

## ПЛАТИНОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ МАССИВОВ КОНДЕР И ИНАГЛИ

Н.Д. Толстых

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

Обоснована генетическая модель образования платиновой минерализации в массивах Кондер и Инагли. Установлено, что рудоформирующая система на этих массивах эволюционировала с увеличением Ir и Pt от изоферроплатино-осмиевого к изоферроплатино-иридиевому магматическим парагенезисам. Присутствие серы в системе приводило к образованию лаурита и эрликманита ( $\text{RuS}_2$ ,  $\text{OsS}_2$ ) в равновесии с магматическими парагенезисами. Последовательное увеличение активности серы в рудоформирующих системах обоих массивов и увеличение активности мышьяка на Инагли привели к образованию сульфидов и сульфохлоридов Ir и Rh: кашинита  $(\text{Ir,Rh})_2\text{S}_3$ , ирарсита  $(\text{Ir,Rh})\text{AsS}$ , ЭПГ-тиошпинелей  $(\text{Ir,Rh})_2(\text{Cu,Fe})\text{S}_4$ , а также куперита и сперрилита ( $\text{PtS}$ ,  $\text{PtAs}_2$ ) на постмагматической стадии. Выявлено, что наиболее перспективными участками поисков коренной платиновой минерализации являются контактовые зоны дунитов и клинопироксенитов, что может быть использовано в прогнозных поисках.

**Ключевые слова:** Алданский щит, Урало-Аляскинские интрузии, платиновая минерализация.

### Введение

Щелочно-ультраосновные россыпеобразующие массивы в пределах архейского складчатого пояса на юге Алданского щита (Инагли, Кондер) являются не только источником рассыпной платины, но и в недалеком будущем могут представлять собой нетрадиционный источник коренной платины, неравномерно распространенной в дунитах. Массивы Кондер и Инагли находятся на юге Алданского щита и прорывают осадочно-метаморфогенные образования чехла Сибирской платформы. Эти массивы представляют собой концентрически-зональные тела (рис. 1, а, б) и по минералого-геохимическим особенностям платиновой минерализации сопоставляются с зональными массивами Уральско-Сибирского платиноносного комплекса, отличаясь от них присутствием в ассоциации щелочных пород, в связи с чем они отнесены к щелочно-ультраосновному комплексу [Некрасов и др., 1994]. В плане массивы представляют собой изометричные ядра дунитов, окаймленные со всех сторон выходами клинопироксенитов и щелочных пород (рис. 1). Все разновидности дунитов (мелко-, крупнозернистые, порфировидные и др.) обоих массивов содержат акцессорную вкрапленность хромшпинелидов, в локальных участках переходящую в густовкрапленные шлировые выделения, гнезда и прожилки, именуемые хромтититами. Оливин Инаглинского массива представлен форстеритом, а клинопироксен – диопсидом или хромдиопсидом, образующим скопления и желваки [Округин, 2001]. На Кондерском массиве отмечается зональность пород с увеличением железистости оливина от мелкозернистых дунитов к пегматоидным разностям [Некрасов и др., 1994]. Многие исследования посвящены

различным аспектам генезиса этих массивов [Рожков и др., 1962; Богомолов, 1968; Андреев, 1987; Приходько, Понамарев, 1990; Некрасов, 1991; Лазаренков, Малич, 1991; Пушкарев и др., 2015], в том числе их платиноносности [Разин, 1966, 1968; Рудашевский и др., 1984, 1985; Лихачев и др., 1987; Мочалов и др., 1988; Малич, 1990; Округин, 2004; Толстых, Кривенко, 1997]. Тем не менее особенности распределения коренной платиноносности позволяют получить новые данные в рамках имеющихся моделей рудообразования [Некрасов и др., 1994; Округин, 2001; Tolstykh et al., 2002]. Для этого нами исследовались минеральные ассоциации и микропарагенезисы, включающие минералы элементов платиновой группы (МПГ) из дунитов, клинопироксенитов, хромититов Кондерского массива, а также из шлихов, размывающих дунитовое ядро с хромитовыми шлирами Инаглинского массива.

### Методы исследования

Во время полевой экскурсии на Кондерский массив нами были отобраны крупнообъемные (2,4–25 кг) пробы пород, руд, делювиальных отложений, шлихов аллювия и хвостов отработки прошлых лет (табл. 1). Пробы были издроблены и протоочки промыты в лотках в пределах месторождения, а тяжелые фракции значительно обогащались в лабораторных условиях с помощью тяжелой жидкости (бромформа) до концентратов, которые содержали зерна МПГ и их сростания с хромшпинелидами. Анализы МПГ проводились на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Ltd.) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Ltd.) в центре аналитических исследований Института геологии и минера-

логии СО РАН, г. Новосибирск. Условия анализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 1,6 нА – MIRA, время набора спектра – 20 с, размер области генерации рентгеновского излучения – 5 мкм. Анализ в таблицах приведены с учетом пределов обнаружений элементов.

### Платиновая минерализация массива Кондер

Исследование показало, что только в некоторых пробах дунитов выявлены единичные зерна МПГ (табл. 1), тогда как дуниты и клинопироксениты вблизи их контакта (точки отбора 3-2 и 3-1 на рис. 1) содержат повышенное количество минералов ЭПГ. Но наиболее платиноносными являются хромитовые шпиры: из 5 кг пробы хромитовой руды выделено 3,05 г платины (Музей ИГМ СО РАН).

Pt-Fe сплавы являются главными минералами коренных пород (дунитов и хромититов) и шлиховых ореолов, как и во всех массивах Урало-Аляскинского типа [Генкин, 1997; Slansky et al., 1991; Пушкарев и др., 2007; Tolstykh et al., 2002; Сидоров и др., 2012 и др.]. Они представлены кристаллами кубического габитуса и ксеноморфными зернами, как в дунитах, так и в хромититах (рис. 2, 3), в сростании с оливином (рис. 3, в, г) и хромшпинелидами (рис. 3, з). В пегматоидных дунитах обнаруже-

ны крупные зерна платины (350–600 мкм), тогда как в мелкозернистых дунитах зерна платины имеют размеры 20–120 мкм.

На Кондерском массиве магматические парагенезисы (изоферроплатино-осмиевый и изоферроплатино-иридиевый) [Tolstykh et al., 2015] встречаются не столь часто, как на других массивах Урало-Аляскинского типа, хотя они отмечались и ранее [Некрасов и др., 1994]. Нами был обнаружен первый из них, он представлен включениями осмия в матрице Pt-Fe сплавов (рис. 3, в, г).

До 40% зерен МПГ в дунитах и хромитовых рудах имеют губчатую структуру. Как оказалось при исследовании на сканирующем электронном микроскопе, пористая и губчатая структура относится только ко вторичным Pt-Fe-Cu сплавам, тогда как остальные МПГ, в том числе изоферроплатина (железистая платина), а также широко распространенный в ассоциации куперит, являются гомогенными (рис. 2, 3). Тетраферроплатина и туламинит являются широко распространенными минералами как в дунитах и клинопироксенитах, так и в хромитовых рудах. Они редко образуют тонкие каймы по изоферроплатине, как это характерно для других МПГ ассоциаций Урало-Аляскинского типа. Их характерной особенностью является распространение полных псевдоморфоз по первичным Pt-Fe сплавам.

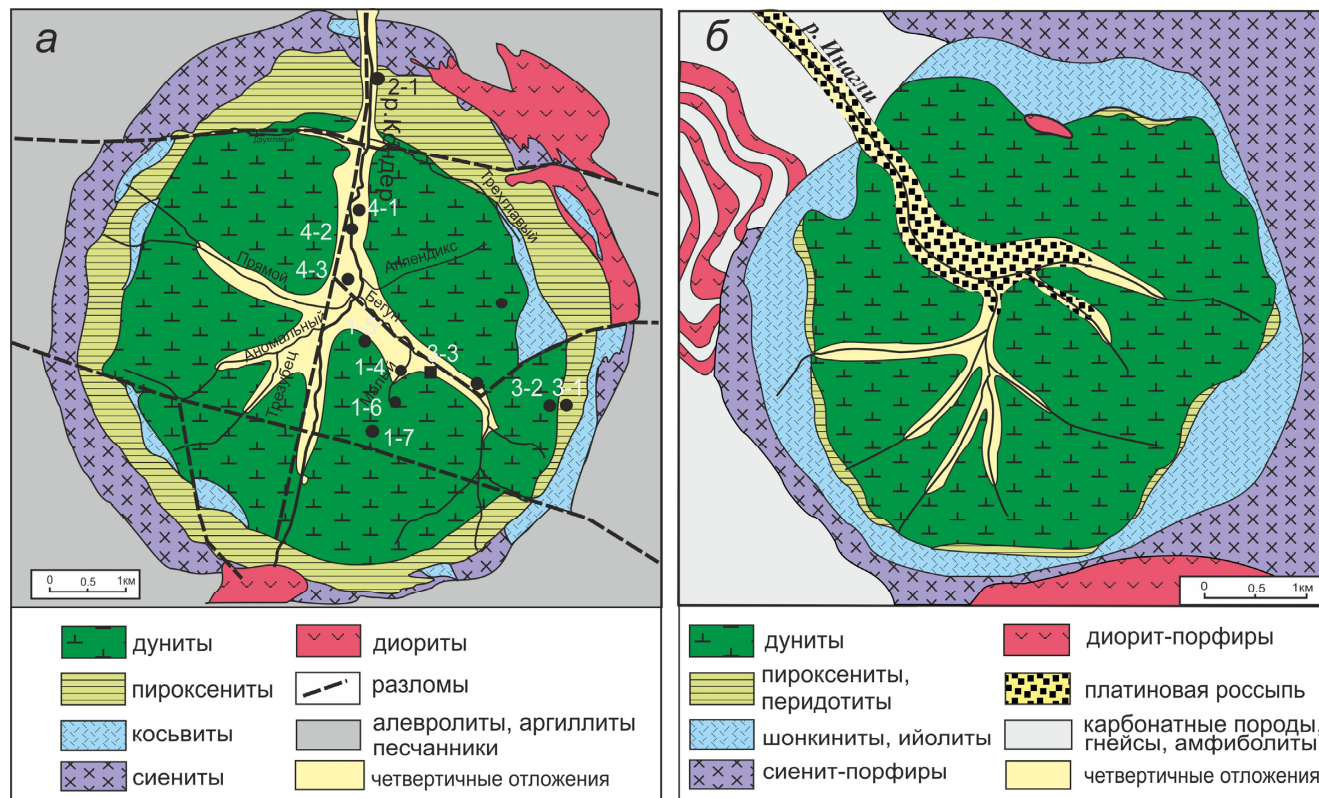
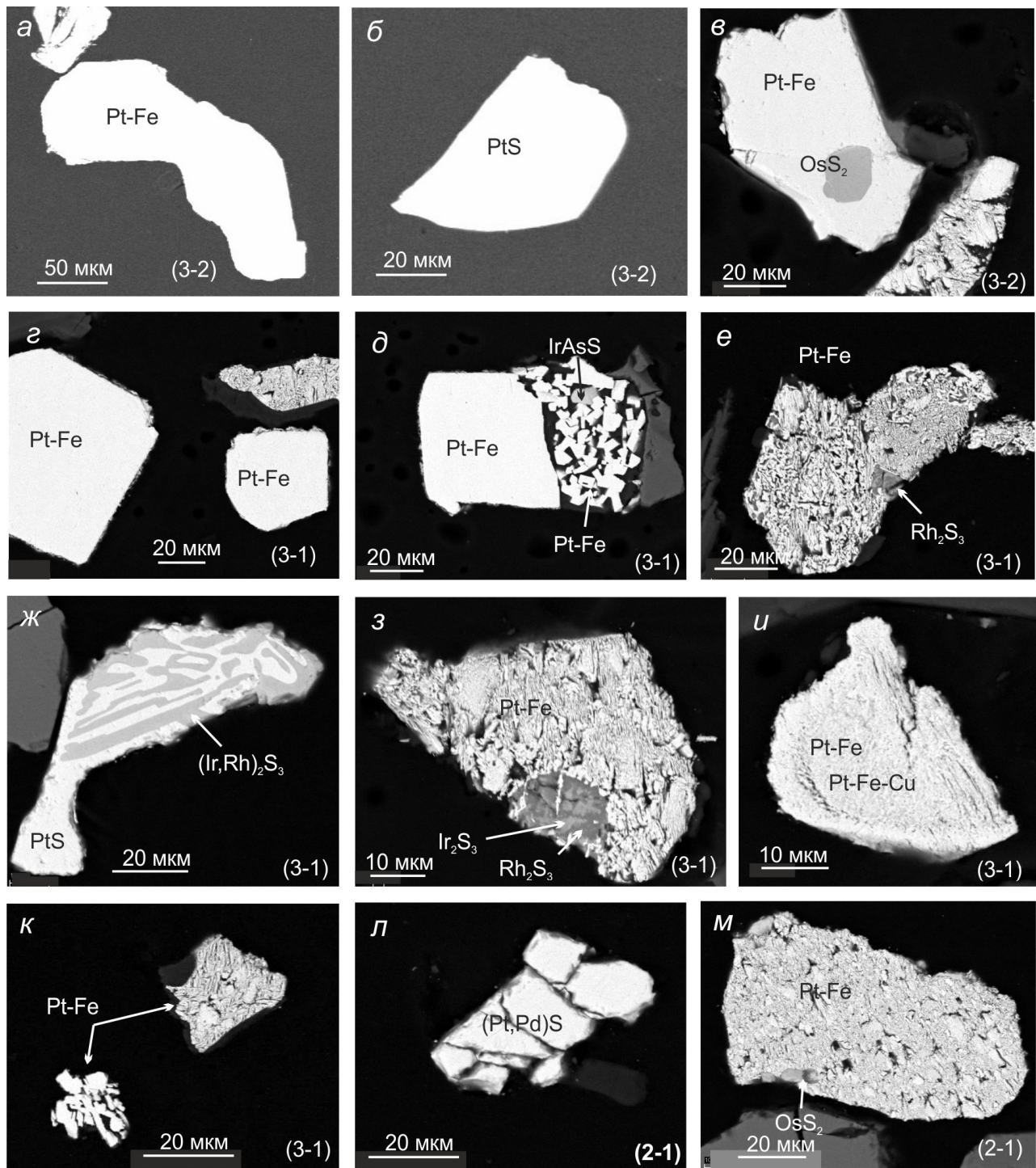


