

В. В. Мурзин, С. Г. Суставов

**ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ  
ВЕРХ-НЕЙВИНСКОГО МАССИВА АЛЬПИНОТИПНЫХ  
ГИПЕРБАЗИТОВ: МИНЕРАЛЫ РЯДА ЛАУРИТ-  
ЭРЛИКМАНИТ И ИХ МЫШЬЯКОВИСТЫЕ  
РАЗНОВИДНОСТИ**

V. V. Murzin, S. G. Sustavov

**MINERAL PARAGENESES OF PLATINUM GROUP OF THE VERKH-  
NEIVINSKII ALPINOTYPE ULTRAMAFITE MASSIF: MINERALS OF  
THE LAURITE-ERLICHMANITE ROW AND THEIR ARSENIOS  
VARIETIES**

In placers of the Verkh-Neivinskii alpinotype ultramafite massif (Middle Ural) three mineral generations of laurite-erlichmanite, presented by the primary and two secondary parageneses of platinum group minerals have been studied. Crystals of laurite-1 by the chemical composition have 9.7—31.9 % Os, 5.5—13.5 % Ir and correspond the most usual compositions in chromites. Laurite-erlichmanite-2 forms coatings on the native grains of Os, Ir, Ru. It has up to 17.2 % As and up to 34.1 % Ir for correlation Me: (As+S)=1: 2. Laurite-3 is distinguished by its purity (usually not more than 2—3 % admixture components). It's supposed that arsenious laurite-erlichmanite have been formed as the result of metamorphic processes in relation to the influence of later gabbroid intrusions on ultramafites.

В большинстве опубликованных работ фазы ряда лаурит ( $\text{RuS}_2$ ) — эрликманит ( $\text{OsS}_2$ ) как в альпинотипных, так и стратиформных и зональных гипербазитовых комплексах относится к первичному парагенезису, образовавшемуся при кристаллизации хромитов. В пользу этого положения, кроме минераграфических наблюдений, свидетельствует зависимость химических составов лаурита и ассоциирующего с ними хромшпинеллида [1]. В ряде других работ эти минералы отнесены к вторичному парагенезису, образовавшемуся на постмагматическом или метаморфическом этапах [3, 4, 12]. Наконец, имеются данные о двух генерациях лаурита — первичном магматическом и вторичном метаморфическом [18] или даже обоих метаморфических, образовавшихся

на этапах аутометаморфической серпентинизации и прогрессивного контактового метаморфизма [10].

В данной работе на основании исследования платиноидов из россыпей ближнего сноса Верх-Нейвинского массива альпинотипных гипербазитов (Средний Урал) установлено сквозное развитие лаурита в процессе образования и преобразования вещества хромититов и присутствие по-меньшей мере трех его генераций, резко различающихся по химическому составу. Впервые установлены высокоиридные и мышьяковистые лаурит-эрликманиты, а также показана метаморфогенная природа последних. Исследование базируется на 71 микрорентгеноспектральном анализе минералов ряда лаурит-эрликманит, ирарсита и твердых растворов Ru, Os и Ir, выполненных на микроанализаторах JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитик В. А. Вилисов).

Верх-Нейвинский массив альпинотипных гипербазитов сложен интенсивно серпентинизированными гарцбургитами в центральных частях и аподунитовыми серпентинитами ( $O_2-S_1$ ) — в периферических. С последними ассоциируют многочисленные небольшие месторождения хромита. Контакты массива с вмещающими вулканогенно-осадочными породами тектонические. Вдоль всего восточного и, в меньшей степени, северного и южного контактов массива развиты интрузии габбро, габбро-пироксенитов, относящихся к трондземит-плагиогранит-габбровой формации ( $S_2-D_2$ ). На стыке дунитов и гарцбургитов с габбро фиксируются пироксениты. В последнее время [6] платиноидное оруденение массива отнесено к самостоятельному верхнейвинскому типу, характеризующему дунит-гарцбургитовые разрезы периферических зон перехода к краевому полосчатому комплексу. По геохимической специализации оно является платино-рутений-иридиево-осмиевым. По всей площади массива развиты комплексные (золото, МПП, местами демантоид) аллювиальные ( $Q_{IV}$ ) и делювиально-пролювиальные ( $N_1-N_2$ ) россыпи. Россыпи с повышенными содержаниями МПП тяготеют к скоплениям хромитовых проявлений.

