УДК 553.491.8(470.5)

# СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КОМПЛЕКСОВ ПЛАТИНОНОСНОГО ПОЯСА УРАЛА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ХРОМИТ-ПЛАТИНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛЬСКОГО ТИПА Часть II

Ю.А. Волченко\*, К.С. Иванов\*, В.А. Коротеев\*, Т. Оже\*\*

\*Институт геологии и геохимии УрО РАН 620151, г. Екатеринбург, Почтовый пер., 7 E-mails: ivanovks@igg.uran.ru \*\*Бюро горно-геологических исследований Авеню Клод-Жиллемин, 3, ВР 6009, 45060 Орлеан, Франция E-mail: t.auge@brgm.fr Поступила в редакцию 13 сентября 2006 г.

Установлена латеральная зональность в размещении разностей хромит-платинометальных руд уральского типа. В апикальной части дунитовых ядер массивов проявлен наиболее ранний, хромитовый подтип иридиево-платиновых руд, формирующий многочисленные небольшие и разобщенные гнездо- и штоко- трубообразные рудные тела с пятнисто-петельчатыми и брекчиевидными текстурами. В приапикальных частях дунитовых тел находятся маломощные протяженные зоны каемчатых жил с пятнисто-прожилково-вкрапленной и полосчатой текстурами – дунитовый подтип платиновых руд. В периферических частях дунитовых тел, в зонах контакта с клинопироксенитами, присутствуют жильные тела пироксенит-пегматитов (дунит-пегматитов) с хром-титаномагнетитовыми и палладиево-платиновыми рудами, обладающими вкрапленно-петельчатыми, сидеронитовыми и брекчиевидными текстурами – пегматитовый подтип платинометальных руд. Россыпеобразующая способность платинометальных руд уральского типа к заключительным стадиям их формирования резко падает. В целом, образование и преобразование хромит-платинометальных ных руд уральского типа происходило в рамках постмагматического этапа их эволюции.

Ключевые слова: Платиноносный пояс, Урал, дуниты, платина, хромит-платинометальные руды.

# STRUCTURAL-SUBSTANTIAL EVOLUTION OF THE URALS PLATINIFEROUS BELT'S COMPLEXES IN THE TIME OF URALIAN TYPE CHROMITE-PLATINUM DEPOSITS FORMATION Part II

Yu.A. Volchenko\*, K.S. Ivanov\*, V.A. Koroteev\*, T. Auge\*\* \*Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS \*\*BRGM, Orleans cedex 2, France

It was established lateral zonation in distribution of type varieties of chromite-platinum ores. In apical part of dunite cores of the massifs it was exposed the earliest chromite subtype of iridium-platinum ores forming numerous small segregated nest- and stock-tube-like bodies with spotted-looped and breccia-like textures. In preapical parts of dunite bodies there are extended zones of limbate small thickness veins which have spotted-veinlet-impregnated and banded textures. This is a dunite subtype of platinum ores. At periphery parts of dunite bodies, in zones of contact with clinopyroxenites, there are piroxenite-pegmatites (dunite-pegmatites) vein bodies with chrome-titanium-magnetite and palladium-platinum ores, with impregnated-looped, sideronite and breccia-like textures – a pegmatite subtype of platinum ores. Placer-forming ability of the Uralian type platinum ores sharply decreases by the final stages of their formation. In general, the formation and transformation of the Uralian type chromite-platinum ores occured during postmagmatic stage of their evolution.

Key words: Platiniferous belt, the Urals, dunites, platinum, chromite-platinum ores.

# Текстурные и минералогогеохимические особенности платиновых руд уральского типа: хромитовый, дунитовый, пегматитовый, подтипы руд

Текстурные и минералого-геохимические особенности выделенных в объеме уральского типа трех подтипов платиновых руд (хромитового, дунитового и пегматитового) рассмотрены на примере наиболее крупных и типичных их представителей – месторождений Госшахта, Дунитовое и Бутыринское, с привлечением данных по другим известным объектам.

### Хромитовый подтип

Месторождение Госшахта открыто старателями в 1909 году в глубоко врезанном борту левого притока Соловьева Лога. Отрабатывалось в течение более 30 лет до глубины 183 метра (рис. 1). Хромит-платиновые руды отличались исключительным богатством при крайне неравномерном распределении платины. По ориентировочной оценке, количество добытой на месторождении платины в целом составляет около 400 кг. В элювии, на вскрытой поверхности, месторождение представляло собой крупное гнездообразное обособление хромшпинелида в дунитах, имеющее неоднородное и сложное внутреннее строение и состоящее из серии сближенных хромит-платиновых линзочек, жилок, гнезд. Вскрытое позднее тремя шахтами и многочисленными подземными горными выработками трубообразное хромит-платиновое рудное тело имело диаметр от 2 до 5-7 м, восток-юго-восточное склонение под углами 60-70°. Сложное внутреннее строение рудного тела определялось системой субпараллельных и переплетающихся жилок, линз и струе- веретенообразных обособлений хромшпинелида с многочисленными ответвлениями-апофизами, расходящимися во все стороны и создающими общую картину дунит-хромитовых брекчий (рис. 1, 2). Выдержанный текстурный рисунок – смешанно-петельчатые, пятнистые, брекчиевидные текстуры руд – прослеживался по падению рудного тела с глубины 6 м до 47 м. С глубиной морфология рудного тела принципиально не изменялась, однако площадь поперечных сечений варьировала от 2 до 10 м<sup>2</sup>. Как отмечает А.Н. Заварицкий [1928], рудное тело «не было резко отграничено от окружаюшлирами с расплывчатыми очертаниями, частью резко ограниченными линзами, наподобие апофиз, расходящихся во все стороны». Для этих «отпрысков» рудного тела размером 1-2 × 10-30 см характерен пористый хромит с параллельными трещиноподобными пустотами, стенки которых, помимо хромшпинелида, покрыты кристаллами хромистого граната, хромистого хлорита и других минералов. Сопровождающие рудное тело апофизы имеют субмеридиональное простирание с крутым падением к востоку. В приповерхностных частях месторождения содержание платины изменялось от 10-50 г/т до 400 г/т и, в отдельных случаях, даже до 10 кг/т, составляя в среднем до глубины 7 м 419 г/т [Высоцкий, 1923, 1925]. На глубине 15 м (граница старательской отработки) среднее содержание изменялось от 60 до 125 г/т. Для различных более глубоких горизонтов средние содержания оцениваются от 5 до 50 г/т [Заварицкий, 1928]. Ниже горизонта 110 м (рис. 1) среднее содержание платины, по данным Г.В. Фосса [1931], составляло около 5 г/т с прогрессирующим снижением вниз и уменьшением масштабов хромит-платиновой минерализации, вплоть до выклинивания ее на отдельных интервалах.