Рис. 1. Схемы строения массивов Кондер (а) по данным ЗАО Артель «Амур» с точками опробования и Инагли по [Разин, 1968] с упрощениями

Fig. 1. The scheme of the structure of Konders (a) massif according to the data of ЗАО Artel "Amur" with sampling points and Inagli by [Razin, 1968] with simplifications



**Рис. 2. Снимки сканирующего электронного микроскопа. Морфология зерен МПГ и микропарагенезисы из дунитов и клинопироксенитов Кондерского массива**

В скобках – номера проб: 2-1 – выветрелые пироксениты из долины р. Кондер; 3-1 – пироксениты на контакте с дунитами; 3-2 – дуниты на контакте с пироксенитами (точки отбора на рис. 1)

**Fig. 2. Scanning electron microscope images. Morphology of PGM grains and microparageneses from dunite and clinopyroxenite of the Konder massif**

In brackets - the number of samples: 2-1 - weathered pyroxenite from the valley of the Konder River; 3-1 - pyroxenite on the contact with dunite; 3-2 - dunite on the contact with pyroxenite (selection points in fig. 1)

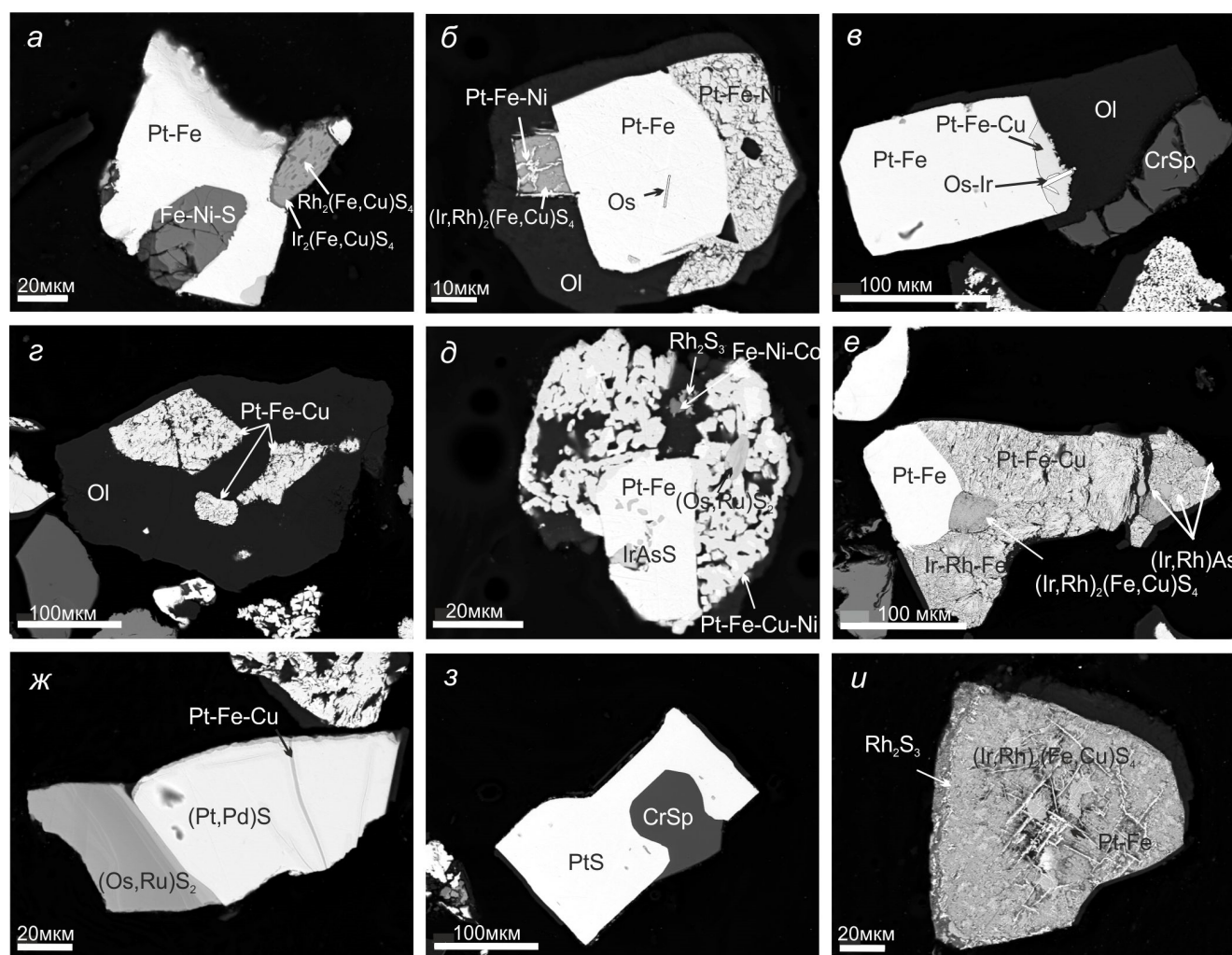


Рис. 3. Изображения сканирующего электронного микроскопа. Морфология зерен МПГ и микропарагенезисы из хромитовых руд Кондерского массива

Fig. 3. Scanning electron microscope image. Morphology and microparageneses of PGM grains from chromitite of the Konders massif

Если в исследуемой ассоциации куперит PtS или (Pt,Pd)S встречается в виде самостоятельных отдельных зерен, иногда в сростаниях с кашинитом  $(\text{Ir,Rh})_2\text{S}_3$  или лауритом  $(\text{Ru,Os})\text{S}_2$ , но не с PtFe сплавами (рис. 2, б, ж, л; рис. 3, ж, з), то другие многочисленные сульфиды и сульфоарсениды Ir, Os и Ru (ирансит, холлингвортит, эрликманит, лаурит, бауит, кашинит и ЭПГ-тиошпинели) тесно ассоциируют с Pt-Fe(Cu) сплавами. При этом если в дунитах и клинопироксенитах чаще встречаются минералы ряда баоит-кашинит (рис. 2, е, з), то в хромититах постоянно отмечаются ЭПГ тиошпинели ряда купроиридсит-купрородсит  $(\text{Ir,Rh})_2(\text{Fe,Cu})\text{S}_4$  (рис. 3, а, б, е, u).

Дуниты и клинопироксениты Кондерского массива на контакте (точки опробования 3-1 и 3-2 на рис. 1, а) оказались в большей степени обогащены МПГ, чем другие образцы дунитового ядра (табл. 1).

Соотношение рудных минералов в обеих выборках близки (рис. 4). Количество зерен куперита PtS в дунитах и клинопироксенитах составляет 29 и 20% соответственно.

#### Ассоциация платиновых минералов из россыпи реки Инагли

Коренные породы массива Инагли содержат акцессорную вкрапленность и шлировые выделения хромшпинелидов, дренируемые притоками реки Инагли. МПГ накапливаются в россыпи и характеризуют платиновую минерализацию дунитов и хромититов массива в целом. В тяжелом хромитовом концентрате шлиха в выборке МПГ около 77% приходится на долю изоферроплатины  $\text{Pt}_3\text{Fe}$ , 13% зерен представлены сперрилитом  $\text{PtAs}_2$ , остальная часть относится к Au-Ag сплавам (рис. 4).

Таблица 1

## Результаты опробования коренных пород Кондерского массива

Table 1

## Results of sampling the host rocks of the Konder massif

№ пробы	Предмет исследования	Вес пробы, г	Pt-Fe	Pt-Fe-Cu Pt-Cu	PtS	Os
1-1	Дунит м/з	3 100	1			
1-2	Дунит к/з	4 500				
1-3	Дунит, карьер	2 400	4			
1-4	Дунит, руч. Малый	2 900				
1-5	Порфировидные дуниты	12 100	5	2		
1-6	Дунит с CrSp, руч. Малый	3 700				
1-7	Древние осадки по руч. Малый		3			
2-1	Выветрелые пироксениты	15 000	5		1	
3-1	Пироксениты на контакте с дунитами	5 400	47	4	13	2
3-2	Дуниты на контакте с пироксенитами	6 000	23	1	10	
3-3	Хромитовая руда, старая фабрика	5 000	3.03 г. Платиновый концентрат			
4-1	Пегматоидные дуниты, р. Кондер	15 000	1			
4-2	Шлих из аллювия, р. Кондер	12 лотков	3			
4-3	Аллювий (древние осадки), р. Кондер	8 лотков	2			
4-4	Хромитовые отвалы эфелей	20–25 кг				
5-4	Пегматоидный дунит с CrSp	10–15 кг	1			
5-5	Выветрелые пегматоидные дуниты	20–25 кг	9			

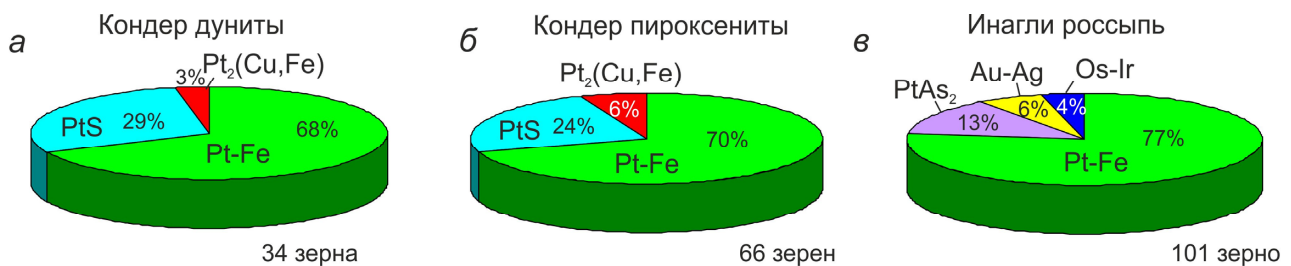


Рис. 4. Соотношение МПГ в дунитах и клинопироксенитах массива Кондер на контакте этих пород и в россыпи р. Инагли

Fig. 4. The ratio of PGM in dunite and clinopyroxenite of the Konder massif on the contact of these rocks and in Inagli placer

Другие платиновые минералы находятся в виде включений в изоферроплатине или образуют с ней сростания (рис. 5). Изоферроплатина представляет собой практически неокатанные зерна идиоморфные кубические кристаллы, зерна, неправильной формы и ее сростки с хромшпинелидами и Os-Ir сплавами и другими МПГ до 2 мм. Часто можно наблюдать включения мелких идиоморфных кристаллов хромита в зернах Pt-Fe сплавов (рис. 5, а). Для МПГ ассоциации Инагли характерно широкое развитие обоих магматических парагенезисов: включения кристаллов осмия в изоферроплатине (рис. 5, б) и изоферроплатино-иридиевые структуры распада (рис. 5, в). Сперрилит, напротив, образует кристаллы кубиче-

ского и кубоктаэдрического габитуса (рис. 5, и), иногда вытянутые или уплощенные. Он встречается в россыпи в виде самостоятельных зерен размером до 0,8 мм, но практически отсутствуют его сростания с изоферроплатиной. Отдельные зерна сперрилита содержат в центральной части многофазные микроагрегаты, образуя так называемые фаршированные кристаллы. Контуры многофазных включений иногда конформны граням кристалла (рис. 6, б) или образуют каплевидные включения Pd минералов (рис. 6, з). Микропарагенезисы заключенных в сперрилите минералов представлены куперитом, лаури- том, ирарситом, эрликманитом, галенитом, миллеритом, борнитом, халькозином, пиритом, пентланди-

том, а также золотом (рис. 6, *а–д*). Почти все выше-названные минералы находятся в разных сочетаниях друг с другом. Обнаружено одно зерно, в котором сперрит развивается по изоферроплатине, замещающая ее (рис. 6, *е*). Это изометричное зональное образование, центр которого представлен реликтами изоферроплатины с включениями самородного осмия, по нему развита широкая кайма куперита в сростании с ирарситом, последовательно замещенная также широкой каймой сперрита. Аналогичная зональность замещения наблюдалась ранее в россыпях южной части Кузнецкого Алатау [Толстых и др., 1996].