Среди минералов платиновой группы выделены первичные и вторичные осмий-иридий-рутениевые и платиновые парагенезисы. Первичные парагенезисы сложены самородными минералами системы Os-Ir-Ru (осмий, иридий, рутений, рутениридосмин), лауритом  $RuS_2$ , эрликманитом  $OsS_2$  во всех россыпях массива, а также изоферроплатиной  $Pt_3Fe$  и тетраферроплатиной  $PtFe$  — в россыпях южной части массива. Размерность частиц этих минералов в россыпях (до 5—6 мм) значительно превышает та-

ковую в хромититах альпинотипных комплексов, однако составы хромшпинеллидов в сростках с осмий-иридий-рутениевыми фазами свидетельствуют в пользу такой связи.

Вторичный осмий-иридий-рутениевый парагенезис развивается как по первичным минералам (коррозионный парагенезис), так и отлагается на их поверхности (наложенный парагенезис). Зерна первичных осмиридов корродируются агрегатами осмий-иридий-рутениевых сульфоарсенидов, химический состав которых варьирует от  $(Os, Ir, Ru)AsS$  до  $(Os, Ir, Ru)(As_{0-0.59}, S_{1.41-2})$  в виде пленок и оболочек черного цвета мощностью от первых мкм до 0.5 мм (рис. 1). Такие оболочки на осмиридах развиты в россыпях по всей площади массива, однако наибольшее их количество отмечается в восточной и южной его частях. Наложенный вторичный осмий-иридий-рутениевый парагенезис развит исключительно в южной части массива и представлен безосмысленным лауритом (иногда с мелкими включениями в нем осмия), толоником  $IrSbS$ , кашинитом  $(Ir, Rh)_2S_3$ , купроиридситом  $CuIr_2S_4$ , сульфидными фазами ряда  $(Ir, Cu, Fe, Ni) - S$ . Эти минералы образуют первичные самородные осмириды, в том числе и сульфоарсенидные пленки.

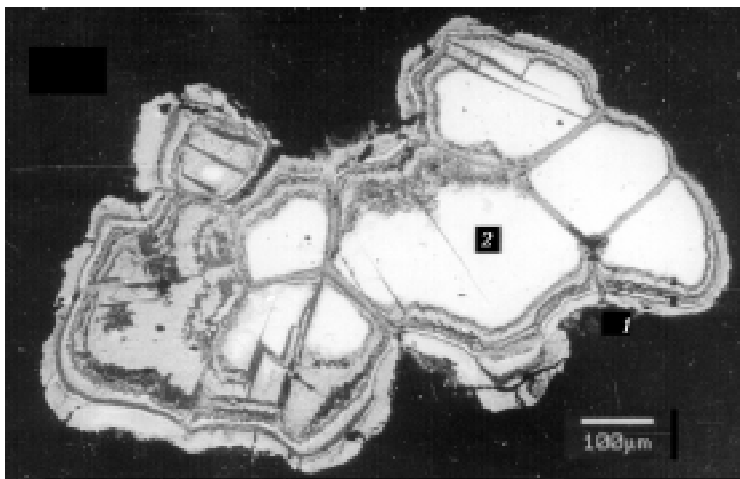


Рис. 1. Зональная коррозионная кайма мышьяковистого лаурит-эрликманита второй генерации (1) на выделении самородного твердого раствора  $Ru, Os$  и  $Ir$  (2).

Снимок на рентгеноспектральном микроанализаторе AMRAY (США) в режиме отраженных электронов

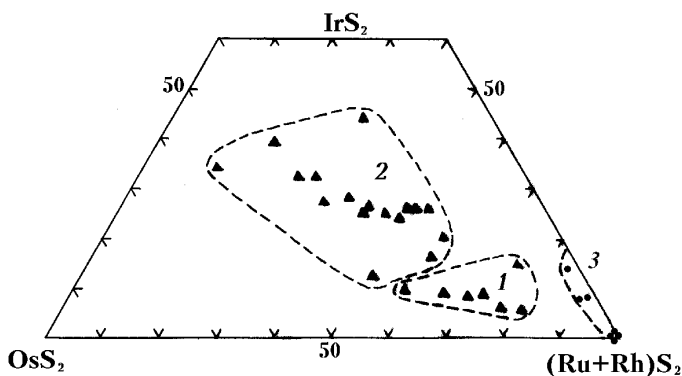


Рис. 2. Химический состав минералов ряда лаурит-эрликманит первой (поле 1), второй (поле 2) и третьей (поле 3) генераций Верх-Нейвинского массива.