шего дунита, но сопровождалось частью

Данные о составе главных сосуществующих минералов руд этого месторождения (хромшпинелид, оливин, платина) в литературе отсутствуют и приводятся нами впервые на основе аппаратурного изучения музейных образцов и образцов из частных коллекций, характеризующих второй, третий и четвертый горизонты Госшахты, вплоть до глубины 94 м (рис. 1). Исследованные образцы руд представлены дунитами со сближенными гнездообразными обособлениями (0,5-1 × 2-3 см) и маломощными (0,5-1-3 см) прожилками хромшпинелида с видимой вкрапленностью и линейными цепочечными агрегатами платины размером от 0,1-1 до 2-3 мм. Хромшпинелид гнезд и прожилков, как правило, средне-, крупнозернистый с размером зерен от 0,5-1 мм до 2-3 мм, катаклазированный. Сечется сетью прожилков карбоната, хризотила и офита мощностью от 0,1 до 0,5 мм, продолжающихся за пределами этих обособлений в виде тонких не минерализованных трещин в дунитах. Каймы осветления дунитов около хромит-платиновых гнезд и прожилков либо отсутствуют, либо имеют незначительную (0,5-5 мм) мощность. Силикатный цемент руд сложен олиРt в г/т на различных уровнях Госшахты





Рис. 1. Продольный и поперечные разрезы месторождения платины Госшахта.

Проекция на вертикальную плоскость по линии падения рудного тела (азимут 132°40′). Ориентированные поперечные разрезы для 10 разных сечений Госшахты. Составлено Ю.А. Волченко, С.И. Нестеровой по первичным геологическим материалам треста «Уралплатина» в 2002г.







B

винами, хлоритами, серпентинами, слюдами, а также карбонатами. Постоянно присутствует свежий оливин в виде зерен размером от 0,2-0,4 до 0,7-1,0 мм. Железистость оливина (табл. 1) изменяется в пределах от 4,5 до 7,7 мол. %, в среднем составляя 6,2 мол. %. Микровключения оливина в хромшпинелидах руд фиксируют еще более низкую железистость – 2,5-3,7 мол. %. Среднее содержание CaO в оливине цемента руд – 0,22 мас. %, более низкое, чем в оливина нах негативной геохимической аномалии по скважине G-6, составляющее 0,25 мас. %.

Рис. 2. Характерные текстуры хромитплатиновых руд хромитового подтипа.

а. Брекчиевидная текстура руд, цемент оливин-лизардитовый. Черное – хромшпинелид. Месторождение Крутой Лог (разрез № 400). Обр. 51В.

б. Брекчиевидная текстура руд, цемент хлорит-оливин-лизардитовый. Черное – хромшпинелид. Месторождение Александровское (разрез № 80). Обр. 76В.
в. Пятнисто-петельчатая текстура руд, цемент оливин-хлорит-лизардитовый. Черное – хромшпинелид. Месторождение Сырковский Лог. (Скв. 2, Обр. 53В).

Хромшпинелид по составу отвечает высокохромистым (Cr/Cr + Al = 0,78-0,85) предельно магнезиальным (Mg/Mg + Fe<sup>2+</sup> = 0,56-0,77) разностям (табл. 2, рис. 3).

Платина в рудах месторождения Госшахта присутствует в виде вкрапленности рассеянных зерен весьма сложной неправильной формы, гнездообразных скоплений и прожилков мощностью до 1 мм и длиной до 3-5 см. Обособления платины чаще всего цементируют рудообразующий хромшпинелид, реже включены в силикатный цемент руд. Как правило, они имеют ксеноморфную форму: угловатую, сложную крючковатую, причудливую ветвистую. В катаклазированных и хлоритизированных зернах хромшпинелида постдеформационные прожилки и выделения платины секут и залечивают не только трещины катаклаза, но и прожилки цементирующего их хлорита. По соотношению основных компонентов и оптическим свойствам платина относится к двум основным минеральным видам: изоферроплатине, абсолютно преобладающей, и резко подчиненной тетраферроплатине (табл. 3). Это подтверждается и данными рентгено-структурных исследований платины. Гранулометрический анализ 100 зерен платины, извлеченных из руд месторождения Госшахта, показал, что 60 % из них имеют крупность 400-1000 мкм и более, 20 % от 100 до 400 мкм и лишь у 20 % зерен крупность менее 100 мкм. Таким образом, для руд данного представителя хромитовго подтипа наиболее характерна крупная и ксеноморфная платина, при наличии мелких самородковых выделений размером от 1 до 10 мм и более.