Куперит также встречается на Инагли, но в очень подчиненном количестве (рис. 5, *ж, е; 6, в*). Распространенными минералами-включениями являются лаурит  $\text{RuS}_2$ , ирарсит  $\text{IrAsS}$  и ЭПГ-тиошпинели серии купроиридсит-купорродсит-маланит  $(\text{Ir,Pt,Rh})_2\text{CuS}_4$ .

МПГ ассоциация массива Инагли отличается отсутствием постмагматических Pt-Fe-Cu сплавов (тетраферроплатины и туламинита), формирование которых связывается с проявлением наложенной серпентинизации и которые так характерны для Кондерской ассоциации.

### Составы МПГ из массивов Кондер и Инагли

Дунитовая и клинопироксенитовая платина Кондерского массива имеет некоторые вариации по содержанию Fe, и ее составы варьируют от железистой платины (Pt, Fe) до изоферроплатины  $\text{Pt}_3\text{Fe}$  по классификации [Cabri, Feather, 1975]. Тогда как платина из хромитовых руд Кондерского массива и россыпи Инагли по составу соответствует  $\text{Pt}_3\text{Fe}$  (рис. 7, *а*). Среди примесей других платиноидов для Кондерских Pt-Fe сплавов характерна примесь Pd, концентрация которого варьирует в пределах 0,27–1,16 мас. %, а Инаглинские сплавы отличаются высокой концентрацией Ir (до 16,6 мас. %, табл. 2). Сумма примесей в Pt-Fe сплавах обоих массивов достигают 15 ат. % (рис. 7, *б*), при этом их количество уменьшается с уменьшением концентрации Fe. По соотношению элементов для Инагли характерна иридистая и родисто-иридистая разновидности Pt-Fe сплавов, для дунитов Кондера отмечаются широкие вариации: иридисто-родистые и палладистые сплавы, тогда как в хромитовых рудах Кондера распространена палладистая изоферроплатина (рис. 7, *в*).

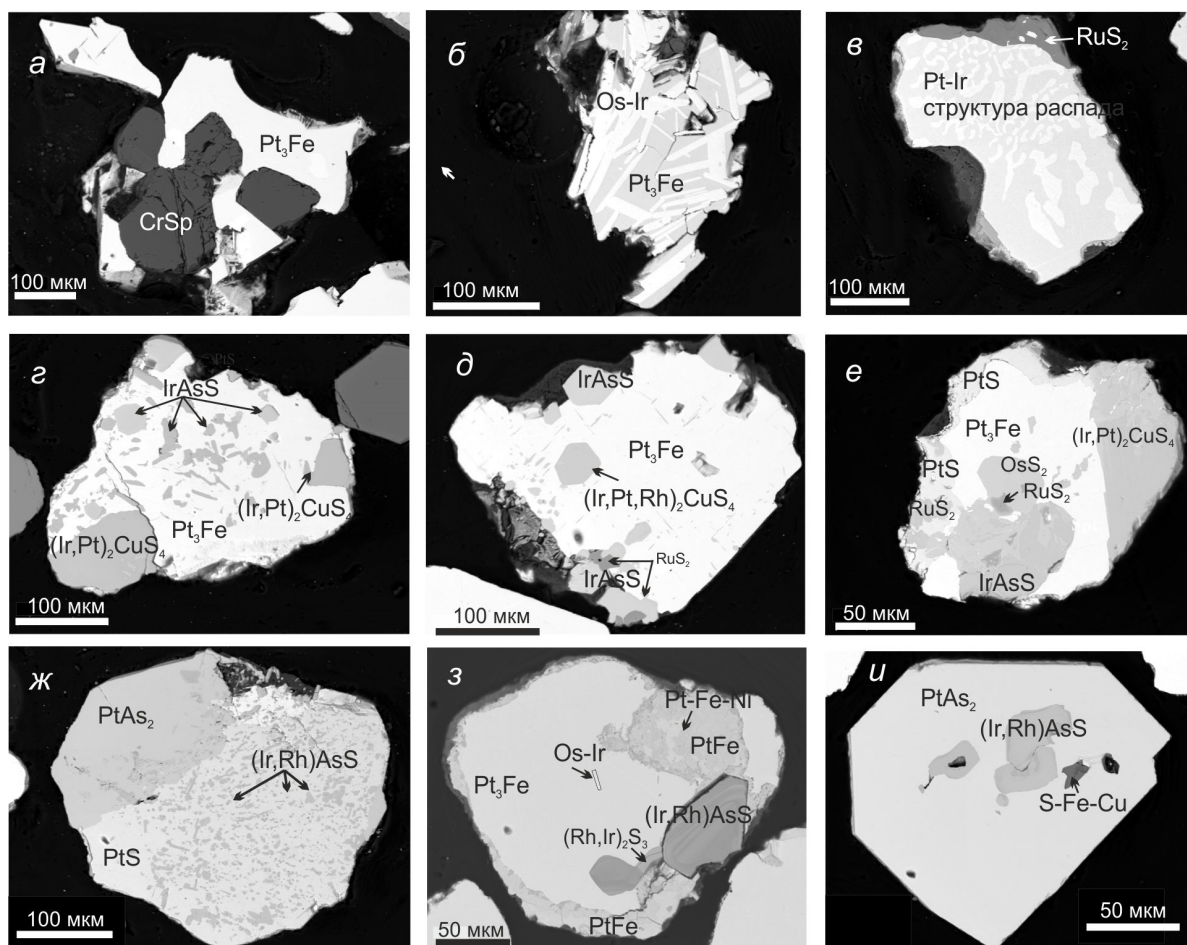
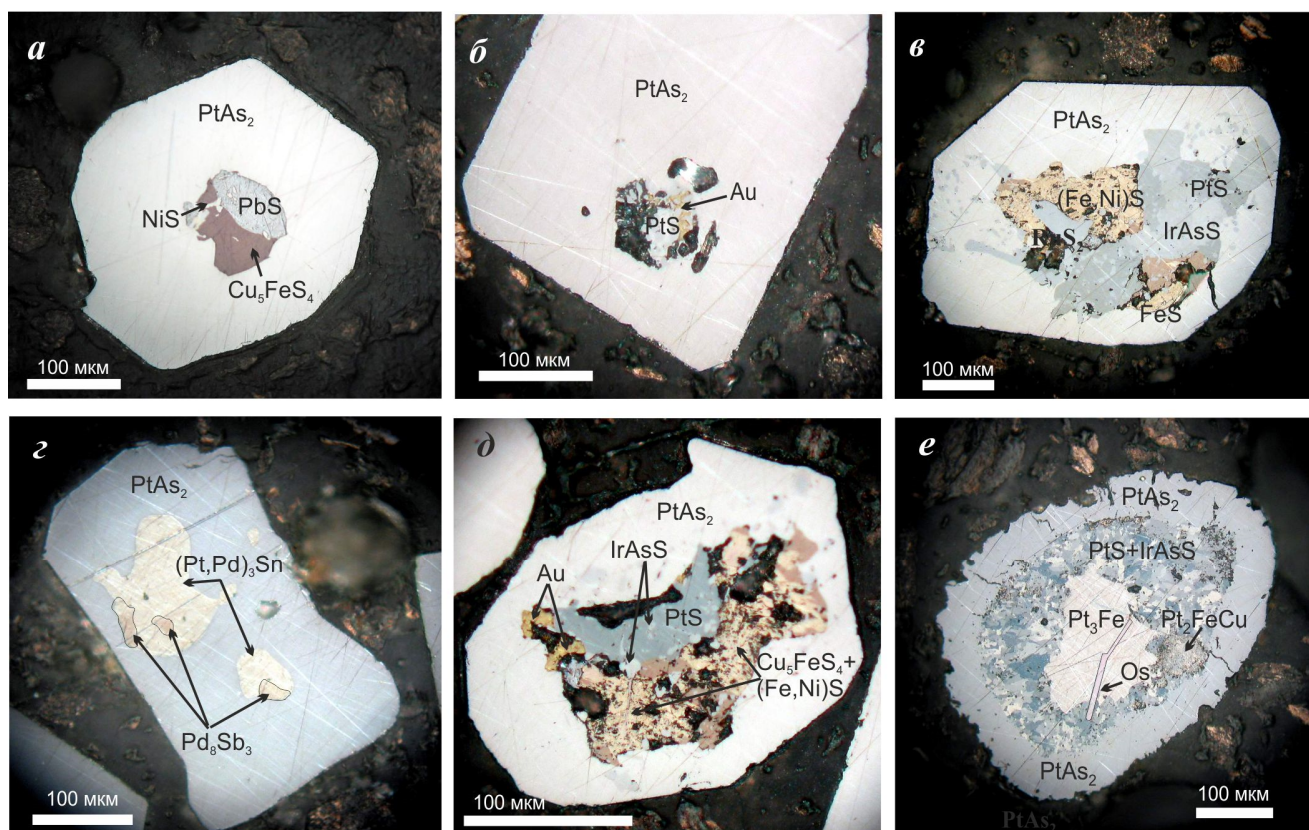


Рис. 5. Изображения сканирующего электронного микроскопа.  
Микропарагенезисы МПГ из россыпи реки Инагли

Fig. 5. Images of Scanning electron microscope. Mimicroparageneses of PGM from the Inagly Massif



**Рис. 6. Сперрилит из россыпи реки Инагли. Полированные зерна в отраженном свете**

*a* – трехфазное включение галенита, борнита и миллерита в сперрилите; *б* – многофазное включение в сперрилите, в состав которого входит золото и куперит; *в*, *д* – кристаллы сперрилита, «фаршированные» многофазными микроагрегатами; *з* – кристалл сперрилита с каплевидными двухфазными включениями, сложенными рустенбургитом и мертитом II; *е* – реликты зерна изоферроплатины, частично замещенные последовательно куперит-ирарситовым агрегатом и сперрилитом

**Fig. 6. Sperrylite from the placer of the Inagli River. Polished grains in reflected light**

*a* - a three-phase inclusion of galena, bornite and millerite in sperrylite; *б* - multiphase inclusion in the sperrylite, which includes gold and cooperite; *в*, *д* - crystals of sperrylite, "stuffed" with multiphase microaggregates; *з* - a crystal of sperrylite with teardrop-shaped two-phase inclusions composed of rustenburgite and mertieite II; *е* - relicts of grain isoferroplatinum, partially successively replaced by the cooperite-irarsite aggregate and sperrylite

Составы магматических Pt-Fe сплавов на Кондере и Инагли в целом обладают большей железистостью, чем сплавы в исследованных массивах Урала [Толстых и др., 2011]. Os-Ir сплавы, включенные в изоферроплатину и железистую платину, относятся к осмию и иридию. Концентрация Ru в Os-Ir сплавах Инагли не превышает 5 мас. % (табл. 3), тогда как содержание Pt в иридии достигает 19,74 мас. %. По данным [Некрасов и др., 1994], на Кондере большинство анализов аналогичны Инаглинским, но также там присутствуют и высокорутенистые составы системы Os-Ir-Ru вплоть до самородного рутения.

