

ГЕРМАНИЙСОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ ПАЛЛАДИЯ – ПАЛЛАДОГЕРМАНИД Pd_2Ge , Ge-ПАОЛОВИТ $Pd_2(Sn, Ge)$, ЗВЯГИНЦЕВИТ СУЛЬФИДОНОСНЫХ АНОРТОЗИТОВ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА, ПРИБАЙКАЛЬЕ

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

^а Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Геологический факультет

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 25.04.2018 г.

Принята к публикации 05.10.2018 г.

Расслоенный Йоко-Довыренский гипербазит-базитовый интрузив в придонной части включает Байкальское месторождение сульфидных Cu-Ni руд с Pt-Pd минерализацией, в более высоких частях разреза – «горизонты» и гнездовые проявления малосульфидных руд с Pt-Pd минерализацией. Максимальная концентрация Pd, Pt, Au, Ag, Hg, Cd и максимальное разнообразие минералов благородных металлов, в том числе содержащих германий, характерны для жильобразных тел сульфидоносных анортозитов и пегматоидных анортозитов вверху критического горизонта на границе толщ троктолитов и перекрывающих габбро-норитов. Подавляющая часть минералов благородных металлов – послемагматические пневматолитовые (флюидно-метасоматические) образования. Это котульскит, мончеит, звягинцевит, теларгпа-лит, паоловит и иные халькогениды и интерметаллиды Pd и Pt, в том числе палладогерманид с 19.8 мас.% Ge, паоловит с 8.1% Ge (первая находка), богатый золотом звягинцевит с 0.55% Ge. Состав палладогерманида – $Pd_{2.03}(Ge_{0.80}As_{0.15}Bi_{0.02})_{0.97}$, германий в нем в заметной степени замещен мышьяком, что характерно для эндогенных минералов германия. Состав Ge-паоловита – $Pd_{2.02}(Sn_{0.54}Ge_{0.35}Sb_{0.05}As_{0.04})_{0.98}$. Возможный источник германия – вмещающие интрузив контактово-метаморфизованные паралические пиритоносные углеродистые аргиллиты.

Ключевые слова: Йоко-Довыренский интрузив, сульфидоносные анортозиты, палладогерманид, Ge-паоловит

DOI: 10.31857/S0016-7525645554-558

ВВЕДЕНИЕ

В магматогенных месторождениях распространены сульфиды, арсениды, стибниды, висмутиды, теллуриды, станниды и плюмбиды Pt и Pd (Naldrett, 2004). Стандартный тренд благородных металлов в высокотемпературных эндогенных процессах: Ru (+ S) → Os (+ S) → Ir (+ S) → Rh (+ S, As) → Pt + Au + Ag (± S, As) → Pd + Au + Ag (+ S, As, Sb, Bi, Te, Sn, Pb) → Au + Pd + Ag (± S, As, Sb, Bi, Te, Sn, Pb) (Спиридонов, 2010). Недавно в рудах Канады обнаружены интерметаллиды – германиды палладия: палладогерманид Pd_2Ge и маратонит $Pd_{25}Ge_9$ (McDonald et al., 2017). Ранее фаза, отвечающая составу палладогерманида, была отмечена в работах (McLaren et

al., 1982; Некрасов и др., 1994; Гроховская и др., 2005; Шведов и др., 2013). Нами палладогерманид установлен в Йоко-Довыренском гипербазит-базитовом интрузиве в Южной Сибири.

ЙОКО-ДОВЫРЕНСКИЙ ИНТРУЗИВ И ЕГО ОРУДЕНЕНИЕ

Расслоенный Йоко-Довыренский гипербазит-базитовый интрузив позднерифейского возраста размещен в байкалидах северо-восточного Прибайкалья (Булгатов, 1983). Размер интрузива $26 \times 3.5 \times \sim 5$ км. Центральную, самую мощную и дифференцированную часть интрузива образуют нижний горизонт приконтактных оливи-

новых и пикритовых габбро-долеритов, толща бронзит-эндиопсид-плаггиоклазсодержащих дунитов и лерцолитов (около 1/3 разреза интрузива), толща троктолитов со шширами и жилами анортозитов (около 1/3 разреза интрузива), верхняя толща оливиновых и безоливиновых габбро-норитов и пижонитовых габбро (Конников и др., 1994; Орсоев, 2008; Арискин и др., 2009; Ariskin et al., 2018). Интрузив окружен мощным ореолом контактово-метаморфизованных терригенных, известняково-доломитовых и паралических пиритоносных углеродистых пород рифея.

