93	3.02	2.84
Ru	0.01	0.03	0.04	0.02	-	-	-	-
Rh	0.02	0.01	0.01	0.01	-	0.01	-	-
Ir	-	-	-	0.02	-	-	-	0.04
Os	-	-	-	-	-	-	-	0.05
Au	-	-	-	0.04	-	-	-	-
Ni	-	-	0.01	0.01	0.02	-	-	-
Сумма	0.97	0.98	1.01	0.99	1.03	0.99	3.02	3.01
Te	1.81	1.56	1.50	1.56	1.48	0.65	0.01	-
Bi	0.13	0.05	0.03	-	-	0.19	-	-
Pb	0.07	0.23	0.24	0.26	0.26	0.16	0.93	0.92
Hg	0.02	0.18	0.21	0.19	0.23	0.01	0.04	0.07
Se	-	-	0.01	-	-	-	-	-
Сумма	2.03	2.02	1.99	2.01	1.97	1.01	0.98	0.99

Примечания. Со, Сu, Zn, Cd, Sb, As, S не обнаружены.

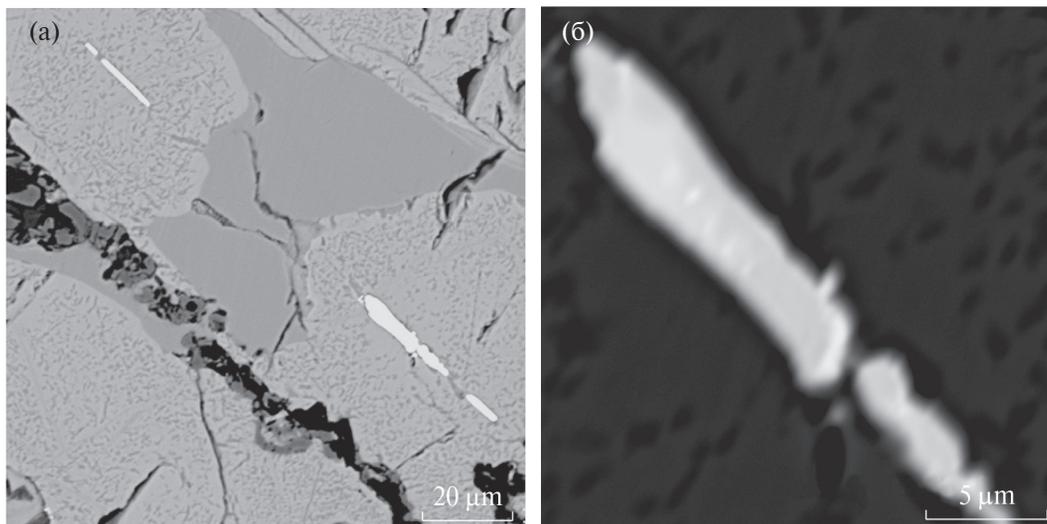


Рис. 4. Морфология кристаллов теларгпалита в породах Йоко-Довыренского интрузива: а — цепь кристаллов тетраферроплатины (в сростании с майчнеритом) (белое), которые пересекли сростания пентландита и кубанита (серое) — продукты распада Iss в сульфидоносных троктолитах. Тетраферроплатину и майчнерит в значительной степени заместил теларгпалит; б — псевдоморфозы теларгпалита (светло-серое, ан. 24 Т и 25 Т) по тетраферроплатине и майчнериту (белое, реликты) в сульфидоносных троктолитах (деталь рис. 4а). Изображения в отраженных электронах.

98.79%; формула минерала — $\text{Ag}_{0.60}\text{Cu}_{0.02}\text{Hg}_{0.38}$ или $(\text{Ag}_{7.75}\text{Cu}_{0.26})_{8.01}\text{Hg}_{4.99}$.