Вторичный платиновый парагенезис представлен тулами-нитом  $Pt_2FeCu$ , ферроникельплатиной  $Pt_2FeNi$ , сурьмянистым хонгшитом  $Pt(Cu,Sb)$  [13], сульфидами меди и никеля (дигенит, пентландит, полидимит, хизлевудит), иридий-родиевым сульфоарсенидом. Сульфиды и сульфоарсениды присутствуют в виде кристаллических и интерстициальных включений в туламините. Видимо к этому парагенезису, развитому, как и первичный в россыпях южной части массива, принадлежат и золото-свинцовые минералы — хуньчуньит  $Au_2Pb$  и анюйит  $AuPb_2$  [11].

Лаурит и эрликманит первой генерации представлены хорошо ограниченными кристаллами размерами до 1.5 мм, обычно менее 0.2 мм. Отнесение к наиболее ранней генерации обосновывается их сростаниями с кристаллами самородных Os-Ru-Ir твердых растворов, а также обнаружением в первичном парагенезисе в хромитовых рудах [5]. По химическому составу (рис. 2) они занимают промежуточное положение в ряду лаурит-эрликманит, содержат 9.7—31.9 % Os (0.09—0.34 ф. е.) и 5.5—13.5 % Ir (0.05—0.12 ф. е.) и соответствуют наиболее обычным составам в хромитах [15]. Из других примесей в них в существенных количествах присутствуют Rh — до 3 % (0.05 ф. е.) и Pd — до 1.5 % (0.03 ф. е.).

Лаурит-эрликманиты (до 0.56 ф. е. Os) второй генерации входят в состав вторичного коррозионного парагенезиса, где они вместе с ирарситом образуют зональные оболочки и пленки черного цвета на зернах первичных самородных Os-Ir-Ru фаз, замещающая их. Соотношения Os, Ir и Ru в них наследуются от таковых в самородных фазах, что подчеркивает коррозионную природу

оболочек (рис. 3). Микроанализом лауритов второй генерации установлены широкие вариации содержаний в них серы и мышьяка (до 17.2 мас. % или 0.55 ф. е. As) при сохранении стехиометрических соотношений металл: (S+As) = 1: 2. При этом в намечающемся ряду (Ru,Os,Ir)S<sub>2</sub>–(Ru,Os,Ir)AsS существует разрыв смесимости в диапазоне 0.55—0.85 ф. е. As или, соответственно, 0.45—0.15 ф. е. S. Увеличение степени мышьяковистости фаз сопровождается повышением содержаний в них иридия до 34.1 % (0.43 ф. е.) (рис. 4). Эти концентрации иридия значительно превышают ранее приводимые для лауритов — не более 15.8 мас. % (0.2 ф. е.) [16].

По данным рентгеновского исследования (РКД-57.3 мм, FeK<sub>α+β</sub>-излучение) лаурит-эрликманитов первой генерации, содержащих 6—9 мас. % Ir, параметры кубической решетки составили: a<sub>0</sub> = 0.5616 — 0.5621 ± 0.00005 нм, что лишь немного превышает параметры синтетических крайних членов изоморфного ряда RuS<sub>2</sub>–OsS<sub>2</sub>: a<sub>0</sub> = 0.56095 — 0.56196 нм (ASTM 19-1107 и 19-882). Мышьяковистые и иридитые (0.32—0.55 ф. е. As и 0.24—0.31 ф. е. Ir) лаурит-эрликманиты второй генерации имеют значения a<sub>0</sub> значительно более высокие — 0.5631— 0.5633 ± 0.00003 нм. «Разрыхление» структуры лаурита и эрликманита за счет вхождения мышьяка стимулирует, таким образом, вхождение в них иридия. В соответствии с этим положением мышьяковистые эрликманиты Гулинской интрузии содержат иридий в количествах, превышающих обычный уровень его в этом минерале (см. рис. 3, поля 4, 5). В целом, иридитые лаурит-эрликманиты, в которых до половины атомов серы замещены мышьяком, могут рассматриваться как фазы со структурой пирита с неупорядоченным распределением атомов As и S и широким изоморфизмом в катионной части [9]. Общая формула их (Ru,Os,Ir)(S,As)<sub>2</sub>.

Совместно с лаурит-эрликманитами второй генерации в зональных каймах на самородных Os-Ir-Ru твердых растворах иногда присутствуют сульфоарсенидные фазы с соотношениями мышьяка и серы близкими к 1 (As: S = 0.85—1.08) (рис. 4). По химическому составу и структуре дифракционного спектра они отвечают ирарситу, содержащему Os (до 0.42 ф. е.) и Ru (до 0.30 ф. е.). Их параметры кристаллической решетки a<sub>0</sub>, составившие 0.5678—0.5768 нм, сильно увеличены по отношению к мышьяковым лаурит-эрликманитам и приближаются к значениям, приводимым для Ru-Pt-Rh-содержащего ирарсита a<sub>0</sub> = 0.5777 нм [7]. Эти фазы обладают структурой кобальтина с упорядоченным распределением атомов As и S [9] и общей формулой (Ir, Os, Ru)AsS.