### Дунитовый подтип

Месторождение Дунитовое выявлено нами в 1997 году в северной-северовосточной частях нового Соловьевогорского дунитового

Таблица 1

№ пп	№ проб			Основ	вные компо	ненты			f, мол. %
		SiO <sub>2</sub>	$FeO^+$	MgO	CaO	MnO	NiO	сумма	
1	230	41,97	5,96	50,99	0,24	0,12	0,20	99,48	6,16
2	251	42,41	4,44	52,06	0,20	0,08	0,09	99,28	4,51
3	253	42,13	7,50	50,51	0,22	0,17	0,13	100,66	7,67
4	179-1	41,74	6,09	50,33	0,18	0,10	0,21	98,65	6,38
5	179-2	42,42	6,38	50,80	0,30	0,12	0,20	100,22	6,60
6	259-1	42,01	5,81	51,49	0,20	0,12	0,04	99,67	5,97
7	259-2	42,00	5,85	49,76	0,20	0,12	0,03	97,96	6,23
8	265-1	42,41	6,90	50,00	0,25	0,13	0,06	99,75	7,19
9	265-2	41,78	7,00	50,60	0,21	0,14	0,03	99,76	7,17
10	268	42,40	5,02	51,43	0,21	0,08	0,25	99,39	5,20
11	273-1	41,62	5,87	51,99	0,23	0,10	0,24	100,05	5,98
12	273-2	41,01	5,91	52,25	0,23	0,09	0,22	99,71	5,95
13	250-1	42,39	3,73	52,95	0,21	0,06	0,11	99,45	3,74
14	250-2	42,31	3,67	53,23	0,21	0,05	0,08	99,55	3,72

# Химический состав оливинов (мас. %) из цемента платиновых руд месторождения Госшахта

Примечание. Образцы из платиноносных забоев горных выработок 2, 3 и 4 горизонтов Госшахты. Анализы выполнены методами РСМА на приборе JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитик В.Г. Гмыра). FeO<sup>+</sup> – все железо в виде FeO.

Таблица 2

Химический	состав	(мас.	%)	хромшпинелидов
из платин	овых ру	уд хрс	мит	ового подтипа

№ пп	№ обр.			Основ	ные комі		Cr/ (Cr + Al)	$\frac{\text{Mg}}{(\text{Mg} + \text{Fe}^{2^+})}$		
		TiO <sub>2</sub>	$Al_2O_3$	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>+</sup>	MnO	MgO	Сумма		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	231-1	0,44	8,26	52,19	24,12	0,50	11,76	97,27	0,81	0,60
2	249-1	0,44	8,10	55,81	19,50	0,44	14,78	99,07	0,82	0,72
3	249-2	0,44	8,13	59,12	16,33	0,61	16,04	100,67	0,83	0,77
4	249-3	0,48	8,35	57,36	17,73	0,62	15,34	99,88	0,82	0,75
5	250	0,42	7,37	55,42	22,90	0,56	13,37	100,04	0,84	0,66
6	251	0,45	7,35	54,64	24,71	0,63	12,85	100,63	0,83	0,63
7	255	0,44	7,50	56,57	22,25	0,59	13,18	100,53	0,84	0,65
8	255	0,45	7,50	55,21	22,35	0,59	13,39	99,49	0,83	0,66
9	257	0,54	8,26	49,79	28,79	0,50	12,01	99,89	0,80	0,59
10	176-1	0,36	7,43	56,25	22,90	0,56	11,85	99,35	0,84	0,59
11	176-1	0,36	7,40	55,90	23,37	0,59	11,93	99,55	0,84	0,60
12	177	0,48	8,36	52,71	24,09	0,53	12,74	98,91	0,81	0,63
13	179-1	0,47	8,51	53,70	25,43	0,49	11,85	100,43	0,81	0,58
14	179-2	0,44	8,30	52,80	26,71	0,51	12,19	100,95	0,81	0,60
15	228	0,42	6,73	55,87	23,17	0,56	13,25	100,00	0,85	0,65
16	262	0,47	9,32	51,71	26,15	0,47	13,36	101,47	0,79	0,64
17	262	0,49	9,35	50,69	25,47	0,49	12,72	99,20	0,78	0,63
18	266	0,42	8,34	53,74	24,58	0,49	12,78	100,34	0,81	0,63
19	268	0,44	8,33	54,55	24,32	0,50	12,09	100,23	0,82	0,60
20	270	0,44	7,24	55,73	22,91	0,54	13,48	100,34	0,84	0,66
21	273	0,44	7,55	55,05	24,48	0,60	12,82	100,94	0,83	0,63
22	274	0,45	7,20	53,82	26,35	0,60	12,22	100,64	0,83	0,60