Составы МПГ из включений представлены в табл. 4 (Кондер) и 5 (Инагли). В обоих массивах распространены твердые растворы лаурит-эрликманит ( $(\text{Ru}, \text{Os})\text{S}_2$ ). От лаурита ( $\text{RuS}_2$ ) к эрликманиту ( $\text{OsS}_2$ ) увеличиваются примеси Rh и Ir в минералах (рис. 8, *a*). В куперите PtS Инаглинского массива примесь Pd отсутствует (табл. 5), тогда как на

Кондере концентрация Pd варьирует в куперите, достигая в хромитовых рудах 4,21 мас. % (8 ат. %) (рис. 8, *б*) и десятые доли мас. % Ni (табл. 4, 5). Тиошпинели платиновых металлов  $(\text{Cu}, \text{Fe})(\text{Ir}, \text{Rh}, \text{Pt})_2\text{S}_4$  встречаются на обоих массивах. Анализ Инаглинских минералов показал, что они относятся в основном к купроиридситу и реже к купрородситу (рис. 8, *в*). В шлиховом концентрате Инагли распространены арсениды и сульфоарсениды ЭПГ: сперрилит  $\text{PtAs}_2$  не содержит примесей, ирарсит  $\text{IrAsS}$  в разной степени включает в себя холлингвортитовый минерал  $\text{RhAsS}$ ; встречаются единичные зерна холлингвортита (табл. 5).

#### Характеристика рудоформирующих систем массивов Инагли и Кондер

Платино-железистые сплавы в дунитах и клинопироксенитах Кондерского массива варьируют по

концентрации железа. В них присутствует железистая платина, которая кристаллизовалась при более низкой фугитивности кислорода, чем изоферроплатина в хромититах [Roeder, Jamieson, 1992; Amosse et al., 2000], следовательно, является более ранней, поскольку активность кислорода в массивах Урало-Аляскинского типа увеличивается в ходе развития рудоформирующей системы [Чашухин и др., 2002]. Соотношение примесей в Pt-Fe сплавах отражает гео-

химические особенности рудоформирующей системы и указывает на степень фракционирования ЭПГ [Johan et al., 2000] и относительную температуру рудоотложения, которая снижается от Ir-содержащих сплавов к Rh- и Pd-содержащим [Slansky et al., 1991]. Следовательно, Pt-Fe сплавы Инаглинского массива, обогащенные Ir, являются более высокотемпературными по сравнению с Pd-содержащей изоферроплатиной Кондерского массива.

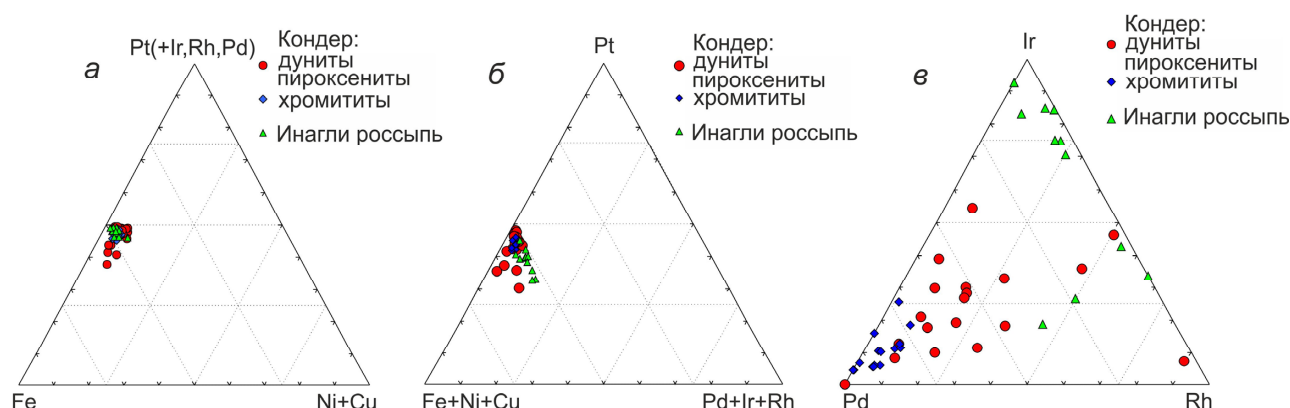


Рис. 7. Состав Pt-Fe сплавов в породах массивов Кондер и Инагли (а, б) и распределение в них элементов примесей (в)

Fig. 7. Composition of Pt-Fe alloys (at. %) in the rocks of the Konder and Inagli (a, b) and the distribution of minor elements in them (c)

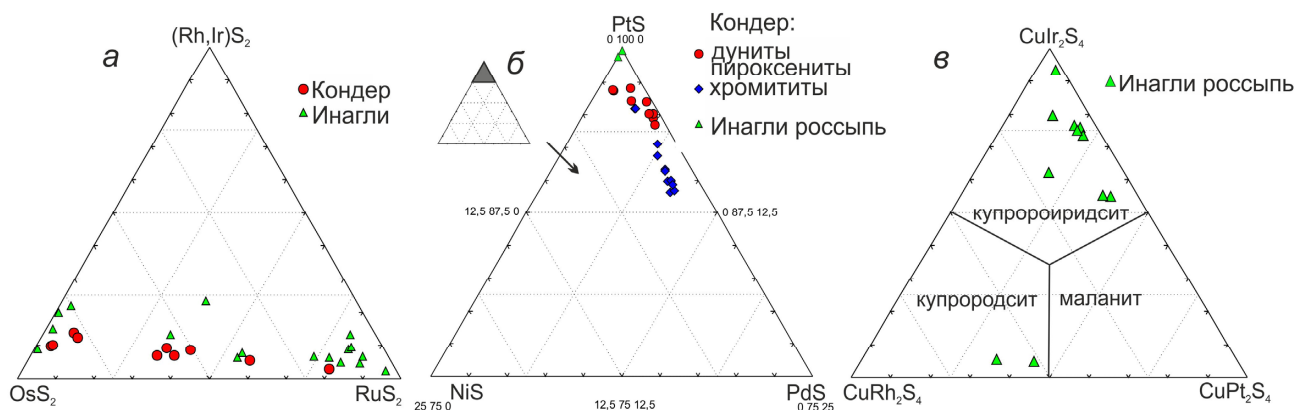


Рис. 8. Соотношение элементов в лаурите и эрлихманите (а), куперите (б) и ЭПГ-тиошпинелях (в)

Fig. 8. The ratio of elements in laurite and erlichmanite (a), cooperite (b) and EPG-spinels (c)

Таблица 2

Состав Pt-Fe сплавов из массива Кондер, мас. %

Table 2

Composition of Pt-Fe alloys from the Konder massif, wt %

№	Pt	Ir	Os	Ru	Rh	Pd	Fe	Ni	Cu	Сумма
1	87,37	0,47	0,51	0,25	0,42	0,63	7,74	0,07	1,22	98,68
2	88,00	0,51	0,02	0,10	0,23	0,66	7,89	0,09	1,32	98,82
3	88,87	0,46	0,04	0,12	0,25	0,71	7,90	0,07	1,18	99,60
4	88,55	0,38	0,04	0,06	0,19	0,54	8,03	0,07	0,97	98,83
5	88,60	0,32	0,13	0,06	0,04	0,33	8,07	0,09	0,95	98,59
6	88,42	0,22	0,05	0,07	0,36	0,50	8,19	0,09	1,11	99,01

№	Pt	Ir	Os	Ru	Rh	Pd	Fe	Ni	Cu	Сумма
7	88,15	0,00	0,00	0,12	0,32	0,63	8,20	0,14	1,45	99,01
8	89,05	0,07	0,02	0,09	0,00	0,68	8,25	0,12	0,75	99,03
9	88,84	0,04	0,00	0,04	0,05	1,01	8,33	0,10	0,64	99,05
10	89,96	0,07	0,05	0,05	0,09	0,27	8,34	0,08	0,43	99,34
11	89,35	0,00	0,02	0,11	0,06	0,39	8,36	0,05	0,53	98,87
12	88,56	0,06	0,00	0,11	0,12	1,00	8,36	0,12	1,02	99,35
13	89,22	0,00	0,00	0,04	0,00	0,93	8,40	0,08	0,62	99,29
14	88,44	0,07	0,01	0,03	0,06	1,09	8,46	0,14	0,87	99,17
15	87,41	0,41	0,03	0,04	0,12	1,07	8,51	0,13	0,88	98,60
16	89,10	0,04	0,06	0,04	0,07	0,96	8,52	0,13	1,01	99,93
17	88,33	0,04	0,00	0,06	0,01	1,16	8,65	0,13	0,58	98,96
18	89,45	0,00	0,03	0,06	0,03	0,55	8,73	0,11	0,64	99,60
19	87,66	0,00	0,00	0,13	0,10	1,00	8,76	0,15	0,65	98,45
20	88,31	0,13	0,03	0,05	0,04	0,98	8,81	0,16	0,91	99,42
21	87,06	0,08	0,01	0,11	0,10	1,00	9,36	0,43	1,09	99,24
22	82,87	2,30	0,00	0,11	1,76	0,65	9,68	0,22	0,72	98,31
23	86,71	0,57	0,00	0,14	0,06	0,32	10,24	0,36	0,89	99,29
24	66,03	16,69	2,73	3,78	3,65	0,00	5,13	—	0,26	98,27
25	81,01	5,64	0,91	0,20	3,35	0,00	6,84	—	1,06	99,01
26	73,58	16,60	0,28	0,23	0,46	0,00	6,86	—	0,25	98,26
27	89,92	0,83	0,00	0,00	0,28	0,07	7,37	—	0,00	98,47
28	82,01	7,68	0,59	0,00	0,60	0,09	7,58	—	0,00	98,55
29	85,96	3,66	0,28	0,00	0,48	0,00	7,77	—	0,10	98,25
30	87,90	0,93	0,00	0,12	0,97	0,16	7,77	—	0,49	98,34
31	76,88	13,88	0,87	0,16	0,39	0,00	7,78	—	0,00	99,96
32	87,80	1,60	0,00	0,11	1,53	0,00	7,88	—	0,33	99,25
33	85,60	3,93	0,26	0,12	0,21	0,00	8,08	—	0,00	98,20
34	85,07	4,01	0,00	0,00	0,53	0,08	8,12	—	0,00	97,81
35	85,54	4,21	0,06	0,00	0,48	0,00	8,14	—	0,27	98,70
36	82,61	6,03	0,22	0,00	0,86	0,09	8,16	—	0,22	98,19
37	77,59	10,85	0,42	0,66	0,91	0,00	8,19	—	1,26	99,88
38	85,89	3,49	0,00	0,07	0,56	0,00	8,35	—	0,16	98,52
39	89,60	0,63	0,00	0,00	0,24	0,00	8,40	—	0,00	98,87
40	86,73	3,17	0,07	0,00	0,45	0,00	8,48	—	0,00	98,90
41	88,21	0,00	0,00	0,00	0,36	1,31	8,55	—	0,00	98,43
42	88,56	0,67	0,00	0,00	0,23	0,17	8,60	—	0,00	98,23
43	82,83	3,68	0,65	0,47	2,20	0,00	9,21	—	0,60	99,64
44	86,96	3,44	0,00	0,00	0,38	0,00	9,38	—	0,29	100,45

Примечание. 1–23 – Кондер, 24–44 – Инагли.

Note. 1-23 - Konder, 24-44 - Inagli.