В придонной части интрузива находится Байкальское месторождение сульфидных Cu-Ni руд с Pt-Pd минерализацией, а в более высоких частях разреза – линзовидные «горизонты» и гнездовые проявления малосульфидных руд с Pt-Pd минерализацией (Конников и др., 1994; Кислов и др., 1997; Орсоев и др., 2003; Арискин и др., 2009; Ariskin et al., 2016). Максимальная концентрация Pd (до 7.8 г/т), Pt (до 4.1 г/т), Au, Ag, Hg, Cd и максимальное разнообразие их минералов, в том числе содержащих германий, характерны для жилообразных тел сульфидоносных анортозитов и пегматоидных анортозитов вверху выделенного Д.А. Орсоевым критического горизонта на границе толщ троктолитов и перекрывающих габброидов (Орсоев и др., 2003; Орсоев, 2008; Ariskin et al., 2016; Спиридонов и др., 2017а; 2017б). Критический горизонт сложен переслаивающимися лейко-, мезо- и меланотроктолитами, анортозитами, плаггиоклазовыми лерцолитами, вебстеритами, оливиновыми габбро, такситовыми габбро-норитами. По данным А.В. Лавренчука (2006), критическому горизонту отвечают особые флюидный и термальный режимы, способствовавшие максимальному накоплению благородных металлов.

Сульфидоносные анортозиты, нередко пегматоидные, слагают шширы и жилы мощностью от первых см до метра и более. Зачастую они секут расслоенную серию поперек. Участки, насыщенные рудоносными анортозитами, имеют уплощенную овальную форму, их поперечник – до 15–20 м, мощность – до 3–4 м. Тонкая сульфидная вкрапленность в анортозитах тяготеет к участкам с заметным количеством темноцветных минералов. Максимальная концентрация сульфидов не превышает 7%, рядовая – <1%.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучены несколько десятков крупных шшуфов и изготовленных из их материала прозрачно-

лированных шшлифов и аншлифов сульфидоносных анортозитов и пегматоидных анортозитов, окружающих троктолитов и иных габброидов, 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), синтетических фаз InAs (As) и CdSe (Cd, Se). Получено 154 фотографии в отраженных электронах и 9 карт распределения химических элементов, что позволило прицельно провести микрозондовые анализы. Выполнено 32 анализа породообразующих силикатов, 5 – апатита, 11 – хромшпинелидов, титаномагнетита и ильменита, 77 – троилита, пирротина, кубанита, халькопирита, пентландита, талнахита, сфалерита и галенита, 83 – минералов платиновых металлов – мончеита, котульскита, звягинцевита, теларгпалита, паоловита и иных (из них три – германийсодержащие), 13 – минералов золота и серебра, 6 – алтаита.

МАГМАТИЧЕСКИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ СУЛЬФИДОНОСНЫХ АНОРТОЗИТОВ

Основной объем рудоносных анортозитов слагают призматические кристаллы бедного калием Са-битовнита, состав типичного образца Ca_{84.4}Na_{15.1}K_{0.5}. Ведущие темноцветные – мало-Ti и не содержащий Cr железистый бронзит, низко-Ti и не содержащий Cr умеренно глиноземистый эндиопсид, хризолит Fo₈₅₋₈₃ до Fo₇₉. В пегматоидных анортозитах размер кристаллов битовнита до 1 см, пойкилокристаллов эндиопсида до 12×4 см. С кумулятивным оливином ассоциирует мало-Ti ферриалюмохромит, с пироксенами – титаномагнетит, ильменит с 3–4% MnO, редкий баделеит с 1.5 мас.% HfO₂ и 2.1% Nb₂O₅. Сидеронитовые сульфиды представлены продуктами субсолидусных превращений продуктов кристаллизации Fe-Cu-Ni-S расплава. Более распространен Iss1, превращенный в срастания троилита и кубанита с включениями пентландита. Менее распространен Iss2, превращенный в решетчатые срастания халькопирит – кубанит с включениями пентландита и пирротина и продукты их перекристаллизации. Состав типично-