Заметное количество Hg в минералах благородных металлов Йоко-Довыренского интрузива — вероятное свидетельство того, что их формирование произошло в условиях закрытой системы при невысоких температурах. Количество потарита в сульфидоносных анортозитах значительно выше, чем в сульфидоносных пегматоидных троктолитах. Возможно, потарит в Йоко-Довыренском интрузиве возник при эпигенетических процессах низкоградного метаморфизма (серпентинизации...) за счет вещества теларгпалита, котульскита и звягинцевита. С этим предположением согласуются: 1) крайне неравномерное распределение потарита, что характерно для продуктов низкоградного метаморфизма (Спиридонов и др., 2000), 2) разброс содержаний Hg в главном минерале-носителе — теларгпалите в анортозитах выше, а содержание — ниже (в среднем 2.9 мас.% Hg, $n = 10$), чем в теларгпалите троктолитов (в среднем 5.9 мас.% Hg, $n = 8$) (рис. 6); 3) в котульските троктолитов каждое восьмое зерно содержит Hg, в котульските анортозитов Hg не обнаружена ни в одном из 8 анализированных зерен; 4) в звягинцевите троктолитов каждое пятое зерно содержит Hg, в звягинцените анортозитов Hg не обнаружена ни в одном из 8 анализированных зерен; 5) значительно большая интенсивность метаморфизма сульфидоносных анортозитов и пегматоидных анортозитов, в которых развиты обильные ме-

таморфогенно-гидротермальные клиноцоизит, пренит, пектолит, хлориты, серпентины, корренсит, хизлевудит. Вероятно, ситуация в Йоко-Довыренском интрузиве близка к описанной для метаофиолитов Shetland (Prichard et al., 1994) и для метахромититов Herbeira (Moreno et al., 1999),

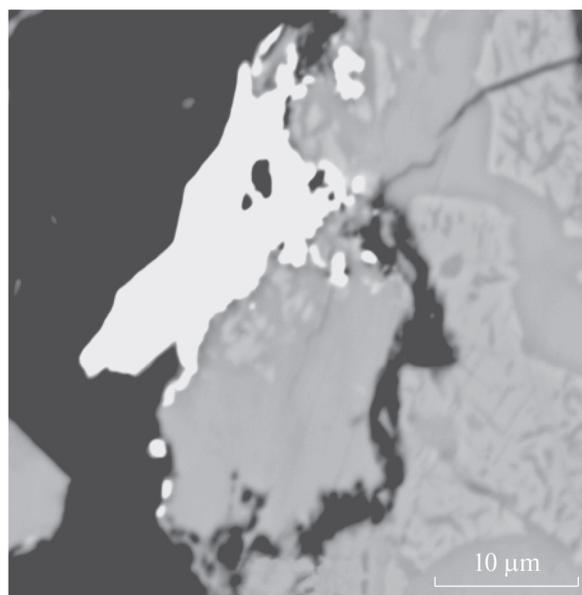


Рис. 5. Метасоматический росток теларгпалита (белое) на контакте пентландита и кубанита (серое) — продуктов распада Iss и силикатной матрицы сульфидоносных троктолитов. Теларгпалит неоднороден по составу (ан. 22 Т и 26 Т), содержит реликты замещенных мончеита и котульскита. Изображение в отраженных электронах.

Таблица 5. Химический состав ртутидержащего теларгпалита сульфидоносных пегматоидных троктолитов (Т) Йоко-Довыренского интрузива

Компонент	№ анализа						
	20 (Т)	21 (Т)	22 (Т)	23 (Т)	24 (Т)	25 (Т)	26 (Т)
мас. %							
Pd	41.81	34.38	33.66	36.33	33.00	33.30	36.22
Pt	0.86	нпо	4.86	нпо	3.65	4.81	нпо
Ru	0.24	нпо	0.31	нпо	0.40	0.45	нпо
Rh	0.25	нпо	0.28	нпо	0.22	нпо	нпо
Au	нпо	нпо	0.66	нпо	нпо	нпо	нпо
Ni	0.13	нпо	нпо	нпо	1.54	1.09	нпо
Fe	1.11	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Cu	0.55	нпо	нпо	нпо	0.36	0.40	нпо
Ag	22.32	34.96	28.65	33.47	28.95	29.48	31.51
Te	22.56	23.60	18.86	21.53	19.76	19.09	21.87
Pb	3.94	нпо	5.06	нпо	3.67	3.94	нпо
Hg	1.14	5.87	6.42	7.35	7.58	7.65	11.06
Sn	4.46	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	97.37	98.81	98.76	98.98	99.13	100.21	100.66
Число атомов в формуле в расчете на 4 атома							
Pd	1.79	1.50	1.55	1.60	1.47	1.48	1.59
Pt	0.02	-	0,12	-	0.09	0.12	-
Ru	0.01	-	0.02	-	0.02	0.02	-
Rh	0.01	-	0.01	-	0.01	-	-
Au	-	-	0.01	-	-	-	-
Ni	0.01	-	-	-	0.12	0.08	-
Fe	0.09	-	-	-	-	-	-
Cu	0.04	-	-	-	0.03	0.03	-
Ag	0.94	1.50	1.30	1.44	1.27	1.29	1.36
Сумма	2.91	3.00	3.01	3.04	3.01	3.02	2.95
Te	0.81	0.86	0.72	0.79	0.73	0.71	0.80
Pb	0.08	-	0.12	-	0.08	0.09	-
Hg	0.03	0.14	0.15	0.17	0.18	0.18	0.25
Sn	0.17	-	-	-	-	-	-
Сумма	1.09	1.00	0.99	0.96	0.99	0.98	1.05