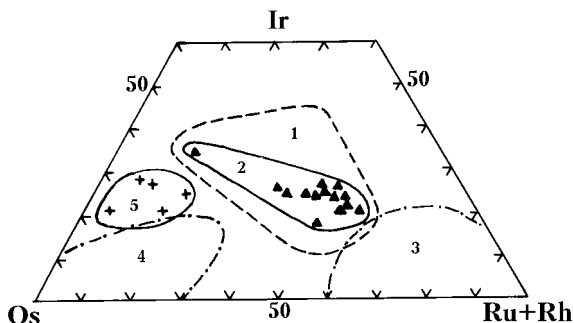


Рис. 3. Унаследованность соотношений Os, Ir и Ru в мышьяковых лаурит-эрликманитах коррозионного вторичного парагенезиса (поле 1) от состава самородных осмиридов (поле 2) Верх-Нейвинского массива и химический состав (ат. %) наиболее часто встречаемых в месторождениях мира лауритов (поле 3) и эрликманитов (поле 4) по [16].

Поле 5 — мышьяковистые эрликманиты Гулинской интрузии [14]

Лаурит третьей генерации (не более 0.03 ф. е. Os) входит в состав вторичного наложенного парагенезиса МПГ. Его кристаллы размерами менее 0.1 мм вместе с другими минералами наложенного парагенезиса обрастают зерна первичных осмиридов, в том числе и коррозионные пленки с лауритом второй генерации. Химический состав лаурита третьей генерации отличается своей чистотой. Лишь в единичных кристаллах его фиксируются примеси Ir и Rh в количествах, соответственно, до 8.5 и 4.7 %.

Сведения, касающиеся типоморфной значимости примеси мышьяка в лауритах и эрликманитах, ограничены. Мышьяк фиксируется в этих минералах в составе как первичных, так и вторичных парагенезисов МПГ достаточно часто, однако в количествах менее 2 %, очень редко до 6—8 % [2, 14, 17]. На примере уральских месторождений есть указания на то, что по мышьяко-

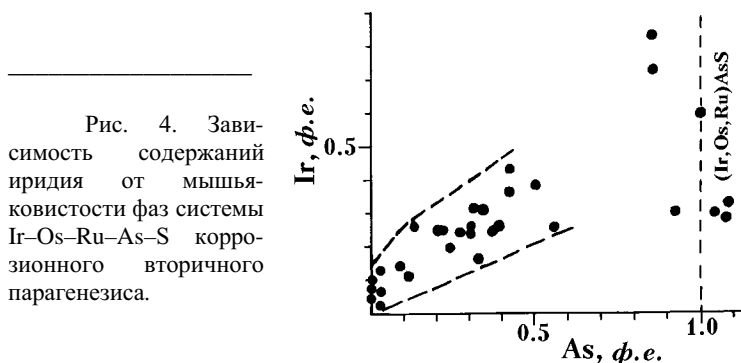


Рис. 4. Зависимость содержаний иридия от мышьяковистости фаз системы Ir–Os–Ru–As–S коррозионного вторичного парагенезиса.

вистые лауристы стратиформных и альпинотипных комплексов отличны от не содержащих мышьяк лауристов зональных комплексов [4]. Однако такие соотношения выдерживаются не всегда [2, 14]. Зональные сульфидно-мышьяковые каймы на частицах самородных фаз Os-Ir-Ru из россыпей описывались в [8, 15, 19] и трактовались как результат воздействия на первичные МПГ гранитоидных гидротерм [15] или гипергенных условий [19].

Оболочки лаурит-иранситового состава максимально развиты в восточной и особенно южной частях Верх-Нейвинского массива — в зонах воздействия на гипербазиты более молодых интрузий габброидов, что дает основание предполагать их возникновение за счет метаморфических процессов в связи с этим воздействием. Подтверждением этого положения является образование коррозионных оболочек ассоциацией минералов с арсенидами, сульфоарсенидами и сульфостибнидами ЭПГ, вторичный парагенезис которых признается большинством исследователей. Эти явления развиты только в южной части массива и предположительно связаны с гидротермальным метасоматозом завершающей стадии метаморфизма в наиболее проницаемых для растворов участках руд.