Таблица 3

## Составы Os-Ir сплавов из россыпи реки Инагли

Table 3

## Compositions of Os-Ir alloys from the Inagli River placer

№	Ir	Os	Ru	Pt	Rh	Cu	Fe	Сумма
1	44,51	55,79	0,31	0,38	0,16	0,22	0,34	101,71
2	8,79	85,16	1,89	2,79	0,39	0,00	0,00	99,02
3	13,69	80,30	2,26	2,56	0,38	0,08	0,00	99,27
4	0,00	96,40	0,00	2,20	0,00	0,00	0,00	98,60
5	0,90	94,90	0,00	3,30	0,00	0,00	0,00	99,10
6	0,00	94,80	0,00	3,60	0,00	0,00	0,00	98,40

№	Ir	Os	Ru	Pt	Rh	Cu	Fe	Сумма
7	2,30	94,80	0,00	1,90	0,00	0,00	0,00	99,00
8	1,70	93,70	0,00	3,90	0,00	0,00	0,00	99,30
9	4,70	92,80	0,00	2,30	0,00	0,00	0,00	99,80
10	7,80	87,90	0,00	3,60	0,00	0,00	0,00	99,30
11	7,00	86,60	0,00	4,60	0,00	0,00	0,00	98,20
12	10,20	86,10	0,00	2,60	0,00	0,00	0,00	98,90
13	14,59	81,31	0,31	1,48	0,73	0,00	0,02	98,44
14	19,89	72,59	3,63	3,23	0,96	0,00	0,07	100,37
15	22,09	68,99	1,39	4,09	0,88	0,00	0,12	97,56
16	10,83	85,29	1,73	2,16	0,28	0,00	0,00	100,29
17	54,18	19,45	3,77	19,34	1,80	0,22	1,64	100,40
18	67,10	15,29	4,52	13,12	1,90	0,13	0,52	102,58
19	59,63	14,54	4,99	19,74	2,31	0,17	0,59	101,03
20	74,86	6,50	3,35	14,59	1,01	0,30	0,55	101,16
21	48,05	28,87	3,56	18,91	1,48	0,16	1,06	102,09

Примечание. 1–16 – осмий, 17–21 – иридий; 16 – Кондер.

Note. 1-16 - Os, 17-21 - Ir; 16 - Konder.

В минеральных ассоциациях из коренных пород Кондерского массива, как и из россыпи Инаглинского массива, отмечаются два первично-магматических парагенезиса [Tolstykh et al., 2002]: осмий-изоферроплатиновый и иридий-изоферроплатиновый, которые более ярко проявлены на Инагли. Более ранний осмий-изоферроплатиновый парагенезис характеризуется включениями осмия в железистой платине и изоферроплатине (рис. 9, а, б). Первым из расплава кристаллизуется самородный осмий как самый тугоплавкий металл в равновесии с ранними Pt-Fe сплавами с образованием раннего высокотемпературного изоферроплатино-осмиевого парагенезиса. По мере его кристаллизации окисидно-металлическая составляющая расплава насыщается Ir согласно Os-Ir диаграмме состояния [Благородные... 1984]. При этом осмий последовательно обогащается Ir с образованием осмий-иридиевого тренда составов гексагональных сплавов (рис. 10, а), характерных для интрузий Урало-Аляскинского типа [Лихачев, 1987; Tolstykh et al., 2002]. Обогащение иридием происходит до тех пор, пока система из платино-осмиевой не переходит в платино-иридиевую. Тогда из расплава начинает кристаллизоваться высокотемпературный твердый раствор (Pt, Ir, Fe), который при понижении температуры до 850–800°C (рис. 10, б) распадается на изоферроплатину и самородный иридий. Рутений в незначительном количестве входит в сплавы (не более 5 мас. %), поскольку большая его часть реагирует с серой с образованием лаурита и эрликманита, которые часто присутствуют в равновесии с магматическими сплавами (рис. 9, б, в). Последующий

иридий-изоферроплатиновый парагенезис (структуры распада) (рис. 9, в, г) представлен иридием, обогащенным Pt (до 18,9 мас. %, табл. 3) и иридий-изоферроплатиной (до 13,88 мас. % Ir, табл. 2). Равновесие эрликманита  $OsS_2$  с Os-Ir-Ru сплавами в магматических условиях подтверждается экспериментальными данными [Amosse et al., 2000]. Но его присутствие в составе многофазных парагенезисов в ассоциации с борнитом и другими сульфидами во включениях сперрилитовых зерен (рис. 6, в, д), а также в виде продукта замещения изоферроплатины совместно с ирарситом (рис. 6, е) свидетельствуют о широком диапазоне условий его формирования.

Фугитивность серы ( $fS_2$ ) при формировании  $OsS_2$  в интервале температур распада (850–750°C) иридий-изоферроплатинового парагенезиса соответствует интервалу  $10^{-1,5}$ – $10^{-2,5}$  атм. [Johan et al., 1989]. Активность серы в обоих массивах и мышьяка на Инагли повышалась в ходе развития рудоформирующих систем, что обусловило формирование ЭПГ-тиошпинелей и сульфоарсенидов серии ирарсит-холлингвортит, которые формировались на завершающей магматической (магматогенной) стадиях. Распространенные в ассоциациях сперрилит  $PtAs_2$  на Инагли и куперит  $PtS$  на Кондере образуются на более поздней стадии, вероятно, пневматолитово-гидротермальной, поскольку они не отмечаются в равновесии с Pt-Fe и Os-Ir сплавами, а, как правило, присутствуют в виде отдельных зерен, иногда в ассоциации друг с другом и с сульфоарсенидами (рис. 5, ж, и).

Таблица 4

Составы включений МПГ в Pt-Fe сплавах из массива Кондер, мас. %

Table 4

Composition of PGM inclusions in Pt-Fe alloys from the Kondor massif, wt %

№	Pt	Ir	Os	As	S	Ru	Rh	Pd	Fe	Ni	Cu	Сум- ма	Формула
1	2,07	44,23	1,45	24,93	13,52	0,60	10,76	0,00	0,29	0,04	0,06	97,95	$(\text{Ir}_{0,62}\text{Rh}_{0,28}\text{Pt}_{0,03}\text{Os}_{0,02}\text{Ru}_{0,02}\text{Fe}_{0,01})_{0,98}\text{As}_{0,89}\text{S}_{1,13}$
2	80,55	0,00	0,00	0,00	15,75	0,06	0,00	2,83	0,00	0,33	0,00	99,52	$(\text{Pt}_{0,88}\text{Pd}_{0,06}\text{Ni}_{0,01})_{0,95}\text{S}_{1,05}$
3	82,08	0,00	0,00	0,00	15,60	0,00	0,00	1,48	0,00	0,35	0,00	99,51	$(\text{Pt}_{0,91}\text{Pd}_{0,03}\text{Ni}_{0,01})_{0,95}\text{S}_{1,05}$
4	81,86	0,00	0,00	0,00	15,61	0,04	0,00	1,47	0,00	0,36	0,00	99,36	$(\text{Pt}_{0,91}\text{Pd}_{0,03}\text{Ni}_{0,01})_{0,95}\text{S}_{1,05}$
5	78,76	0,00	0,00	0,00	16,11	0,05	0,00	3,97	0,00	0,47	0,00	99,37	$(\text{Pt}_{0,85}\text{Pd}_{0,08}\text{Ni}_{0,02})_{0,95}\text{S}_{1,06}$
6	79,94	0,00	0,00	0,00	16,32	0,08	0,00	3,62	0,00	0,45	0,00	100,40	$(\text{Pt}_{0,85}\text{Pd}_{0,07}\text{Ni}_{0,02})_{0,94}\text{S}_{1,06}$
7	77,98	0,00	0,00	0,00	16,05	0,05	0,00	3,80	0,00	0,46	0,05	98,39	$(\text{Pt}_{0,85}\text{Pd}_{0,08}\text{Ni}_{0,02})_{0,95}\text{S}_{1,06}$
8	77,90	0,00	0,00	0,00	16,26	0,04	0,00	4,21	0,00	0,48	0,00	98,90	$(\text{Pt}_{0,84}\text{Pd}_{0,08}\text{Ni}_{0,02})_{0,94}\text{S}_{1,06}$
9	78,57	0,00	0,00	0,00	16,43	0,05	0,00	4,15	0,10	0,51	0,00	99,82	$(\text{Pt}_{0,83}\text{Pd}_{0,08}\text{Ni}_{0,02})_{0,93}\text{S}_{1,06}$
10	78,15	0,00	0,00	0,00	16,23	0,08	0,00	3,91	0,00	0,44	0,00	98,81	$(\text{Pt}_{0,84}\text{Pd}_{0,08}\text{Ni}_{0,02})_{0,94}\text{S}_{1,06}$
11	79,17	0,00	0,00	0,00	16,16	0,07	0,00	3,02	0,00	0,41	0,00	98,82	$(\text{Pt}_{0,86}\text{Pd}_{0,06}\text{Ni}_{0,01})_{0,93}\text{S}_{1,06}$
12	82,73	0,00	0,00	0,00	15,64	0,00	0,00	0,50	0,00	0,52	0,00	99,39	$(\text{Pt}_{0,92}\text{Ni}_{0,02}\text{Pd}_{0,01})_{0,95}\text{S}_{1,05}$
13	82,69	0,00	0,00	0,00	15,86	0,00	0,00	0,44	0,04	0,51	0,00	99,54	$(\text{Pt}_{0,91}\text{Ni}_{0,02}\text{Pd}_{0,01})_{0,94}\text{S}_{1,06}$
14	81,14	0,00	0,00	0,00	15,68	0,00	0,00	1,67	0,00	0,09	0,00	98,57	$(\text{Pt}_{0,90}\text{Pd}_{0,03})_{0,93}\text{S}_{1,06}$
15	80,37	0,00	0,00	0,00	15,97	0,05	0,00	2,18	0,00	0,12	0,00	98,69	$(\text{Pt}_{0,88}\text{Pd}_{0,04})_{0,92}\text{S}_{1,07}$
16	81,51	0,00	0,00	0,00	15,71	0,00	0,00	1,21	0,22	0,11	0,00	98,75	$(\text{Pt}_{0,90}\text{Pd}_{0,02}\text{Fe}_{0,01})_{0,93}\text{S}_{1,06}$
17	80,78	0,00	0,00	0,00	15,75	0,04	0,00	2,35	0,06	0,12	0,00	99,10	$(\text{Pt}_{0,89}\text{Pd}_{0,05})_{0,94}\text{S}_{1,06}$
18	80,60	0,00	0,00	0,00	15,62	0,00	0,00	2,09	0,00	0,10	0,00	98,41	$(\text{Pt}_{0,90}\text{Pd}_{0,04})_{0,94}\text{S}_{1,06}$
19	82,02	0,00	0,00	0,00	15,74	0,00	0,00	0,94	0,00	0,23	0,00	98,94	$(\text{Pt}_{0,91}\text{Pd}_{0,02}\text{Ni}_{0,01})_{0,94}\text{S}_{1,06}$
20	80,71	0,00	0,00	0,00	15,80	0,04	0,00	1,96	0,05	0,12	0,00	98,67	$(\text{Pt}_{0,89}\text{Pd}_{0,04})_{0,93}\text{S}_{1,06}$
21	0,77	3,47	48,43	0,00	29,35	15,56	1,49	0,00	0,28	0,00	0,07	99,42	$(\text{Os}_{0,56}\text{Ru}_{0,34}\text{Ir}_{0,04}\text{Rh}_{0,03}\text{Pt}_{0,01}\text{Fe}_{0,01})_{0,99}\text{S}_{2,01}$
22	0,77	5,98	58,93	0,50	26,40	3,05	1,95	0,00	0,06	0,00	0,00	97,64	$(\text{Os}_{0,76}\text{Ir}_{0,08}\text{Ru}_{0,07}\text{Rh}_{0,05}\text{Pt}_{0,01})_{0,97}(\text{S}_{2,02}\text{As}_{0,02})_{2,04}$
23	1,02	4,64	59,02	0,24	26,62	3,86	1,98	0,00	0,05	0,00	0,00	97,44	$(\text{Os}_{0,76}\text{Ru}_{0,09}\text{Ir}_{0,06}\text{Rh}_{0,05}\text{Pt}_{0,01})_{0,97}(\text{S}_{2,02}\text{As}_{0,01})_{2,03}$
24	0,00	3,82	46,65	0,00	29,45	16,74	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	97,76	$(\text{Os}_{0,54}\text{Ru}_{0,37}\text{Ir}_{0,04}\text{Rh}_{0,02})_{0,97}\text{S}_{2,03}$
25	0,00	1,86	17,20	0,00	35,18	42,62	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	97,50	$(\text{Ru}_{0,78}\text{Os}_{0,17}\text{Ir}_{0,02}\text{Rh}_{0,01}\text{Pd}_{0,01})_{0,99}\text{S}_{2,03}$

Примечание. 1 – ирарсит IrAsS, 2–20 – куперит PtS (2–11 из хромититов, 12–20 из дунитов), 21–24 – эрликманит OsS<sub>2</sub>, 25 – лауристит RuS<sub>2</sub>.