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
23	233	0,50	7,51	53,88	25,30	0,57	13,35	101,11	0,83	0,65
24	277	0,44	8,56	53,54	25,01	0,54	12,1	100,19	0,81	0,60
25	NT-5	0,46	7,84	52,59	28,11	0,47	10,74	100,21	0,82	0,53
26	NT-4	0,31	7,00	53,69	27,16	0,25	11,20	99,61	0,84	0,56
27	NV2-1	0,38	7,70	53,83	22,76	0,30	11,45	96,42	0,82	0,59
28	NV2-2	0,37	7,48	54,24	22,91	0,29	11,63	96,92	0,83	0,59
29	NV2-3	0,38	7,73	53,76	23,11	0,29	11,47	96,74	0,82	0,58
30	NV2-4	0,36	9,04	52,48	23,10	0,31	13,78	99,07	0,80	0,67
31	NV2-5	0,21	8,55	52,98	23,34	0,30	13,75	99,13	0,81	0,67
32	NV2-6	0,38	8,63	53,58	22,84	0,33	13,46	99,22	0,81	0,66
33	NV2-7	0,33	8,55	53,17	22,97	0,30	13,81	99,13	0,81	0,67
34	NV2-8	0,18	8,16	53,53	23,21	0,27	13,94	99,29	0,82	0,68
35	NV2-9	0,33	8,15	53,63	23,45	0,31	13,52	99,39	0,82	0,66
36	205	0,47	9,13	56,63	17,11	0,52	15,74	99,60	0,81	0,76
37	244	0,42	9,68	51,68	25,63	0,60	12,81	100,82	0,78	0,62
38	245	0,41	8,95	51,35	28,47	0,59	11,47	101,24	0,79	0,56
39	263	0,38	9,47	52,02	26,28	0,56	12,34	101,05	0,79	0,60
40	26V97	0,36	8,37	55,53	24,36	0,48	11,20	100,30	0,82	0,56
41	18AVA	0,37	7,82	55,67	23,96	0,48	12,30	100,60	0,83	0,61
42	18CVA	0,35	8,00	55,06	24,51	0,19	12,04	100,15	0,82	0,59
43	37V97	0,33	8,18	53,59	23,63	0,34	12,96	99,03	0,82	0,64
44	27V98	0,39	7,08	54,04	26,74	0,50	11,17	99,92	0,84	0,56
45	53V97	0,33	8,37	51,97	28,35	0,56	10,23	99,81	0,81	0,51

Окоппание	таблины	2
Окончание	таолицы	4

Примечание. 1-22 – образцы из платиноносных забоев горных выработок 2, 3 и 4 горизонтов Госшахты, 23-35 – образцы с участка Александровский, 36-38 – образцы с участка Крутой Лог, 39-45 – образцы с Сырковского участка. Анализы выполнены методами РСМА на приборе JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (анапитик В.Г. Гмыра). FeO<sup>+</sup> – все железо в виде FeO.

карьера, в прифронтальной части крупной негативной геохимической аномалии по платине (рис. 6, Ч. І). Линейная прерывистая платиноворудная зона мощностью 1-1,5-2 м прослежена на расстоянии около 300 м. Имеет северозападное простирание (300-330°) и крутое, до субвертикального, падение под углами 60-80° к юго-западу и северо-востоку. С обеих сторон она ограничена низкотемпературными левыми сдвигами, по всей видимости, сингенетичными платиновому оруденению. Вскрыта 4 поисковыми скважинами (V1-V4), и прослежена по падению на глубину 30-40 м. Содержание платины, установленное в рудах по 6 сечениям зоны, изменяется от 1 до 5 г/т, максимально достигая 10-30 г/т. Зона имеет сложное внутреннее строение, определяемое чередованием линзовидных, изометричных и ветвистых раздувов мощностью до 2-2,5 м и пережимов-проводников до 0,1 м, создающих картину четковидных бус, повторяющихся по падению зоны. Она насыщена хромитоносными разнозернистыми и пегматоидными дунитами, сближенными маломощными короткими (не более 10-50 см) прожилками хромшпинелида, отстоящими друг от друга на 5-10-20 см (рис. 4). Для руд характерны линзовидные, прожилково-пятнистые и полосчатые текстуры. Каемчатые жилы и пятнисто-полосчатые обособления хромшпинелида, так же как и вмещающие их хромитоносные пегматоидные дуниты, всегда несут следы хрупких деформаций и рассекаются многочисленными тонкими (0,1-1 мм) карбонатными и серпентин-брусит-карбонатными прожилками, подчеркивающими катаклаз и будинированность платиноворудной зоны (рис. 4). Вещество прожилков имеет игольчатую, пластинчатую и звездчатую структуру и белый, кремово-белый, зеленовато-серовато-белый цвет, придающий в целом рудным концентрациям седоватый оттенок. Ориентировка прожилков самая различная - от перпендикулярной, косой диагональной до параллельной контактам хромит-платиновых жилок и обособлений (рис. 4). Протяженность их небольшая (1-5 см), однако встречаются прожилки общей протяженностью до 10-20 см, пересе-



Рис. 3. Диаграмма «хромистость-магнезиальность», демонстрирующая дискретность составов рудообразующих и акцессорных хромшпинелидов в различных подтипах платинометальных руд месторождений уральского типа (массивы горы Соловьевой и горы Косьвинский Камень).

 хромитовый подтип; 2 – дунитовый подтип; 3 – пегматитовый подтип; 4 – хромшпинелиды сегрегационных неплатиноносных шлиров и гнезд; 5 – акцессорные хромшпинелиды; 6 – границы поля составов по результатам анализа 107 проб из 6 месторождений двух массивов Платиноносного пояса.

кающие пары сближенных хромит-платиновых жил, и продолжающиеся далее в виде выклинивающихся «сухих» трещин в дунитах. От вмещающих пегматитизированных дунитов с акцессорной и повышенной вкрапленностью хромшпинелида жилки и пятно-, полосообразные обособления, сложенные средне-густовкрапленным хромшпинелидом, почти всегда отделены узкими (5-30 мм) каймами интенсивной гидратации и осветления дунитов, сложенными светло-зеленым и желтовато-светло-зеленым серпентинитом, не содержащим реликтов оливина. Соотношения хромшпинелида и силикатного цемента (вместе с карбонатными прожилками) в отдельных жилках и гнездах варьируют от существенного преобладания первого (до 70-85 об. %) до примерного их равенства. Силикатный цемент руд, сложенных среднемелкозернистым катаклазированным хромшпинелидом, представлен серпентином, карбонатом, хлоритом, слюдами.