Примечания. Os, Ir, Co, Zn, Cd, Sb, As, Se, S не обнаружены.

Таблица 6. Химический состав ртути содержащего теларгпалита сульфидоносных анортозитов (А) Йоко-Довыренского интрузива

Компонент	№ анализа					
	27 (А)	28 (А)	29 (А)	30 (А)	31 (А)	32 (А)
мас. %						
Pd	36.99	37.70	38.22	38.13	37.55	39.84
Rh	0.29	нпо	0.21	нпо	нпо	нпо
Au	0.99	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Ag	29.15	30.61	31.01	30.61	30.22	27.90
Te	19.85	20.82	20.42	21.42	19.83	19.93
Pb	5.39	5.60	7.86	5.60	5.41	5.21
Hg	3.06	3.71	4.05	4.41	6.53	7.13
Bi	1.85	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	97.57	98.44	101.77	100.17	99.54	100.01
Число атомов в формуле в расчете на 4 атома						
Pd	1.67	1.68	1.65	1.67	1.67	1.76
Rh	0.01	-	0.01	-	-	-
Au	0.03	-	-	-	-	-
Ag	1.30	1.34	1.33	1.32	1.32	1.22
Сумма	3.01	3.02	2.99	2.99	2.99	2.98
Te	0.75	0.77	0.74	0.78	0.73	0.73
Pb	0.13	0.13	0.17	0.12	0.13	0.12
Hg	0.07	0.08	0.10	0.11	0.15	0.17
Bi	0.04	-	-	-	-	-
Сумма	0.99	0.98	1.01	1.01	1.01	1.02

Примечания. Ru, Os, Ir, Pt, Ni, Co, Cu, Zn, Cd, Sn, Sb, As, Se, S не обнаружены.

Таблица 7. Химический состав ртути содержащих минералов — ртутистого электрума (33-34), ртутистого кюстелита (35-36), ртутистого серебра (37-38), потарита (39-40) рудоносных троктолитов (Т) и анортозитов (А) Йоко-Довыренского интрузива

Компонент	№ анализа							
	33 (Т)	34 (Т)	35 (Т)	36 (Т)	37 (А)	38 (А)	39 (Т)	40 (А)
мас. %								
Au	40.70	39.05	25.30	21.42	8.77	8.48	нпо	1.31
Ag	56.52	58.34	72.19	62.92	77.74	75.09	нпо	нпо
Cu	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	3.01	нпо	0.27
Pd	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	33.97	32.69
Pb	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	10.62	нпо
Hg	2.14	1.32	1.82	13.88	12.10	11.69	53.94	64.13
Au	40.70	39.05	25.30	21.42	8.77	8.48	нпо	1.31
Сумма	99.36	98.71	99.31	98.20	98.61	98.27	98.53	98.40
Пробность	410	396	255	218	89	86		
Число атомов в формуле								
Au	0.28	0.26	0.16	0.14	0.05	0.05	-	0.02
Ag	0.71	0.73	0.83	0.77	0.88	0.82	-	-
Cu	-	-	-	-	-	0.06	-	0.01
Pd	-	-	-	-	-	-	1.00	0.96
Pb	-	-	-	-	-	-	0.16	-
Hg	0.01	0.01	0.01	0.09	0.07	0.07	0.84	1.01

Примечания. Ru, Os, Ir, Rh, Pt, Ni, Co, Cu, Zn, Cd, Bi, Sb, As, Te, Se, S не обнаружены.