Note. 1 - irarsite IrAsS, 2-20 - cooperite PtS (2-11 - from chromitite, 12-20 - from dunite), 21-24 - erlichmanite OsS<sub>2</sub>, 25 - laurite RuS<sub>2</sub>

Таблица 5

Составы минералов ЭПГ из россыпи реки Инагли, мас. %

Table 5

Composition of PGM from the Kondor massif, wt %

№	Pt	Ir	Os	As	S	Ru	Rh	Pd	Fe	Ni	Cu	Сум- ма	Формула
1	2,16	10,83	85,29	0,00	0,00	1,73	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	100,29	$\text{Os}_{0,84}\text{Ir}_{0,11}\text{Ru}_{0,03}\text{Pt}_{0,02}$
2	53,62	0,00	0,00	41,89	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,72	$\text{Pt}_{0,98}(\text{As}_{1,99}\text{S}_{0,02})_{2,01}$
3	55,23	0,00	0,00	42,43	0,27	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,99	$\text{Pt}_{0,99}(\text{As}_{1,98}\text{S}_{0,03})_{2,01}$
4	54,46	0,00	0,00	42,21	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,02	$\text{Pt}_{0,98}(\text{As}_{1,98}\text{S}_{0,04})_{2,02}$
5	54,60	0,00	0,00	41,78	0,46	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	97,02	$(\text{Pt}_{0,98}\text{Rh}_{0,01})_{0,99}(\text{As}_{1,96}\text{S}_{0,05})_{2,01}$
6	5,38	8,85	10,64	28,87	15,02	0,11	28,58	0,00	0,00	0,00	0,00	97,46	$(\text{Rh}_{0,66}\text{Os}_{0,13}\text{Ir}_{0,11}\text{Pt}_{0,07})_{0,90}\text{S}_{1,11}\text{As}_{0,92}$
7	0,38	43,15	2,88	25,24	13,53	0,76	11,22	0,00	0,00	0,00	0,00	97,15	$(\text{Ir}_{0,60}\text{Rh}_{0,29}\text{Os}_{0,04}\text{Ru}_{0,02}\text{Pt}_{0,01})_{0,96}\text{S}_{1,13}\text{As}_{0,90}$
8	0,94	39,78	1,94	24,82	13,95	0,52	14,86	0,00	0,05	0,00	0,00	96,85	$(\text{Ir}_{0,55}\text{Rh}_{0,38}\text{Os}_{0,03}\text{Pt}_{0,01}\text{Ru}_{0,01})_{0,98}\text{S}_{1,15}\text{As}_{0,87}$
9	0,00	56,66	2,41	22,77	13,15	1,22	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	98,20	$(\text{Ir}_{0,84}\text{Rh}_{0,06}\text{Os}_{0,04}\text{Ru}_{0,03})_{0,97}\text{S}_{1,17}\text{As}_{0,87}$
10	0,00	55,64	2,48	22,70	13,27	1,99	2,14	0,00	0,00	0,00	0,00	98,22	$(\text{Ir}_{0,82}\text{Ru}_{0,06}\text{Rh}_{0,06}\text{Os}_{0,04})_{0,98}\text{S}_{1,17}\text{As}_{0,86}$
11	0,08	45,58	2,26	23,11	14,96	3,70	8,76	0,00	0,00	0,00	0,00	98,44	$(\text{Ir}_{0,62}\text{Rh}_{0,22}\text{Ru}_{0,10}\text{Os}_{0,03})_{0,97}\text{S}_{1,22}\text{As}_{0,81}$

№	Pt	Ir	Os	As	S	Ru	Rh	Pd	Fe	Ni	Cu	Сум- ма	Формула
12	0,00	34,10	4,35	23,39	16,26	5,30	14,27	0,00	0,00	0,00	0,00	97,66	$(\text{Ir}_{0,44}\text{Rh}_{0,34}\text{Ru}_{0,13}\text{Os}_{0,06})_{0,97}\text{S}_{1,26}\text{As}_{0,77}$
13	83,30	0,00	0,00	0,00	15,37	0,04	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	98,82	$\text{Pt}_{0,94}\text{S}_{1,06}$
14	83,69	0,00	0,00	0,00	15,70	0,05	0,00	0,15	0,00	0,26	0,00	99,84	$(\text{Pt}_{0,93}\text{Ni}_{0,01})_{0,94}\text{S}_{1,06}$
15	32,99	3,62	0,00	0,00	27,64	0,00	20,56	0,00	0,64	0,00	11,77	97,21	$(\text{Cu}_{0,90}\text{Fe}_{0,06})_{0,96}(\text{Rh}_{0,97}\text{Pt}_{0,82}\text{Ir}_{0,09})_{1,88}\text{S}_{4,17}$
16	26,87	4,18	0,00	0,00	28,53	0,00	25,32	0,00	2,00	0,71	10,80	98,41	$(\text{Cu}_{0,79}\text{Fe}_{0,17}\text{Ni}_{0,06})_{1,02}(\text{Rh}_{1,14}\text{Pt}_{0,64}\text{Ir}_{0,10})_{1,88}\text{S}_{4,12}$
17	24,06	36,42	0,00	0,00	24,18	0,00	3,13	0,00	0,57	0,00	10,84	99,22	$(\text{Cu}_{0,93}\text{Fe}_{0,06})_{0,99}(\text{Ir}_{1,04}\text{Pt}_{0,68}\text{Rh}_{0,17})_{1,89}\text{S}_{4,13}$
18	23,98	36,39	0,00	0,00	24,07	0,00	3,10	0,00	0,43	0,00	10,78	98,74	$(\text{Cu}_{0,93}\text{Fe}_{0,04})_{0,97}(\text{Ir}_{1,04}\text{Pt}_{0,68}\text{Rh}_{0,17})_{1,89}\text{S}_{4,14}$
19	24,92	35,74	0,00	0,00	23,44	0,00	2,39	0,00	0,48	0,00	10,67	97,64	$(\text{Cu}_{0,94}\text{Fe}_{0,05})_{0,99}(\text{Ir}_{1,05}\text{Pt}_{0,72}\text{Rh}_{0,13})_{1,90}\text{S}_{4,11}$
20	12,87	42,33	0,00	0,00	24,95	0,00	6,91	0,00	3,95	0,00	7,11	98,13	$(\text{Cu}_{0,60}\text{Fe}_{0,38})_{0,98}(\text{Ir}_{1,17}\text{Rh}_{0,36}\text{Pt}_{0,35})_{1,88}\text{S}_{4,15}$
21	7,47	52,69	0,00	0,00	23,94	0,00	3,35	0,00	2,86	0,18	8,07	98,57	$(\text{Cu}_{0,70}\text{Fe}_{0,28}\text{Ni}_{0,02})_{1,00}(\text{Ir}_{1,51}\text{Pt}_{0,21}\text{Rh}_{0,18})_{1,90}\text{S}_{4,11}$
22	7,42	52,37	0,00	0,00	23,54	0,00	3,28	0,00	2,70	0,16	8,06	97,53	$(\text{Cu}_{0,71}\text{Fe}_{0,27})_{0,98}(\text{Ir}_{1,52}\text{Pt}_{0,21}\text{Rh}_{0,18})_{1,90}\text{S}_{4,10}$
23	0,00	63,58	0,00	0,00	23,85	0,00	12,02	0,00	0,06	0,00	0,00	99,79	$(\text{Ir}_{1,39}\text{Rh}_{0,49}\text{Pt}_{0,01})_{1,89}\text{S}_{3,12}$
24	0,35	0,63	67,90	0,00	26,05	0,33	2,90	0,00	0,11	0,00	0,00	98,27	$(\text{Os}_{0,89}\text{Rh}_{0,07}\text{Ir}_{0,01}\text{Ru}_{0,01})_{0,98}\text{S}_{2,02}$
25	0,00	0,60	63,41	0,00	26,86	0,73	5,62	0,00	0,10	0,00	0,00	97,61	$(\text{Os}_{0,81}\text{Rh}_{0,13}\text{Ru}_{0,02}\text{Ir}_{0,01})_{0,97}(\text{S}_{2,02}\text{As}_{0,01})_{2,03}$
26	0,00	11,52	56,58	2,27	24,96	1,19	2,55	0,00	0,10	0,00	0,03	99,20	$(\text{Os}_{0,74}\text{Ir}_{0,15}\text{Rh}_{0,06}\text{Ru}_{0,03})_{0,98}(\text{S}_{1,94}\text{As}_{0,08})_{2,02}$
27	0,00	5,11	35,30	0,00	31,31	25,63	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	97,60	$(\text{Ru}_{0,53}\text{Os}_{0,39}\text{Ir}_{0,06}\text{Rh}_{0,01})_{0,99}\text{S}_{2,03}$
28	0,00	6,16	33,65	0,00	31,41	26,09	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	97,73	$(\text{Ru}_{0,53}\text{Os}_{0,37}\text{Ir}_{0,07}\text{Rh}_{0,01})_{0,98}\text{S}_{2,03}$
29	0,00	6,24	18,78	0,00	34,66	38,27	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	98,04	$(\text{Ru}_{0,71}\text{Os}_{0,19}\text{Ir}_{0,06})_{0,96}\text{S}_{2,04}$
30	0,22	4,36	13,46	0,00	35,22	43,89	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	97,34	$(\text{Ru}_{0,80}\text{Os}_{0,13}\text{Ir}_{0,04})_{0,97}\text{S}_{2,02}$
31	0,43	5,38	6,89	0,00	36,31	47,68	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00	97,33	$(\text{Ru}_{0,84}\text{Os}_{0,06}\text{Ir}_{0,05}\text{Rh}_{0,01}\text{Pd}_{0,01})_{0,97}\text{S}_{2,03}$
32	0,00	1,17	3,19	0,00	38,17	55,56	0,00	0,38	0,00	0,00	0,00	98,81	$(\text{Ru}_{0,93}\text{Os}_{0,03}\text{Ir}_{0,01}\text{Rh}_{0,01}\text{Pd}_{0,01})_{0,99}\text{S}_{2,02}$

Примечание. 1 – осмий, 2–5 – сперрилит  $\text{PtAs}_2$ , 6 – холлингвортит  $\text{RhAsS}$ , 7–12 – ирарсит  $\text{IrAsS}$ , 13–14 – куперит  $\text{PtS}$ , 15–16 – купрородсит  $\text{CuRh}_2\text{S}_4$ , 17–22 – купроиридсит  $\text{CuIr}_2\text{S}_4$ , 23 – кашинит  $\text{Ir}_2\text{S}_3$ , 24–26 – эрликманит  $\text{OsS}_2$ , 27–32 – лаурит  $\text{RuS}_2$ .

Note. 1 - osmium, 2-5 - sperrylite  $\text{PtAs}_2$ , 6 - hollingworthite  $\text{RhAsS}$ , 7-12 - irarsite  $\text{IrAsS}$ , 13-14 - cooperite  $\text{PtS}$ , 15-16 - cuprorodsit  $\text{CuRh}_2\text{S}_4$ , 17-22 - cuproiridsit  $\text{CuIr}_2\text{S}_4$ , 23 - kashinite  $\text{Ir}_2\text{S}_3$ , 24-26 - erlichmanite  $\text{OsS}_2$ , 27-32 - laurite  $\text{RuS}_2$ .