## Литература

1. Аникина Е. В., Молошаг В. П., Алимов В. Ю., Кононкова Н. Н. Типохимизм лаурита из альпинотипных гипербазитов Полярного Урала // Докл. АН. 1995. Т. 334. № 6. С. 789—790.
2. Бегизов Е. Д., Завьялов Е. Н., Хвостова В. П. Минералы ряда эрликманит-лаурит и холлингвортит-ирансит из уральских россыпей // Записки ВМО. 1976. Вып. 2. С. 213—218.
3. Волченко Ю. А., Шилова Т. А., Вилисов В. А. Лауристы стратиформного хромитоносного комплекса на западном склоне Урала // Ежегодник-1983 / Институт геологии и геохимии. Свердловск: УрО АН СССР. 1984. С. 95—97.
4. Волченко Ю. А., Вигоров Б. Л. Первая находка аксессуарных минералов платиновых металлов в хромитах Кемпирская // Ежегодник-1986 / Институт геологии и геохимии. Свердловск: УрО АН СССР. 1987. С. 70—71.
5. Волченко Ю. А., Неустроева И. И., Наумова Н. Г., Воронина Л. К. Платиноиды в хромитоносных разрезах альпинотипных комплексов Урала // Материалы к минералогии Урала. Свердловск: УрО АН СССР. 1990. С. 106—112.
6. Волченко Ю. А., Коротеев В. А., Чащухин И. С. Распределение платиновых металлов в альпинотипных комплексах Урала и эволюция процессов хромит-платинового рудообразования // Магматизм, мета-

морфизм и глубинное строение Урала: Тезисы докл. 6 Уральского петрограф. сов. Екатеринбург: УрО РАН. 1997. С. 77—78.

7. Генкин А. Д., Журавлев Н. Н., Тронева Н. В., Муравьева И. Б. Ирарсит — новый сульфоарсенид иридия, родия, рутения и платины // Записки ВМО. 1966. Вып. 6. С. 700—712.

8. Дмитренко Г. Г., Паланджян С. А., Мочалов А. Г. Минералы элементов платиновой группы в перцолитовом массиве Тамватней, Корякское нагорье // Доклады АН СССР. 1990. Т. 314. № 3. С. 702—705.

9. Евстигнеева Т. Л. Платиновые минералы — природные твердые растворы // Упорядочение и распад твердых растворов в минералах. Москва, 1980. С. 167—176.

10. Макеев А. Б. Перспективы платиноносности республики Коми. Сыктывкар: Коми НЦ РАН. 1996. 36 с.

11. Мурзин В. В., Бушмакин А. Ф., Сустанов С. Г. Хуньчуньит  $Au_2Pb$  из россыпи р. Восточный Шишим (Средний Урал) // Уральский минералогический сборник № 6. Миасс: ИМин УрО РАН. 1996. С. 96—103.

12. Некрасов И. Я., Иванов В. В., Ленников А. М. и др. Новые данные о сульфидах и сульфоарсенидах платиноидов щелочно-ультраосновных массивов Дальнего Востока // Докл. АН. 1995. Т. 341. № 4. С. 520—523.

13. Пеков И. В., Кононкова Н. Н. Сурьмянистый хонгшит с Урала // Минералогия Урала. Т. 2 / Материалы 3 регион. совещ. Миасс: ИМин УрО РАН. 1998. С. 61—62.

14. Сазонов А. М., Романовский А. Э., Гринев О. М. и др. Благороднометальная минерализация Гулинской интрузии (Сибирская платформа) // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 9. С. 51—65.

15. Щека С. А., Вржосек А. А., Сатин В. И., Кирюхина Н. И. Преобразования минералов платиновой группы из россыпей Приморья // Минер. журнал. 1991. Т. 13. № 1. С. 31—40.

16. Юшко-Захарова О. Е., Иванов В. В., Соболева Л. Н. и др. Минералы благородных металлов: Справочник. М.: Недра, 1986. 272 с.

17. Nilson L. P. Platinum-group mineral inclusions in chromitite from the Osthhammeren ultramafic tectonite body, South Central Norway // Miner. and Petrology. 1990. V. 42. № 1—4. P. 249—263.

18. Prichard H. M., Jxer R. A., Lord R. A. et al. Assemblages of platinum-group minerals and sulfides in silicate lithologies and chromite-rich rocks within the Shetland ophiolite // Can. Miner. 1994. V. 32. Pt. 2. P. 271—294.

19. Stumpfl E. F., Tarkian M. Platinum genesis: New mineralogical evidence // Econ. Geol. 1976. V. 71. Pt 7. P. 1451—1460.