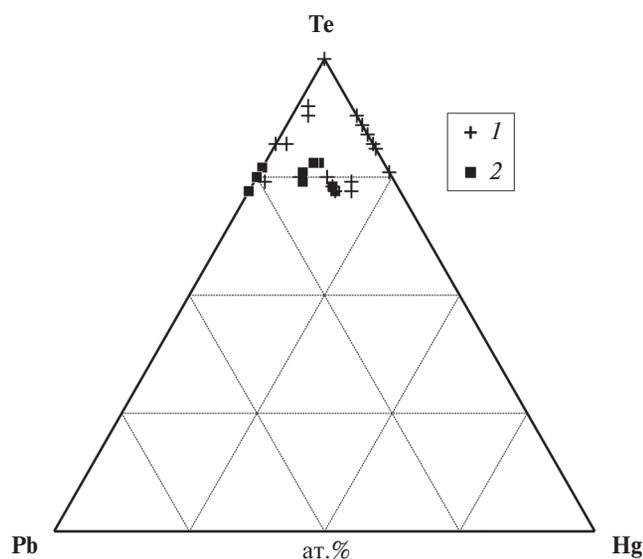


Рис. 6. Вариации состава теларггалита сульфидоносных пород Йоко-Довыренского интрузива. Условные обозначения: 1 – теларггалит из троктолитов, 2 – теларггалит из анортозитов.

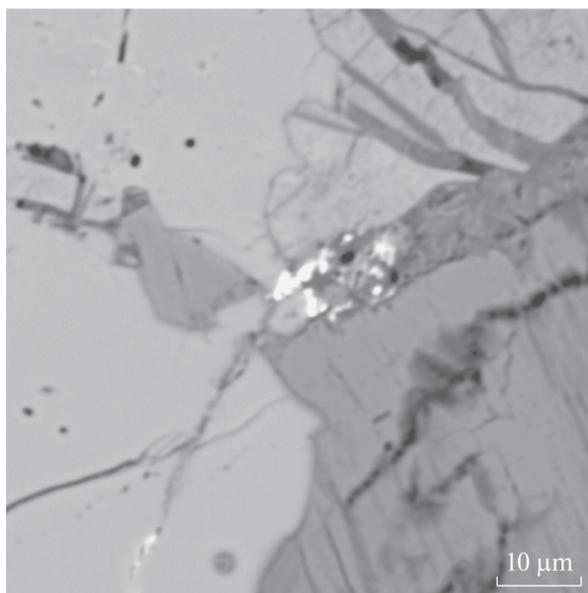


Рис. 7. Скопление мелких выделений амальгамы серебра (белое) в трещине с хлоритом и серпентином, секущей агрегат троилита и кубанита в сульфидоносных троктолитах Йоко-Довыренского интрузива. Изображение в отраженных электронах.

в которых в процессе низкоградного метаморфизма возникло заметное количество потарита.

КАДМИЙСОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ СУЛЬФИДОНОСНЫХ ПЕГМАТОИДНЫХ АНОРТОЗИТОВ

Мелкие и редкие выделения Cd-содержащих минералов благородных металлов установлены

только в сульфидоносных пегматоидных анортозитах критического горизонта. Это звягинцевит, три образца которого из 13 анализированных содержат 0.4–1.2 мас.% Cd (ан. 40 А – 42 А, табл. 8), и теларггалит, один образец которого из 10 анализированных содержит 0.4% Cd (ан. 43 А, табл. 8). Кадмийсодержащий теларггалит, в отличие от теларггалита без кадмия, обогащен оловом.

ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Детально изучены ртутьсодержащие минералы благородных металлов в сульфидоносных базитах и гипербазитах Йоко-Довыренского интрузива. Заметное количество Hg в них – вероятное свидетельство того, что формирование рудоносных пород произошло в условиях закрытой системы при невысоких температурах. Количество амальгамы Pd потарита в рудоносных анортозитах значительно выше, а содержание ртути

Таблица 8. Химический состав кадмийсодержащих звягинцевита (41-43) и теларггалита (44) сульфидоносных пегматоидных анортозитов (А) Йоко-Довыренского интрузива

Компонент	№ анализа			
	41 (А)	42 (А)	43 (А)	44 (А)
	мас. %			
Pd	57.36	59.81	58.91	40.55
Ru	нпо	нпо	0.59	нпо
Rh	0.44	0.38	нпо	0.22
Au	3.62	нпо	1.61	нпо
Ni	0.14	нпо	нпо	0.14
Ag	нпо	нпо	нпо	29.14
Pb	37.76	36.95	36.64	5.55
Cd	0.43	1.04	1.19	0.38
Sn	нпо	нпо	нпо	3.13
Te	нпо	нпо	нпо	20.79
Сумма	99.75	98.18	98.94	99.90
	Число атомов в формуле в расчете на 4 атома			
Pd	2.88	2.99	2.93	1.74
Ru	-	-	0.03	-
Rh	0.02	0.02	-	0.01
Au	0.10	-	0.05	-
Ni	0.02	-	-	0.01
Ag	-	-	-	1.23
Pb	0.96	0.94	0.93	0.12
Cd	0.02	0.05	0.06	0.02
Сумма	4	4	4	4

Примечания. Os, Ir, Pt, Co, Cu, Zn, Cd, S, Se не обнаружены.