го троилита, мас. %: Fe 63.38, Co 0.37, Ni, Cu — нпо (ниже предела обнаружения), S 36.57, сумма 100.32; формула $Fe_{0.995}Co_{0.006}S_{0.999}$. Состав типичного кубанита, мас. %: Cu 23.03, Fe 41.13, Co 0.22, Ni 0.09, Ag нпо, S 35.48, сумма 99.95; формула $Cu_{0.984}Fe_{1.999}Co_{0.010}Ni_{0.004}S_{3.003}$. Среди продуктов распада немало мелких зерен бедного Cd сфалерита и галенита. В гнездах сульфидов наблюдаются реликты титаномагнетита (ильменит-магнетитовые агрегаты, где магнетит замещен троилитом), и новообразованный ильменит, который в отличие от аксессуарного не содержит Mn.

ПНЕВМАТОЛИТОВЫЕ (ФЛЮИДНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ) МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ СУЛЬФИДОНОСНЫХ АНОРТОЗИТОВ

В рудоносных анортозитах с сульфидами Fe-Cu ассоциирует титанистый (3–6 мас. % TiO_2) флогопит, содержащий 0.6–1 мас. % Cl, реже амфиболы — от паргасита до ферроэденита с 0.7–1.1 мас. % Cl, а также апатит, который содержит более 3 мас. % Cl и до 1% F. Состав типичного апатита — $(Ca_{4.96}Fe_{0.06}Sr_{0.01}Ce_{0.01}La_{0.01}Nd_{0.01})_{5.06}[(PO_4)_{2.88}(SiO_4)_{0.05}(SO_4)_{0.01}I_{2.94}(Cl_{0.43}OH_{0.20}F_{0.18})_{0.81}]$. Это свидетельства вероятного участия хлора в генезисе минералов благородных металлов (Кислов и др., 1997).

Большая часть минералов благородных металлов в оруденелых анортозитах ассоциирует с магматическими сульфидами, слагает в них и на их контактах разнообразной формы метасоматические вроски и метакристаллы. Аналогичные по форме и составу метакристаллы минералов благородных металлов развиты и вне сульфидов, слагают отдельные вроски и их цепочки, минигнезда в пироксенах, плагиоклазе, флогопите, амфиболах, на их контактах, нередко в сростаниях с хлорапатитом (Спиридонов и др., 2017б). Таков же характер нахождения большей части минералов благородных металлов в сульфидоносных плагиоцеролитах низов Йоко-Довыренского интрузива и в сульфидоносных пегматоидных троктолитах более высоких горизонтов (Спиридонов и др., 2017а). Таким образом, большая часть минералов благородных металлов — послемагматические пневматолитовые образования. Вероятный источник флюидов, транспортировавших Pd, Pt, Au, Ag, Te, Bi, Sn, As, Sb, Ge, — кристаллизующиеся сульфидные расплавы. Ситуация в Йоко-Довыренском интрузиве напоминает картину распределения благородных металлов в норильских рудах (Спиридонов и др., 2015).

Исследованиями Д.А. Орсоева, Е.В. Кислова, А.А. Арискина с коллегами (Орсоев и др., 2003; Орсоев, 2008; Ariskin et al., 2016) в оруденелых анортозитах установлены распространенные мончеит, тетраферроплатина и потарит, более редкие котульскит, звягинцевит, теларгпалит, инсизваит, майчнерит, паоловит, сперрилит, фрудит, мертиит, нигглиит, атоцит, соболевскит, маякит, гессит, минералы ряда золото-серебро, амальгама серебра, а также алтаит. По нашим данным, среди минералов платиновых металлов в сульфидоносных анортозитах преобладают котульскит, мончеит и звягинцевит. Показательны псевдоморфозы алтаита $PbTe$ и звягинцевита Pd_3Pb по галениту (пневматолитовый привнос Te или Pd), маякита $PdNiAs$ по пентландиту (пневматолитовый привнос Pd и As). Факты резкой изменчивости состава кристаллов мончеита (Pt, Pd) (Te, Bi, Pb, Hg)₂ и котульскита $Pd(Te, Bi, Pb, Hg, Cd)$, расположенных на расстоянии десятков микрон друг от друга, свидетельствуют о значительной изменчивости состава рудоносных флюидов.

ГЕРМАНИЙСОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ ПАЛЛАДИЯ

Среди пневматолитовых минералов сульфидоносных анортозитов Йоко-Довыренского интрузива нами установлены палладогерманид, германийсодержащий паоловит (первая находка), звягинцевит с примесью германия.

Палладогерманид Pd_2Ge обнаружен в одном из образцов сульфидоносных довыренских анортозитов в виде мелких, до 7 микрон, удлиненных неправильной формы метасоматических вросков в краевой части крупного зерна кубанита. Минерал содержит 19.8 мас. % Ge, заметные примеси As и Bi (табл., ан. 1). Формула минерала отвечает $Pd_{2.03}(Ge_{0.80}As_{0.15}Bi_{0.02})_{0.97}$. В палладогерманиде проявлено изоморфное замещение Ge—As, типичное для эндогенных минералов германия (Sclar, Geier, 1957; Спиридонов, 1987; 1994; Спиридонов и др., 1992).

Ge-паоловит $Pd_2(Sn, Ge)$ обнаружен в виде мелких, до 9 микрон, неправильной формы выделений на контакте талнахита и битовни-та. Минерал содержит 8.1 мас. % Ge, немного Sb и As (табл., ан.2). Формула Ge-паоловита — $Pd_{2.02}(Sn_{0.54}Ge_{0.35}Sb_{0.05}As_{0.04})_{0.98}$. Состав минерала близок к стехиометричному. Характер изоморфных замещений в Ge-паоловите близок к минералам группы колусита (Спиридонов и др., 1992).

Звягинцевит Pd_3Pb в сульфидоносных анортозитах обычно малопримесный. В ряде образцов звягинцевит содержит заметное количество Au,

Таблица. Химический состав палладогерманита (1), Ге-паоловита (2), звягинцевита (3) сульфидоносных пегматоидных анортозитов Йоко-Довыренского интрузива

Компо- ненты	№ анализов					
	1	2	3	1	2	3
	мас. %			Число атомов в формуле		
Pd	73.55	68.50	53.52	2.03	2.02	2.72
Au	нпо	нпо	8.13	-	-	0.21
Rh	нпо	нпо	0.91	-	-	0.05
Ni	нпо	нпо	0.14	-	-	0.01
Ge	19.78	8.10	0.55	0.80	0.35	0.04
As	3.83	1.10	нпо	0.15	0.04	-
Sn	нпо	20.40	нпо	-	0.54	-
Pb	нпо	нпо	36.84	-	-	0.97
Bi	1.22	нпо	нпо	0.02	-	-
Sb	нпо	1.90	нпо	-	0.05	-
Сумма	98.38	99.80	99.95	3	3	4

Примечания. нпо – ниже предела обнаружения. Ru, Os, Ir, Pt, Ag, Co, Cu, Zn, Cd, Te, S, Se не обнаружены.

немного Cd, Ge, Rh, Ni. Состав богатого золотом звягинцевита с примесью германия (0.55 мас.%) приведен в таблице (ан. 3). Минерал по составу стехиометричен. Формула германийсодержащего звягинцевита отвечает $(Pd_{2.72}Au_{0.21}Rh_{0.05}Ni_{0.01})_{2.99}(Pb_{0.97}Ge_{0.04})_{1.01}$.

Как известно, германий («экакремний» Д.И. Менделеева) в процессах магматической дифференциации не накапливается, – клак германия в кремнекислых породах практически такой же, как и в ультраосновных (Виноградов, 1962). Возможный источник Ge для минералов палладия в пегматоидных анортозитах Йоко-Довыренского интрузива – вмещающие интрузив контактово-метаморфизованные параличские пиритоносные углеродистые аргиллиты, исходные породы которых нередко содержат Ge-органические соединения (Юдович, Кетрис, 2016).