На диаграмме «хромистость-магнезиальность» (рис. 3) рудообразующие хромшпинелиды месторождения Дунитовое (табл. 4) формируют свое отдельное поле умеренно хромистых и значительно менее магнезиальных составов с параметрами Cr/Cr + Al = 0,77-0,83и Mg/Mg +  $Fe^{2+} = 0.46-0.60$ , закономерно продолжающее серию платиноносных рудообразующих хромшпинелидов месторождения Госшахта. В рудообразующих хромшпинелидах присутствуют очень мелкие (от 5-10 мкм до 100 мкм и более) мономинеральные и полиминеральные включения, представленные оливином, хлоритом, флогопитом, диопсидом, серпентином и другими минералами [Волченко, 1999]. Свежий оливин в цементе и каймах руд отсутствует. На основе анализа коллекции оливинов из вмещающих хромитоносных дунитов и дунитов Соловьевогорского карьера в целом (табл. 5) установлено закономерное понижение железистости оливина от ординарных фоновых дунитов западной части карьера и скважин с f = 8-9,5 мол. % к оливинам негативного геохимического ореола с f = 7,0-8,0 мол. % и оливинам пегматоидных хромитоносных дунитов платиноворудной зоны с f = 7,4-8,1 мол. %. Минимальная железистость характеризует оли-

# Таблица 3

Химический состав (мас. %) минералов платины хромитового подтипа руд

Nº	No ofp	Dt	Dd	Ī٣	Os	D.,	Dh	Ea	Cu	Ni	Cuadra
пп	Mº 00p.	Ρι	Pu	11	Us	ĸu	KII	ге	Cu	INI	Сумма
1	2	3		5	6	7	Q	0	10	11	12
1	2/0-3	3 86.64	038	288	0.00	/	0.55	9	0.41	0.12	100.85
2	249-5	85 77	0,38	3.26	0,00	0,01	0,55	9,80	0.45	0.12	100,85
3	251-5	82 49	0,38	3.48	0.47	0,02	0,55	10.77	0,43	0.16	99.04
4	255-8	84 98	0.47	2 71	0,47	0,00	0.52	10,77	0,62	0.16	100.06
5	176-1-10	83 70	0.42	2,71	0,00	0,00	0.54	11.04	0,50	0.16	99.11
6	176-2-11	84 85	0.47	2,00	0,00	0,00	0.57	9 71	0,55	0.16	99.04
7	179-14	83.90	0.46	2.67	0.00	0.02	0.55	10.87	0.49	0.12	99.08
8	228-17	83.86	0.43	3 11	0.10	0.05	0.55	10,87	0.40	0.23	99.16
9	259-21	85.92	0.46	2.89	0.00	0.04	0.51	10.53	0.59	0.08	101.02
10	270-27	85.35	0.47	3.47	0.24	0.10	0.55	10.07	0.38	0.23	100.86
11	273-28-1	83.28	0.45	3.72	0.02	0.05	0.61	11.06	0.56	0.20	99.95
12	273-28-2	84.13	0.46	3.92	0.05	0.05	0.61	10.80	0.57	0.20	100.79
13	273-28-3	82,73	0,47	3,54	0,00	0,02	0,60	10,96	0,56	0,18	99.06
14	273-28-4	84,11	0,47	3,75	0,04	0,02	0,58	10,62	0,58	0,19	100,36
15	274-29	84,46	0,50	3,64	0,04	0,07	0,55	10,75	0,31	0,27	100,59
16	252-6	83,59	0,35	2,33	0,00	0,00	0,45	11,47	0,70	0,25	99,14
17	177-12	85,29	0,51	2,00	0,00	0,00	0,32	11,90	0,51	0,42	100,95
18	178-13	82,64	0,40	2,66	0,00	0,00	0,56	12,03	0,82	0,32	99,43
19	231-2	81,97	0,35	2,66	0,00	0,00	0,61	11,66	0,76	1,12	99,13
20	253-7	82,86	0,40	2,45	0,00	0,00	0,51	12,53	0,60	0,13	99,48
21	268-26	78,58	0,46	4,69	0,00	0,00	0,65	11,27	0,97	2,76	99,38
22	265-24	76,31	0,42	2,52	0,00	0,00	0,43	17,56	1,22	0,66	99,12
23	266-25-2	71,27	0,36	5,31	0,00	0,00	0,47	12,37	2,74	5,87	98,39
24	266-25-1	70,70	0,37	4,80	0,00	0,00	0,48	12,53	2,83	7,79	99,50
25	233-18	86,27	0,62	1,40	0,00	0,00	0,32	11,0,7	0,49	0,27	100,44
26	NV-1-2	82,24	0,13	3,20	0,18	0,36	0,27	12,36	0,00	0,30	99,04
27	205-15	83,22	0,41	4,47	0,00	0,00	0,52	9,86	0,48	0,14	99,10
28	4-3-1	82,50	0,47	2,80	0,07	0,00	0,53	11,13	0,70	0,20	98,40
29	4-4	83,00	0,30	4,55	0,09	0,05	0,91	10,93	0,68	0,18	100,69
30	27V98-1	73,48	0,38	10,58	0,00	0,05	0,98	12,46	1,03	0,46	99,42
31	27V98-2	73,07	0,36	10,42	0,08	0,05	1,01	11,69	1,08	0,46	98,22
				Ат	томные к	онцентр	ации				
1	249-3	67,994	0,547	2,294	0,000	0,015	0,818	27,031	0,988	0,313	-
2	250-4	67,379	0,547	2,600	0,000	0,015	0,819	27,058	1,080	0,496	-
3	251-5	64,174	0,556	2,748	0,383	0,075	0,900	29,269	1,481	0,414	_
4	255-8	65,841	0,668	2,131	0,000	0,000	0,764	28,852	1,332	0,412	_
5	176-1-10	64,832	0,596	2,091	0,000	0,000	0,793	29,872	1,403	0,412	_
6	176-2-11	67,500	0,686	2,204	0,000	0,000	0,860	26,984	1,343	0,423	-
7	179-14	65,337	0,657	2,111	0,000	0,030	0,812	29,571	1,172	0,310	_
8	228-17	65,786	0,618	2,476	0,081	0,076	0,818	28,582	0,963	0,600	_
9	259-21	66,295	0,651	2,263	0,000	0,060	0,746	28,382	1,398	0,205	_
10	270-27	66,511	0,672	2,745	0,192	0,150	0,812	27,413	0,909	0,596	_
	273-28-1	63,976	0,634	2,901	0,016	0,074	0,888	29,680	1,321	0,510	_
12	273-28-2	64,517	0,647	3,051	0,039	0,074	0,887	28,933	1,342	0,510	_
13	273-28-3	64,149	0,668	2,786	0,000	0,030	0,882	29,688	1,333	0,464	_
14	273-28-4	64,966	0,666	2,940	0,032	0,030	0,849	28,655	1,375	0,487	-
15	274-29	65,123	0,707	2,849	0,032	0,104	0,804	28,955	0,734	0,692	-
16	252-6	64,055	0,492	1,812	0,000	0,000	0,654	30,704	1,647	0,636	_
17	177-12	63,939	0,701	1,522	0,000	0,000	0,455	31,163	1,174	1,046	- 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
18	178-13	62,257	0,553	2,034	0,000	0,000	0,800	31,659	1,896	0,801	-
19	231-2	61,513	0,482	2,026	0,000	0,000	0,868	30,567	1,751	2,793	-
20	253-7	62,258	0,551	1,868	0,000	0,000	0,726	32,888	1,384	0,325	—
21	268-26	57,385	0,616	3,476	0,000	0,000	0,900	28,750	2,175	6,698	—
22	265-24	51,654	0,521	1,731	0,000	0,000	0,552	41,522	2,536	1,484	—
23	266-25-2	47,723	0,442	3,609	0,000	0,000	0,597	28,935	5,633	13,061	—
24	266-25-1	45,464	0,436	3,133	0,000	0,000	0,585	28,148	5,588	16,646	—
25	233-18	66,104	0,871	1,089	0,000	0,000	0,465	29,631	1,153	0,687	—
26	NV-1-2	62,639	0,181	2,474	0,141	0,529	0,389	32,887	0,000	0,760	—
27	205-15	66,112	0,597	3,604	0,000	0,000	0,783	27,363	1,171	0,370	_
28	4-3-1	63,966	0,668	2,204	0,056	0,000	0,779	30,146	1,666	0,515	—
29	4-4	63,383	0,420	3,527	0,071	0,074	1,317	29,157	1,594	0,457	—
30	27V98-1	54,394	0,516	7,950	0,000	0,072	1,375	32,22	2,341	1,132	—
31	27V98-2	55,322	0,500	8,008	0,062	0,073	1,450	30,918	2,510	1,157	_