в основном минерале — ее носителе теларгпалите анортозитов заметно ниже (в среднем 2.9 мас.% Hg), чем в теларгпалите рудоносных троктолитов (в среднем 5.9% Hg). Возможно, потарит возник при эпигенетических процессах серпентинизации (низкоградного метаморфизма) за счет вещества пневматолитовых ртутьсодержащих минералов теларгпалита, котульскита и звягинцевита. С этим коррелируется значительно большая интенсивность метаморфизма анортозитов.

Впервые описаны кадмийсодержащие минералы платиновых металлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 16-17-10129) с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арискин А.А., Костицын Ю.А., Конников Э.Г., Данюшевский Л.В., Меффе С., Николаев Г.С., Мак-Нил Э., Кислов Е.В., Орсоев Д.А. (2013) Геохронология Довыренского интрузивного комплекса в неопротерозое (Северное Прибайкалье, Россия). *Геохимия* (11), 955–1052.
- Ariskin A.A., Kostitsyn Yu.A., Konnikov E.G., Danyushevsky L.V., Meffre S., Nikolaev G.S., McNeill A., Kislov E.V., Orsoev D.A. (2013) Geochronology of the Dovyren Intrusive Complex, Northwestern Baikal Area, Russia, in the Neoproterozoic *Geochem. Int.* **51**(11), 859–875.
- Арискин А.А., Николаев Г.С., Данюшевский Л.В., Фиорентини М., Кислов Е.В., Пшеницын И.В. (2018) Геохимические свидетельства фракционирования платиноидов иридиевой группы на ранних стадиях кристаллизации Довыренских магм (Северное Прибайкалье, Россия). *Геология и геофизика* **59**(5), 573–588.
- Гурулев С.А. (1965) Геология и условия формирования Йоко-Довыренского габбро-перидотитового массива. М.: Наука. 122 с.
- Кислов Е.В., Конников Э.Г., Орсоев Д.А. (1997) Роль хлора в формировании малосульфидного платинометаллоносного оруденения Йоко-Довыренского расслоенного массива. *Геохимия* (5), 521–528.
- Kislov E.V., Konnikov E.G., Orsoev D.A., Pushkarev E.V., Voronina L.K. (1997) Chlorine in the Genesis of the Low-Sulfide PGE Mineralization in the Ioko-Dovyrenskii Layered Massif. *Geochem. Int.* **35**(5), 455–461.
- Конников Э.Г., Кислов Е.В., Орсоев Д.А. (1994) Йоко-Довыренский расслоенный плутон и связанное с ним оруденение (Северное Прибайкалье). *Геология рудных месторождений* **36**(6), 545–553.
- Лавренчук А.В. (2006) Кумуляционно-компакционная модель формирования расслоенных интрузивов на примере Йоко-Довыренского массива. *Актуальные проблемы рудообразования и металлогении*. Новосибирск: ГЕО, 132–133.
- Орсоев Д.А. (2008) Йоко-Довыренский дунит-троктолит-габбровый массив и его платиноносность. *Благороднометалльная минерализация в расслоенных ультрабазит-базитовых массивах юга Сибирской платформы*. Новосибирск: Параллель, 89–194.
- Орсоев Д.А., Рудашевский Н.С., Крецер Ю.Л., Конников Э.Г. (2003) Благороднометалльная минерализация малосульфидного оруденения в Йоко-Довыренском расслоенном массиве. *ДАН* **390**(2), 233–237.
- Спиридонов Э.М. (2010) Рудно-магматические системы Норильского рудного поля. *Геология и геофизика* **51**(9), 1356–1378.
- Спиридонов Э.М. (2017) Низкоградный метаморфизм — рудоподготовительный, рудогенерирующий, рудопреобразующий процесс. *Геодинамические обстановки и термодинамические условия регионального метаморфизма в докембрии и фанерозое*. СПб.: ИГГД, 166–168.
- Спиридонов Э.М., Арискин А.А., Кислов Е.В., Орсоев Д.А., Коротаяева Н.Н., Николаев Г.С., Путинцева Е.В., Япаскурт В.О. (2017а) Три генетических типа минералов благородных металлов в плагиоклазовых лерцолитах низов гипербазит-базитового Йоко-Довыренского интрузива в байкалидах Северного Прибайкалья. *Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: Материалы V Международной конференции (Гремячинск, 2–6 сентября 2017 г.)* отв.ред. Е.В. Кислов. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2017, с. 277–279.
- Спиридонов Э.М., Арискин А.А., Кислов Е.В., Коротаяева Н.Н., Николаев Г.С., Пшеницын И.В., Япаскурт В.О. (2018) Лаурит и иридий осмий из плагиоклазовых лерцолитов Йоко-Довыренского гипербазит-базитового интрузива (Северное Прибайкалье). *Геология рудных месторождений* **60**(3), 241–250.
- Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А., Куликова И.М., Середа Е.В., Тушенцова И.Н., Беляков С.Н. (2015) Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах. *Геология рудных месторождений* **57**(5), 447–476.
- Спиридонов Э.М., Ладыгин В.М., Симонов О.Н., Анастасенко Г.Ф., Кулагов Э.А., Люлько В.А., Середа Е.В., Степанов В.К. (2000) Метавулканы пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: *Издательство Московского университета*. 212 с.
- Спиридонов Э.М., Орсоев Д.А., Кислов Е.В., Арискин А.А., Япаскурт В.О. (2017б) Палладогерманид Pd₂Ge, нильсенит PdCu₂ и ассоциирующие минералы сульфидоносных анортозитов критического горизонта гипербазит-базитового Йоко-Довыренского интрузива в Северном Прибайкалье. *Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты. Всероссийская конференция, посвященная 120-летию со дня рождения выдающегося российского ученого академика А.Г. Бетехтина*. Москва, 20–22 ноября 2017 г. Материалы конференции. Электрон. дан. (1 файл: 35 Мб). — М.: ИГЕМ РАН, 2017, с. 57–61.
- Ярошевский А.А., Болиховская С.В., Коптев-Дворников Е.В. (2006) Геохимическая структура Йоко-Довыренского расслоенного дунит-троктолит-габбро-норитового интрузива, Северное Прибайкалье. *Геохимия* (10), 1027–1039.
- Yaroshevskii A.A., Bolikhovskaya S.V., Koptev-Dvornikov E.V. (2006) Geochemical Structure of the Yoko-Dovyren Layered Dunite-Troctolite-Gabbro-Norite Massif, Northern Baikal Area *Geochem. Int.* **44**(10), 953–964.