С учетом данных по рудоносным магматическим породам Йоко-Довыренского интрузива тренд благородных металлов в высокотемпературных эндогенных процессах может быть несколько пополнен: Ru (+ S) → Os (+ S) → Ir (+ S) → Rh (+ S) → Pt + Au + Ag (± S, As) → Pd + Au + Ag (+ S, As, Sb, Bi, Te, Sn, Pb, Ge, Cd, Hg).

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (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., Конников Э.Г., Данюшевский Л.В., Кислов Е.В., Николаев Г.С., Орсоев Д.А., Бармина Г.С., Бычков К.А. (2009) Довыренский интрузивный комплекс: проблемы петрологии и сульфидно-никелевой минерализации. *Геохимия* (5), 451–480.
- Ariskin A.A., Konnikov E.G., Danyushevsky L.V., Kislov E.V., Nikolaev G.S., Orsoev D.A., Barmina G.S., Bychkov K.A. (2009) The Dovyren Intrusive Complex: Problems of Petrology and Ni Sulfide Mineralization. *Geochem. Int.* 47(5), 425–453.
- Булгатов А.Н. (1983) Тектонотип байкалит. Новосибирск: Наука, 192 с.
- Виноградов А.П. (1962) Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. *Геохимия* (7), 1217–1223.
- Гроховская Т.Л., Лапина М.И., Ганин В.А. (2005) Проявления ЭПГ-минерализации в Бураковском расслоенном комплексе (Южная Карелия, Россия) *Геология рудных месторождений*, 47(4), 315–341.
- Кислов Е.В., Конников Э.Г., Орсоев Д.А. (1997) Роль хлора в формировании малосульфидного платинометального 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 pluton и связанное с ним оруденение (Северное Прибайкалье). *Геология рудных месторождений*, 36(6), 545–553.
- Лавренчук А.В. (2006) Кумуляционно-компакиционная модель формирования расслоенных интрузивов на примере Йоко-Довыренского массива. // Актуальные проблемы рудообразования и металлогении. Новосибирск: ГЕО, 132–133.
- Некрасов И.Я., Ленников А.М., Октябрьский Р.А., Залищак Б.Л., Сапин В.И. (1994) Петрология и платиноносность кольцевых щелочно-ультраосновных комплексов. М.: Наука. 321 с.
- Орсоев Д.А. (2008) Йоко-Довыренский дунит-троктолит-габбровый массив и его платиноносность // Благоприятная 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) Благородно металльная минерализация малосульфидного оруденения в Йоко-Довыренском расслоенном массиве. *ДАН* 390(2), 233–237.
- Спиридонов Э.М. (1987) О составе германита. *ДАН СССР* 295, 477–481.
- Спиридонов Э.М. (1994) Новые сульфидные минеральные фазы Ge-Mo-W колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб (Намибия). *Геология рудных месторождений* 36(4), 370–376.
- Спиридонов Э.М. (2010) Рудно-магматические системы Норильского рудного поля. *Геология и геофизика* 51(9), 1356–1378.
- Спиридонов Э.М., Арискин А.А., Кислов Е.В., Орсоев Д.А., Коротаева 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., Качаловская В.М., Ковачев В.В. (1992) Германоколусит $Cu_{26}V_2(Ge, As)_6S_{32}$ – новый минерал. *Вестник МГУ, Серия 4 Геология*, (6), 50–54.

Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А., Куликова И.М., Середина 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., Орсов Д.А., Кислов Е.В., Аришкин А.А., Япашкурт В.О. (2017) Палладогерманид Pd_2Ge , нильсенит $PdCu$, и ассоциирующие минералы сульфидноносных 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, ISBN 978-5-88918-049-4.

Шведов Г.И., Стехин А.И., Тарасов А.В. (2013) Новая находка германида палладия (Pd_2Ge) // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения). Сыктывкар, 157–159.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2016) Германий в углях. М.-Берлин: Директ-Медиа, 189 с.