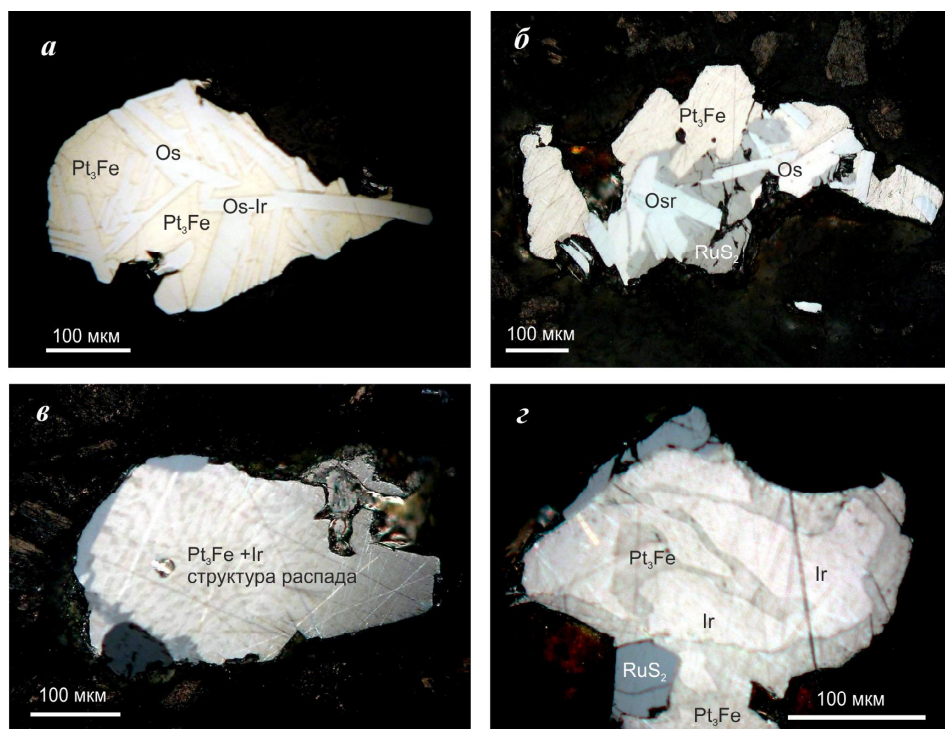
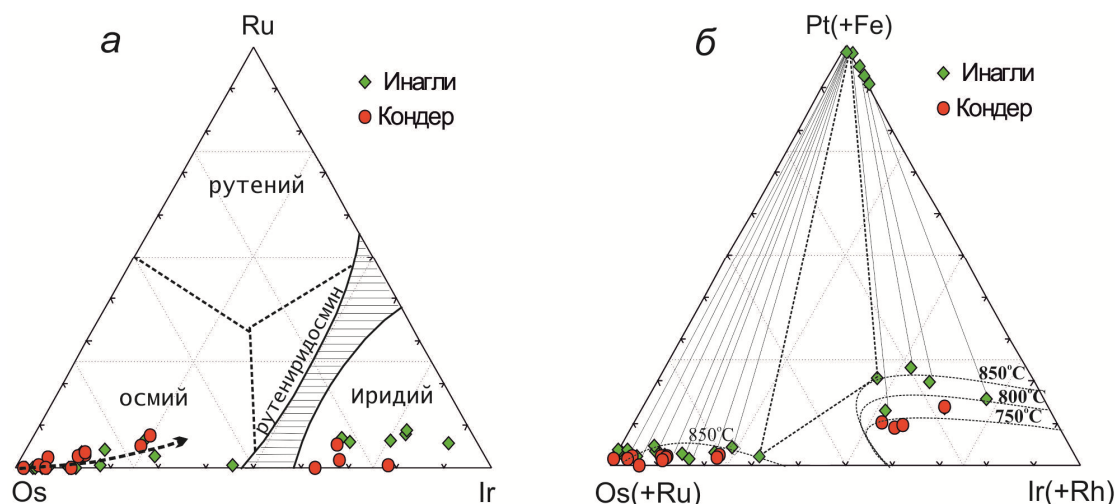


Рис. 9. Магматические микропарагенезисы Иналинского массива: а, б – изоферроплатино-осмиевый в равновесии с лауритом (б); в, г – изоферроплатино-иридиевый (структуры распада)

Fig. 9. Magmatic microparageneses of the Inali massif: а, б - isoferroplatinum-osmium in equilibrium with laurite (б); в, г - isoferroplatinum - iridium (decomposition structure)



**Рис. 10. Составы Os-Ir-Ru сплавов (а) и магматические парагенезисы (б)**

Данные по Кондеру из [Некрасов и др., 1994], изотермы из [Slansky et al., 1991]

**Fig. 10. Os-Ir-Ru alloys (a) and magmatic parageneses (b)**

Data on Konder are taken from [Nekrasov et al., 1994], isotherms from [Slansky et al., 1991]

Источником платины для образования куперита и сперрилита могли быть первичные магматические Pt-Fe сплавы, на которые воздействовали реакционные флюиды, содержащие медь и переотлагающие платину в форме туламинита и куперита на Кондере и сперрилита на Инагли. Наиболее ярко роль этих флюидов проявлена в коренных породах Кондерского массива, где пористые зерна вторичных Pt-Fe-Cu сплавов находятся в ассоциации с куперитом. Сходство минеральных ассоциаций и близкие соотношения МПГ в дунитах и клинопироксенитах на контакте могут свидетельствовать, что минеральные парагенезисы здесь генетически не зависят от вмещающей матрицы пород. Основным фактором их отложения, скорее всего, являются проницаемые трещиноватые дуниты, по которым мигрировал остаточный флюидонасыщенный расплав, обогащенный ЭПГ, и осаждался на контакте в обоих породах.

Таким образом, минералы платиновых металлов из массивов Кондер и Инагли имеют типоморфные признаки, характерные для зональных мафит-

ультрамафитовых массивов Урало-Аляскинского типа: преобладание Pt-Fe сплавов в обоих массивах, развитие двух магматических парагенезисов, которые существенно проявлены на Инагли, обилие включений сульфидов: лаурита-эрликманита  $(\text{Ru,Os})\text{S}_2$ , кашинита-баоита  $(\text{Ir,Rh})_2\text{S}_3$ , купроиридсита-купрородсита  $(\text{Ir,Rh})_2(\text{Cu,Fe})\text{S}_4$  в ассоциациях обоих массивов и образование постмагматического куперита PtS в ассоциации с туламинитом  $\text{Pt}_2\text{CuFe}$  на Кондерском массиве и сперрилита,  $\text{PtAs}_2$  на Инагли. Выявлено, что наиболее перспективными участками поисков коренной платиновой минерализации являются контактовые зоны дунитов и клинопироксенитов, что может быть использовано в прогнозных поисках.

*Работа выполнена в лаборатории петрологии и рудоносности магматических формаций Института геологии и минералогии Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск по базовому проекту № 0330-2016-0003.*

#### ЛИТЕРАТУРА

- Андреев Г.В. Кондерский массив ультраосновных и щелочных пород. Новосибирск : Наука, 1987. 76 с.  
 Благородные металлы : справ. изд. / под ред. Е.М. Савицкого. М. : Металлургия, 1984. 592 с.  
 Богомолов М.А. Некоторые особенности петрологии массивов центрального типа с дунитовым ядром на Алданском щите // Метасоматизм и другие вопросы физико-химической петрологии. М. : Наука, 1968. С. 312–363.  
 Генкин А.Д. Последовательность и условия образования минералов платиновой группы в Нижне-Тагильском дунитовом массиве // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39, № 1. С. 41–48.  
 Лазаренков В.Г., Малич К.Н. Геохимия ультрабазитов платиноносного кондерского комплекса // Геохимия. 1991. № 10. С. 1406–1418.  
 Лихачев А.П., Кириченко В.Т., Лопатин Г.Г., Кириченко А.А., Дерягина Г.Г., Рудашевский Н.С., Ботова М.М. К особенностям платиноносности массивов щелочно-ультраосновной формации // Записки ВМО. 1987. Ч. 116, вып. 1. С. 122–125.

**Малич К.Н.** Особенности распределения элементов платиновой группы в породах ультраосновных массивов Алданского щита // Геохимия. 1990. № 3. С. 425–429.

**Мочалов А.Г., Жерновский И.В., Дмитриенко Г.Г.** Состав и распространенность самородных минералов платины и железа в ультрамафитах // Геология рудных месторождений. 1988. № 5. С. 47–58.

**Некрасов И.Я., Иванов В.В., Ленников А.М. и др.** Новые данные о платиноидной минерализации щелочно-ультраосновных концентрически-зональных массивов Дальнего Востока // Доклады АН СССР. 1991. Т. 320, № 3. С. 705–709.

**Некрасов И.Я., Ленников А.М., Октябрьский Р.А., Залищак Б.Л., Сапин В.И.** Петрология и платиноносность кольцевых щелочно-ультраосновных комплексов. М.: Наука, 1994. 381 с.

**Округин А.В.** Кристаллизационно-ликвационная модель формирования платиноидно-хромитовых руд в мафит-ультрамафитовых комплексах // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23, № 2. С. 63–76.

**Округин А.В.** Минеральные парагенезисы и генезис самородков изоферроплатины из россыпи Инагли (Сибирская платформа) // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43, № 3. С. 268–279.

**Приходько В.С., Пономарев Г.П.** Составы породообразующих минералов дунитов Кондерского массива // Тихоокеанская геология. 1990. № 2. С. 59–69.

**Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Заккарини Ф.** Хром-платиновое оруденение нижнетагильского типа на Урале: структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса // Литосфера. 2007. № 3. С. 28–65.

**Пушкарев Е.В., Каменецкий В.С., Морозова А.В., Хиллер В.В., Главатских С.П., Родемани Т.** Онтогенез рудных хромшпинелидов и состав включений как индикаторы пневматолито-гидротермального образования платиноносных хромитов массива Кондер (Алданский щит) // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 5. С. 394–423.

**Разин Л.В.** К вопросу о генезисе платинового оруденения форстеритовых дунитов // Геология рудных месторождений. 1968. № 6. С. 10–27.

**Разин Л.В.** Платиновая металлоносность Инаглинского массива ультраосновных и щелочных пород (Алданский щит): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1966.

**Рожков И.С., Кицул В.И., Разин Л.В.** Платина Алданского щита. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 280 с.

**Рудашевский Н.С., Меньшиков Ю.П., Мочалов А.Г., Трубкин Н.В., Шумская Н.И., Жданов В.В.** Купрородсит  $\text{CuRh}_2\text{S}_4$  и купроиридсит  $\text{CuIr}_2\text{S}_4$  – новые природные тиошпинели платиновых элементов // Записки ВМО. 1985. Ч. 114, вып. 2. С. 187–195.

**Рудашевский Н.С., Мочалов А.Г., Бегизов В.Д., Меньшиков Ю.П., Шумская Н.И.** Инаглиит  $\text{Cu}_3\text{Pb}(\text{Ir}, \text{Pt})_8\text{S}_{16}$  – новый минерал // Записки ВМО. 1984. Ч. 113, вып. 6. С. 712–717.

**Сидоров Е.Г., Козлов А.П., Толстых Н.Д.** Гальмоэнанский базит-гипербазитовый массив и его платиноносность. М.: Научный мир, 2012. 288 с.

**Толстых Н.Д., Кривенко А.П.** Минералы платиновых металлов в россыпи р. Инагли (Алданский щит) // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 4. С. 765–774.

**Толстых Н.Д., Кривенко А.П., Батурич С.Г.** Особенности состава самородной платины из различных ассоциаций минералов элементов платиновой группы // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 3. С. 39–46.

**Толстых Н.Д., Толегин Ю.М., Козлов А.П.** Коренная платина Светлоборского и Каменушинского массивов платиноносного пояса Урала // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 6. С. 775–793.

**Чащухин И.С., Вотяков С.Л., Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Миронов А.Б., Уймин С.Г.** Окситермобарометрия ультрамафитов платиноносного пояса Урала // Геохимия. 2002. № 8. С. 846–863.

**Amosse J., Dable P., Allibert M.** Thermochemical behaviour of Pt, Ir, Rh and Ru vs  $f\text{O}_2$  and  $f\text{S}_2$  in a basaltic melt. Implications for the differentiation and precipitation of these elements // Mineralogy and Petrology. 2000. V. 68. P. 29–62.

**Cabri L.J., Feather C.E.** Platinum-iron Alloys: a nomenclature based on a study of natural and Synthetic Alloys // Canadian Mineralogist. 1975. V. 13. P. 117–126.

**Johan Z., Ohnenstetter M., Slansky E., Barron L.M., Suppel D.** Platinum mineralization in the Alaskan-type intrusive complexes near Fifield, New South Wales, Australia Part 1. Platinum-group minerals in clinopyroxenites of the Kelvin Grove prospect, Owendale intrusion // Mineralogy and Petrology. 1989. V. 40. P. 289–309.

**Johan Z., Slansky E., Kelly D.A.** Platinum nuggets from the Kompam area, Enga Province, Papua New Guinea: evidence for an Alaskan-type complex // Mineralogy and Petrology. 2000. V. 68. P. 159–176.

**Roeder P.L., Jamieson H.E.** Composition of chromite and co-existing Pt-Fe alloy at magmatic temperatures // Australian Journal of Earth Sciences. 1992. V. 39. P. 419–426.

**Slansky E., Johan Z., Ohnenstetter M., Barron L.M., Suppel D.** Platinum mineralization in the Alaskan-type intrusive complexes New Fifield, N.S.W., Australia. Part 2. Platinum-group minerals in placer deposits at Fifield // Mineralogy and Petrology. 1991. V. 43. P. 161–180.

**Tolstykh N., Kozlov A., Telegin Yu.** Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Ural Platinum Belt // Ore Geology Reviews. 2015. V. 67. P. 234–243.