Окончание таблицы 3

Примечание. 1-24 – образцы из платиноносных забоев горных выработок 2, 3 и 4 горизонтов Госшахты, 25, 26 – образцы с участка Александровский, 27 – образец с участка Крутой Лог, 28-31 – образцы с Сырковского участка. Анализы выполнены методами РСМА на приборе JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитик В.Г. Гмыра). Образцы 1-20, 25-27, 30-31 – изоферроплатина иридистая, 21-24, 28-29 – тетраферроплатина иридистая.

вины микровключений в хромшпинелиде платиноворудной зоны: f = 4,0-4,4 мол. %. Содержание CaO в оливине также заметно изменяется от 0,31-0,35 мас. % в оливинах фоновых дунитов до 0,25-0,29 мас. % в оливинах негативных геохимических аномалий и до 0,28-0,32 мас. % в оливинах рудовмещающих дунитов платиноворудной зоны (табл. 5, рис. 5).

Собственная платиновая минерализация установлена во всех сечениях зоны месторождения Дунитовое (образцы 43V, 50V, DV-1, 66V, 67V, 210V, 211V и др.), а также в оперяющих минерализованных зонах (образцы 3VA, 212V, 7VA и др.). Минерализация обнаружена как в полированых шлифах, так и в протолочках перечисленных выше проб, а также в большом количестве (сотни зерен) в гравитационных концентратах из проб 43V и 66V. Количество встреченных платиновых зерен в полированных шлифах составляет от 3-5-10 до 48 на один образец. Основное количество их представлено мелкими и тонкими (десятки-сотни микрон) рассеянными включениями, а также гнездообразными скоплениями размером 2 × 2-4 × 4 мм. Гранулометрический анализ платины месторождения Дунитовое, проведенный на основе изучения 400 зерен, показал, что 83 % из них относятся к классу менее 400 мкм, при этом две трети из этих зерен имеют крупность менее 100 мкм. Очень часто мелкие (десятки микрон) идиоморфные кристаллические зерна платины (кубы, кубоктаэдры) заключены в катаклазированных хромшпинелидах, где находятся возле хлорит-серпентиновых обособлений размером до 1-2 мм, и в тонких трещинках катаклаза, часто пересекая (перекрывая) и цементируя их без следов последующих деформаций. Реже более крупные (сотни микрон), также обычно идиоморфные кристаллические зерна и сростки кристаллических зерен платины включены в силикатный цемент руд, либо находятся на контактах хромшпинелидов и силикатов. По составу платина представляет собой железо-платиновые твердые растворы, обогащенные медью и никелем. Оптические свойства и соотношения основных компонентов позволяют отнести ее к малоиридистой тетраферроплатине; встречаются единичные зерна малоиридистой изоферроплатины (табл. 6). Эти результаты подтверждаются данными рентгено-структурного изучения зерен платины, большинство из которых представлено тетраферроплатиной. Таким образом, для руд дунитового подтипа наиболее характерна мелкая и тонкая идиоморфная тетраферроплатина с пониженными содержаниями иридия и повышенными содержаниями никеля и особенно меди.