Ariskin A., Danyushevsky L., Nikolaev G., Kislov E., Fiorentini M., McNeill, Kostitsyn Yu., Goemann K., Feig S., Malyshev A. (2018) The Dovyren Intrusive Complex (Southern Siberia, Russia): Insights into dynamics of an open magma chamber with implications for parental magma origin, composition, and Cu-Ni-PGE fertility. *Lithos* 302–303, 242–262.

McDonald A.M., Zhe W., Ames D.E., Ross K.C., Kjarsgaard I.M., Good D.J. (2017) Palladogermanide Pd_2Ge . *Eur. J. Mineral.* 29, 149–152.

McLaren C.H., De Villiers J.P.R. (1982) The platinum-group chemistry and mineralogy of the UG-2 chromitite layer of the Bushveld Complex. *Econ. Geol.* 77, 1348–1366.

Naldrett A.J. (2004) Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and exploration. Springer: Berlin – Heidelberg – N.Y., 727 p.

Sclar C.B., Geier B.H. (1957) The paragenetic relationships of germanite and renierite from Tsumeb, South West Africa. *Econ. Geol.* 52, 612–631.

GERMANIUM-RICH PALLADIUM MINERALS – PALLADOGERMANIDE Pd_2Ge , PAOLOVITE $Pd_2(Sn, Ge)$, ZVYAGINTSEVITE IN SULFIDE-BEARING ANORTHOSITES OF THE YOKO-DOVYREN PLUTON, BAIKAL REGION

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

^aLomonosov Moscow State University, Vorobiovy Gory 1, 119234 Moscow, Russia

^bInstitute of Geology SB RAS, Sah'yanova Str. 6a, 670047 Ulan-Ude, Russia

^cVernadsky Institute, Kosygin Str. 19, 119991 Moscow, Russia

*e-mail: ernstspiridon@gmail.com

Received: 30.03.2018

Received version received: 25.04.2018

Accepted: 05.10.2018

The bottom part of the Yoko-Dovyren layered mafic–ultramafic intrusion hosts the Baikalskoe deposit of Cu–Ni sulfide ores with Pt–Pd mineralization, and the stratigraphically higher portion of the intrusion includes units and pockets with low-sulfide ore with Pt–Pd mineralization. The maximum Pd, Pt, Au, Ag, Hg, and Cd concentrations and the greatest number of noble-metal minerals, including those containing Ge, are typical of vein-shaped sulfide-bearing anorthosite bodies and pegmatoid anorthosites in the upper part of the Critical Unit, at the boundary between the troctolite unit and overlying gabbro-norite. The noble-metal minerals were produced mostly by postmagmatic pneumatolytic (fluid–metasomatic) processes. These minerals are kotulskite, moncheite, zvyagintsevite, telargpalite, paolovite, and other Pd and Pt chalcogenides and intermetallic compounds, including palladogermanide that contains 19.8 wt % Ge (the first find in Russia), paolovite with 8.1 wt % Ge (first find), and Au-rich zvyagintsevite that bears 0.55 wt % Ge. The palladogermanide has the composition $Pd_{2.03}(Ge_{0.80}As_{0.15}Bi_{0.02})_{0.972}$ and much of its Ge is substituted for As, as is typical of endogenous Ge minerals. The composition of the Ge-paolovite is $Pd_{2.02}(Sn_{0.54}Ge_{0.35}Sb_{0.05}As_{0.04})_{0.98}$. The possible source of the germanium is contact-metasomatic pyrite-bearing paralic carbonaceous shales hosting the intrusion.

Keywords: Yoko-Dovyren intrusion, sulfide-bearing anorthosite, palladogermanide, Ge-paolovite

(For citation): Spiridonov E.M., Orsoev D.A., Ariskin A.A., Kislov E.V., Korotaeva N.N., Nikolaev G.S., Yapaskurt V.O. Germanium-Rich Palladium Minerals – Palladogermanide Pd_2Ge , Paolovite $Pd_2(Sn, Ge)$, Zvyagintsevite in Sulfide-Bearing Anorthosites of the Yoko-Dovyren Pluton, Baikal Region. *Geokhimiya*. 2019;64(5):554–558. DOI: 10.31857/S0016-7525645554-558