- Amelin Yu.V., Neymark L.A., Ryt'sk E.Yu., Nemchin A.L. (1996) Enriched Nd-Sr-Pb isotopic signatures in the Dovyren layered intrusion (eastern Siberia, Russia): evidence for source contamination by ancient upper-crust material. *Chem. Geol.* **129**, 39–69.
- Ariskin A., Danyushevsky L., Nikolaev G., Kislov E., Fiorentini M., McNeil A., Kostitsyn Y., Goemann K., Malyshev A. (2018) The Dovyren Intrusive Complex (Southern Siberia, Russia): Insights into dynamics of an open magma chamber with implication for parental magma origin, composition, and Cu-Ni-PGE fertility. *Lithos.* **302–303**, 242–262.
- Fleet M.E., de Almeida C.M., Angeli N. (2002) Botryoidal platinum, palladium and potarite from the Bom Susseco stream, Minas Gerais, Brazil. *Can. Mineral.* **40**, 341–355.
- Jedwab J., Badaut D., Beaunier P. (1999) Discovery of palladium-platinum-gold-mercury bitumen in the Boss Mine, Clark county, Nevada. *Econ. Geol.* **94**, 1163–1172.
- Moreno T., Prichard H.M., Lunar R., Monterrubio S., Fischer P. (1999) Formation of a secondary platinum-group mineral assemblage in chromitites from the Herbeira ultramafic massif in Cabo Ortegal, NW Spain. *Eur. J. Mineral.* **11**, 363–378.
- Naldrett A.J. (2004) Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and exploration. Berlin-Heidelberg-N.Y.: Springer. 727 p.
- Parfenov L.M., Badarch G., Berzin N.A., Hwang D.H., Khan-chuk A.I., Kuzmin M.I., Nokleberg W.J., Obolenskiy A.A., Ogasawara M., Prokopiev A.V., Rodionov S.M., Smelov A.P., Yan H. (2010) Chapter 1 (Introduction). In: Nokleberg W.J. (Ed.) Metallogenesis and tectonics of northeast Asia: U.S. Geological Survey Professional Paper 1765, pp. 1–36.
- Prichard H.M., Ixer R.A., Lord R.A., Maynard J., Williams N. (1994) Assemblages of platinum-group minerals and sulfides in silicate lithologies and chromite-rich rocks within the Shetland ophiolite. *Can. Mineral.* **32**, 271–294.