### Пегматитовый подтип

В 1941 году, при проведении поисковых работ на платину в дунитах Каменнокосьвинс-



Рис. 4. Характерные текстуры хромитплатинометальных руд дунитового подтипа.

А, Б, В – тип маломощных коротких каемчатых жил, формирующих прожилковые зоны. Катаклаз и будинированность отдельных жилок (жильных зон) подчеркивается многочисленными различно ориентированными карбонатными прожилками, секущими не только руду, серпентиновые каймы, но и рудовмещающие дуниты. Цемент руд и каймы сложены лизардитом с незначительной примесью хлорита. Месторождение Дунитовое. Обр. 66-67В. их контакта с клинопироксенитами, Н.В. Бутыриным были выявлены небольшие тела платиноносных пироксенит-пегматитов со специфичной хромтитаномагнетитовой минерализацией (рис. 6). Наиболее крупное из этих тел, известное как Бутыринское рудопроявление, вскрыто шурфом № 24 и канавами-рассечками из этого шурфа. Расположенное в 500 м от зоны контакта дунитов с клинопироксенитами, на водоразделе Ободранного и Юдинского Логов, рудное тело сложено разнозернистыми и крупнозернистыми клинопироксенитами с вкрапленно-прожилковым хромтитаномагнетитовым оруденением. Пироксенит-пегматитовая жила имеет сложную форму и неоднородное внутреннее строение. Длина жилы по простиранию около 6 м, мощность изменяется от 5-10 см на выклинивании до 1,2 м в раздувах. Простирание жилы CB 60° с падением на C3 под углами 60-80°. Контакты жилы и ее апофиз с дунитами резкие. В зонах контактов дунит серпентинизирован интенсивнее и здесь появляются каймы осветления мощностью до 5 мм. В раздувах жила содержит округлые, эллипсоидальные и угловатые останцы дунита размером в поперечнике 1-15 см, количество которых достигает 70 % от объема жилы. На выклинивании количество их падает до 10 %, в апофизах они вообще отсутствуют.

кого массива Кытлымского комплекса, вблизи

Жила сложена клинопироксеном ряда диопсид-геденбергит с низкой железистостью (7,0-12,0 мол. %) и небольшим количеством оливина с железистостью 8,2-8,6 мол. % (табл. 7). Другие силикатные минералы представлены роговой обманкой и ортопироксеном типа энстатита. Главным рудным минералом является хромтитаномагнетит, обладающий специфичным и аномальным для Платиноносного пояса составом (табл. 8). Он образует прожилковидные участки густовкрапленного и сплошного сложения, а так же участки с вкрапленной сидеронитовой и петельчатой текстурами (рис. 7). Размер индивидуальных зерен хромтитаномагнетита изменяется от 0,2 до 1,2 мм. В силикатных минералах присутствуют и более крупные идиоморфные включения хромтитаномагнетита размером до 1-2 мм. Из других рудных минералов в жиле присутствуют пирит, халькопирит, пентландит, ковеллин, медь самородная, минералы платиновых металлов. Содержание платиноидов в рудах по данным Н.В. Бутырина составляет от 34,8 до 49,7 г/т при ведущей

Таблица 4

N⁰	N⁰			Основ	ные ком		Cr/	Mg/		
ПП	обр.	TiO <sub>2</sub>	$Al_2O_3$	$Cr_2O_3$	FeO <sup>+</sup>	MnO	MgO	Сумма	(Cr + Al)	$(Mg + Fe^{2+})$
1	43-1D	0,45	8,91	50,24	29,56	0,53	9,96	99,65	0,79	0,51
2	43-9D	0,38	8,17	51,58	29,52	0,41	10,11	100,17	0,81	0,50
3	43-10D	0,44	7,68	51,35	29,99	0,53	10,17	100,16	0,82	0,51
4	43-6-1	0,46	8,75	48,19	28,54	0,55	12,17	98,66	0,79	0,61
5	43-6-7	0,50	8,20	49,02	28,88	0,52	11,93	99,05	0,80	0,59
6	43-6-9	0,50	8,29	49,03	29,37	0,56	11,96	99,71	0,80	0,59
7	43-6-11	0,49	8,62	48,10	28,00	0,56	11,15	96,92	0,79	0,57
8	43-6-16	0,50	8,67	48,21	29,78	0,63	11,86	99,65	0,79	0,59
9	43-6-20	0,48	8,38	48,24	30,52	0,66	11,70	99,98	0,80	0,58
10	66-5	0,48	8,05	49,9	29,89	0,50	11,41	100,23	0,81	0,56
11	66-16	0,45	7,9	49,76	29,55	0,50	11,44	99,60	0,81	0,57
12	66-23	0,47	7,84	50,77	29,54	0,48	11,96	101,06	0,81	0,59
13	211-5	0,51	7,71	52,00	27,93	0,51	11,68	100,34	0,82	0,58
14	211-10	0,50	8,09	50,27	28,93	0,51	11,32	99,62	0,81	0,56
15	212A99	0,48	8,17	50,15	30,03	0,54	11,29	100,66	0,80	0,56
16	39V97-1	0,33	8,5	53,19	27,26	0,51	11,09	100,88	0,81	0,55
17	39V97-2	0,35	8,79	53,51	26,89	0,57	10,39	100,50	0,80	0,52
18	NV-1-1	0,48	6,91	47,96	32,04	0,32	9,72	97,43	0,82	0,50
19	NV-1-2	0,51	7,61	48,69	33,94	0,34	9,07	100,16	0,81	0,45
20	NV-1-3	0,49	6,82	48,71	33,59	0,31	8,93	98,85	0,83	0,46
21	NV-1-4	0,53	9,00	47,79	32,06	0,50	10,15	100,03	0,78	0,51
22	NV-1-5	0,48	8,79	48,28	31,47	0,47	9,95	99,44	0,79	0,50
23	NV-1-6	0,48	9,50	47,86	31,46	0,48	10,49	100,27	0,77	0,52
24	NV-1-7	0,48	9,59	47,87	31,34	0,56	10,29	100,13	0,77	0,51
25	NV-1-8	0,51	9,4	48,28	31,21	0,54	10,58	100,52	0,78	0,52
26	NV-1-9	0,51	9,39	47,83	31,7	0,54	9,94	99,91	0,77	0,50
27	NV-1-10	0,51	9,28	47,93	31,47	0,54	9,93	99,66	0,78	0,50