**Tolstykh N., Krivenko A., Sidorov E., Laajoki K., Podlipsky M.** Ore mineralogy of PGM placers in Siberia and the Russian Far East // Ore Geology Review. 2002. V. 20. P. 1–25.

#### Автор:

**Толстых Надежда Дмитриевна**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория петрологии и рудоносности магматических формаций, Институт геологии минералогии им. академика В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия. E-mail: [tolst@igm.nsc.ru](mailto:tolst@igm.nsc.ru)

N.D. Tolstykh

## PLATINUM MINERALIZATION OF THE KONDER AND INAGLY MASSIFS

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia

The genetic model of formation of platinum mineralization in the Konder and Inagli massifs is justified. It is established that the ore-forming system on these massifs evolved with increasing Ir and Pt from isoferroplatinum-osmium to isoferroplatinum-iridium magmatic parageneses. The presence of S in the system led to the formation of laurite and erlichmanite ( $\text{RuS}_2$ ,  $\text{OsS}_2$ ) in equilibrium with magmatic parageneses. A gradual increase in sulfur activity in the ore-forming systems of both massifs and an increase in arsenic activity on Inagli led to the formation of sulfides and sulfoarsenides of Ir and Rh: kashinite  $(\text{Ir,Rh})_2\text{S}_3$ , irarsite  $(\text{Ir,Rh})\text{AsS}$ , EPG-thiospinels  $(\text{Ir,Rh})_2(\text{Cu,Fe})\text{S}_4$  and the formation of cooperite and sperrylite ( $\text{PtS}$  and  $\text{PtAs}_2$ ) at the postmagmatic stages. It was revealed that the most promising areas for the search for lode platinum mineralization are the contact zones of dunites and clinopyroxenites, which can be used in predictive searches.

**Keywords:** Aldan Shield, Ural-Alaskan intrusions, platinum mineralization.

## References

- Andreev G.V. *Konderskiy massiv ul'traosnovnykh i shchelochnykh porod* [Kondersky massif of ultramafic and alkaline rocks]. Novosibirsk: Nauka, 1987. 76 p. In Russian
- Blagorodnye metally [Noble metals]: Ref. ed. / Ed. EM Savitskiy. Moscow : Metallurgy, 1984, 592 p. In Russian.
- Bogomolov M.A. *Nekotorye osobennosti petrologii massivov tsentral'nogo tipa s dunitovym yadrom na Aldanskom shchite* [Some features of petrology of the central type massifs with a dunite core on the Aldan Shield] // Metasomatism and other problems of physico-chemical petrology. Moscow : Nauka, 1968. pp. 312–363. In Russian
- Genkin A.D. Sequence and conditions of formation of minerals of the platinum group in the Nizhny Tagil dunite mass // *Geology of ore deposits*. 1997. V. 39. № 1. pp. 41–48. In Russian
- Lazarenkov V.G., Malich K.N. *Geokhimiya ul'trabazitov platinonosnogo konderskogo kompleksa* [Geochemistry of ultramafites of the platinum-bearing Konder complex] // *Geochemistry*. 1991. № 10. pp. 1406–1418. In Russian
- Likhachev A.P., Kirichenko V.T., Lopatin G.G., Kirichenko A.A., Deryagina G.G., Rudashevsky N.S., Botova M.M. *K osobennostyam platinonosnosti massivov shchelochno-ul'traosnovnoy formatsii* [To the features of platinum potential of the massifs of the alkaline-ultramafic formation] // *Zapiski VMO (Proceedings of the All-Union Mineralogical Society)*. 1987. Part 116. Issue. 1. pp. 122–125. In Russian
- Malich K.N. *Osobennosti raspredeleniya elementov platinovoy gruppy v porodakh ul'traosnovnykh massivov Aldanskogo shchita* [Peculiarities of the distribution of elements of the platinum group in the rocks of the ultramafic massifs of the Aldan Shield] // *Geochemistry*. 1990. № 3. pp. 425–429. In Russian
- Mochalov A.G., Zhernovskiy I.V., Dmitrienko G.G. *Sostav i rasprostranennost' samorodnykh mineralov platiny i zheleza v ul'tramafitakh* [Composition and prevalence of native minerals of platinum and iron in ultramafites] // *Geology of ore deposits*. 1988. № 5. pp. 47–58. In Russian
- Nekrasov I.Ya., Ivanov V.V., Lennikov A.M. *Novye dannye o platinoidnoy mineralizatsii shchelochno-ul'traosnovnykh kontsentricheski-zonal'nykh massivov Dal'nego Vostoka* [The new data on the platinum mineralization of alkaline-ultramafic concentric-zonal massifs of the Far East] // *Doklady AN SSSR (Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR)*. 1991. T. 320. № 3. pp. 705–709. In Russian
- Nekrasov I.Ya., Lennikov A.M., Oktyabrsky R.A., Zalizhchak B.L., Sapin V.I. *Petrologiya i platinonosnost' kol'tsevykh shchelochno-ul'traosnovnykh kompleksov* [Petrology and platinum potential of circular alkaline-ultramafic complexes]. Moscow: Nauka, 1994. 381 p. In Russian
- Okrugin A.V. Mineral parageneses and genesis of isoferroplatinum nuggets from Inagli placer (Siberian platform) // *Geology of ore deposits*. 2001. P. 43. № 3. pp. 239–250. In Russian
- Okrugin A.V. *Kristallizatsionno-likvatsionnaya model' formirovaniya platinoidno-khromitovykh rud v mafit-ul'tramafitovykh kompleksakh* [Crystallization-liquation model of formation of platinum-chromite ores in mafic-ultramafic complexes] // *Tikhookeanskaya geologiya*. 2004. V. 23. № 2. pp. 63–76. In Russian
- Prihod'ko V.S., Ponomarev G.P. *Sostavy porodoobrazuyushchikh mineralov dunitov Konderskogo massiva* [Compositions of rock-forming minerals of dunites of the Konder massif] // *Tikhookeanskaya geologiya*. 1990. № 2. pp. 59–69. In Russian
- Pushkarev E.V., Anikina E.V., Garuti J., Zaccarini F. *Khrom-platinovoe orudenenie nizhnetagil'skogo tipa na Urale: strukturno-veshchestvennaya kharakteristika i problema genezisa* [Chromium-platinum mineralization of the Nizhny Tagil type in the Urals: structural-material characteristic and problem of genesis] // *Lithosphere*. 2007. V. 3. pp. 28–65. In Russian
- Pushkarev E.V., Morozova A.V., Khiller V.V., Glavatskiykh S.P., Kamenetsky V.S., Rodemann T. Ontogeny of ore Cr-spinel and composition of inclusions as indicators of the pneumatolytic-hydrothermal origin of PGM-bearing chromitites from Kondyor massif, the Aldan Shield // *Geology of Ore Deposits*. 2015. T. 57. № 5. pp. 352–380.
- Razin L.V. *K voprosu o genezise platinovogo orudeneniya forsteritovykh dunitov* [To the question of the Genesis of platinum mineralization of forsterite dunites] // *Geology of Ore Deposits*. 1968. № 6. pp. 10–27. In Russian
- Razin L.V. *Platinovaya metallonost' Inaglinskogo massiva ul'traosnovnykh i shchelochnykh porod (Aldanskiy shchit): Avtoref. dis. na soiskanie uchenoy stepeni kand. geol.-min. nauk* [Platinum metalliferousness of the Inagli massif of the ultramafic and alkaline rocks (Aldan Shield): Author's abstract. dis. for the academic degree of cand. geol.-min. sciences]. Moscow, 1966. In Russian
- Rozhkov I.S., Kitsul V.I., Razin L.V. *Platina Aldanskogo shchita* [Platinum of the Aldan Shield]. Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1962. 280 p. In Russian
- Rudashevsky N.S., Menshikov Yu.P., Mochalov A.G., Trubkin N.V., Shumskaya N.I., Zhdanov V.V. *Kuprorodsit  $\text{CuRh}_2\text{S}_4$  i kuproiridsit  $\text{CuIr}_2\text{S}_4$  – novye prirodnye tioshpineli platinovykh elementov* [Curorodsit  $\text{CuRh}_2\text{S}_4$  and cuproiridsit  $\text{CuIr}_2\text{S}_4$  – the new

- natural thiospinels of platinum elements // *Zapiski VMO* (Proceedings of the All-Union Mineralogical Society). 1985. P. 114. Iss. 2. pp. 187–195. In Russian
- Rudashevsky N.S., Mochalov A.G., Begizov V.D., Menshikov Yu.P., Shumskaya N.I. *Inagliit  $Cu_3Pb(Ir,Pt)_8S_{16}$  - novyy mineral* [Inaglite  $Cu_3Pb(Ir,Pt)_8S_{16}$  - a new mineral] // *Zapiski VMO* (Proceedings of the All-Union Mineralogical Society). 1984. P. 113. Iss. 6. pp. 712–717. In Russian
- Sidorov E.G., Kozlov A.P., Tolstykh N.D. *Gal'moenanskiy bazit-giperbazitovyy massiv i ego platinonost'* [Galmoechnan mafic-ultramafic massif and its platinum potential]. Moscow : Nauchnyy mir, 2012. 288 p. In Russian
- Tolstykh N.D., Krivenko A.P., Baturin S.G. *Osobennosti sostava samorodnoy platiny iz razlichnykh assotsiatsiy mineralov elementov platinovoy gruppy* [Features of the composition of native platinum from various associations of minerals of elements of the platinum group] // *Geologiya i geofizika*. 1996. V. 37. № 3. pp. 39–46. In Russian
- Tolstykh N.D., Krivenko A.P. *Mineraly platinovykh metallov v rossypi r. Inagli (Aldanskiy shchit)* [Minerals of platinum metals in Inagli placer (Aldan Shield)] // *Geology and Geophysics*. 1997. V. 38. № 4. pp. 765–774. In Russian
- Tolstykh N.D., Telegin Yu.M., Kozlov A.P. Platinum mineralization of the Svetloborsky and Kamenushinsky massifs (Urals Platinum Belt) // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. V. 52, № 6 pp. 603–619.
- Chashchukhin I.S., Votyakov S.L., Pushkarev E.V., Anikina E.V., Uimin S.G., Mironov A.B. Oxithermobarometry of ultramafic rocks from the Ural platinum belt // *Geochemistry International*. 2002. V. 40. № 8. pp. 762–778.
- Amosse J., Dable P., Allibert M. Thermochemical behaviour of Pt, Ir, Rh and Ru vs  $fO_2$  and  $fS_2$  in a basaltic melt. Implications for the differentiation and precipitation of these elements // *Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 68. pp. 29–62.
- Cabri L.J., Feather C.E. Platinum-iron Alloys: a nomenclature based on a study of natural and Synthetic Alloys // *Canadian Mineralogist*. 1975. V. 13. pp. 117–126.
- Johan Z., Ohnenstetter M., Slansky E., Barron L.M., Suppel D. Platinum mineralization in the Alaskan-type intrusive complexes near Fifield, New South Wales, Australia Part 1. Platinum-group minerals in clinopyroxenites of the Kelvin Grove prospect, Owendale intrusion // *Mineralogy and Petrology*. 1989. V. 40. pp. 289–309.
- Johan Z., Slansky E., Kelly D.A. Platinum nuggets from the Kompian area, Enga Province, Papua New Guinea: evidence for an Alaskan-type complex // *Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 68. P. 159–176.
- Roeder P.L., Jamieson H.E. Composition of chromite and co-existing Pt-Fe alloy at magmatic temperatures // *Australian Journal of Earth Sciences*. 1992. V. 39. P. 419–426.
- Slansky E., Johan Z., Ohnenstetter M., Barron L.M., Suppel D. Platinum mineralization in the Alaskan-type intrusive complexes New Fifield, N.S.W., Australia. Part 2. Platinum-group minerals in placer deposits at Fifield // *Mineralogy and Petrology*. 1991. V. 43. P. 161–180.
- Tolstykh N., Kozlov A., Telegin Yu. Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Ural Platinum Belt // *Ore Geology Reviews*. 2015. V. 67. P. 234–243.
- Tolstykh N., Krivenko A., Sidorov E., Laajoki K., Podlipsky M. Ore mineralogy of PGM placers in Siberia and the Russian Far East // *Ore Geology Reviews*. 2002. V. 20. pp. 1–25.

**Author:**

**Tolstykh Nadezda D.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Petrology and Ore-bearing Magmatic Formations, Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: tolst@igm.nsc.ru