Hg- AND Cd-BEARING Pd, Pt, Au, AND Ag MINERALS IN SULFIDE-BEARING MAFIC AND ULTRAMAFIC ROCKS OF THE YOKO-DOVYREN INTRUSION IN THE BAIKALIDES OF THE NORTHERN BAIKAL AREA

E. M. Spiridonov^{a,*}, D. A. Orsoev^b, A. A. Ariskin^{a,c}, G. S. Nikolaev^c,
E. V. Kislov^b, N. N. Korotaeva^a, and V. O. Yapaskurt^a

^aMoscow State University, Leninskie gory, Moscow, 119234 Russia

^bGeological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 670047, Russia

^cVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKhI), Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

Hg and Cd are rare chemical elements found in magmatic PGE and Au mineralization and typical of this mineralization in the Late Riphean Yoko-Dovyren plagioperidotite–troctolite–gabbro-norite intrusion hosted in the Baikhalides of the Baikal area. The paper discusses variations in the composition, associations, and distribution traits of the Hg- and Cd-bearing Pt, Pd, Au, and Ag minerals. Many of the precious-metal minerals are Pt, Pd, and Au chalcogenides and intermetallic compounds of postmagmatic genesis and occur as single crystals and stringers in sulfides and silicate matrix and at their contacts. The minerals were formed with the participation of fluids from the crystallizing Cu–Fe–Ni sulfide melts. They are constrained to the central part of the intrusion and found in sulfide-bearing plagiolherzolite (PL) in the lower part of the intrusion, in sulfide-bearing pegmatoid troctolite (T) in the bottom portion of the troctolite unit, and in sulfide-bearing pegmatoid anorthosite (A) in the top part of the troctolite unit. From PL to T and further to A, the content and diversity of the Hg-bearing minerals remarkably increase, with Hg distributed in these minerals very unevenly, and with Cd-bearing minerals identified only in A. The leading Hg concentrators in T and A are pneumatolytic (fluid–metasomatic) moncheite and, particularly, later telargpalite (Pd,Ag)₃(Te,Pd,Hg), which contains up to 11 wt % Hg. The latter mineral is sometimes found in association with Hg-electrum, kustelite, and potarite. Potarite in T is Pb-rich, and this mineral in A is Pb-free. Appreciable Hg concentrations in precious-metal minerals in the Yoko-Dovyren intrusion suggest that these minerals crystallized in a closed system at high temperatures. Potarite content in A is much higher, and Hg concentration in telargpalite in A is notably lower (2.9 wt % Hg on average) than in this mineral in T (5.9 wt % Hg on average). The potarite might have been produced by epigenetic serpentinization processes (low-grade metamorphism) at the expense of the material of pneumatolytic Hg-bearing telargpalite, kotulskite, and zvyagentsivite. This corresponds to specifics in Hg distribution in the telargpalite, kotulskite, and zvyagentsivite in T and A and much higher intensity of metamorphism.

Keywords: sulfide-bearing rocks, plagiolherzolite, troctolite, anorthosite, Hg-moncheite, Hg-zvyagentsivite, Hg-kotulskite, Hg-telargpalite, Hg-electrum, Hg-küstelite, potarite

(**For citation:** Spiridonov E. M., Orsoev D. A., Ariskin A. A., Nikolaev G. S., Kislov E. V., Korotaeva N. N. and Yapaskurt V. O. Hg- and Cd-Bearing Pd, Pt, Au, and Ag Minerals in Sulfide-Bearing Mafic and Ultramafic Rocks of the Yoko-Dovyren Intrusion in the Baikhalides of the Northern Baikal Area. *Geokhimiya*. 201964(1):43–58. doi: 10.31857/S0016-752564143-58)