# Химический состав (мас.%) хромшпинелидов из платиновых руд дунитового подтипа

Примечания. 1-15 – образцы с участка Дунитовый, 16-27 – образцы с участка Александровский. Анализы выполнены методами РСМА на приборе JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитики В.Г. Гмыра, Л.К. Воронина). FeO<sup>+</sup> – все железо в виде FeO.

роли платины и палладия; по данным П.Я. Яроша и В.Г. Фоминых [1976] от 1-5 до 20-60 г/т при аналогичной специализации руд. Несмотря на скромные размеры, этот объект издавна привлекал к себе пристальное внимание из-за высоких суммарных концентраций платиновых металлов, аномальной палладиеносности руд и необычного состава хромтитаномагнетита. Несмотря на совершенно недостаточную изученность, эти рудоносные пироксенит-пегматиты постоянно рассматривались в качестве генотипа месторождений платины «пироксенитового палладиевого типа» [Иванов, Лизунов, 1944, и др.].

Предпринятое нами детальное изучение геологических и минералого-геохимических особенностей этого объекта приводит к выводу, что мы имеем дело с новым, третьим после хромитового и дунитового, подтипом платинометального оруденения в объеме уральского типа платинометальных руд. Проведенное детальное опробование Бутыринского рудопроявления выявило неравномерное распределение платиновых металлов в рядовых пробах (от 1-2 до 20 г/т) при следующем устойчивом ряде их убывания: платина, палладий, иридий, родий, осмий, рутений. В рудовмещающих фоновых дунитах из зоны контакта с пироксенитовой жилой содержание платиновых металлов резко падает - до 25-100 мг/т по платине и до 5-10 мг/т по палладию. Негативного ореола в рудовмещающих дунитах не обнаружено. Из канав-рассечек, прослеживающих рудоносную жилу, а также из отвалов шурфа № 24, в котором она впервые и была обнаружена, нами отобрана

### Таблица 5

Моли	Ма проб				f wor %				
JN≌ IIII	Jia uboo	SiO <sub>2</sub>	FeO <sup>+</sup>	MgO	CaO	MnO	NiO	сумма	1, мол. 70
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1VA	41,14	8,40	49,01	0,31	0,19	0,13	99,18	8,78
2	2VA	40,79	7,58	50,41	0,32	0,19	0,17	99,46	7,89
3	3VA-1	41,42	7,82	50,28	0,35	0,19	0,19	100,25	8,03
4	4VA-1	41,14	7,36	49,91	0,32	0,18	0,19	99,10	7,69
5	4VA-2	41,33	7,29	49,80	0,28	0,19	0,19	99,08	7,63
6	5VA	41,37	7,49	50,05	0,32	0,18	0,17	99,57	7,73
7	6VA	41,39	7,11	50,51	0,32	0,16	0,17	99,67	7,33
8	7VA	41,16	7,16	50,21	0,31	0,18	0,17	99,21	7,44
9	8VA	41,17	7,64	50,02	0,29	0,19	0,17	99,49	7,87
10	9VA	41,86	7,29	50,05	0,29	0,19	0,17	99,86	7,59
11	10VA	41,33	7,72	49,56	0,29	0,18	0,19	99,27	8,00
12	11VA-1	41,12	7,62	49,65	0,28	0,21	0,14	99,03	7,92
13	11VA-2	41,40	7,51	50,31	0,28	0,19	0,16	99,85	7,69
14	12VA	41,51	7,25	50,04	0,30	0,18	0,20	99,48	7,60
15	13VA	40,99	7,88	50,09	0,32	0,18	0,14	99,60	8,14
16	14VA	41,18	7,30	50,26	0,29	0,16	0,19	99,38	7,56
17	15VA	41,00	7,68	50,21	0,31	0,19	0,17	99,57	7,91
18	16VA	40,88	8,26	49,77	0,25	0,18	0,16	99,50	8,52
19	17VA	40,79	8,26	49,79	0,32	0,19	0,17	99,53	8,52
20	19VA	41,19	6,96	50,52	0,27	0,18	0,22	99,33	7,19
21	20VA	41,42	8,52	49,88	0,32	0,21	0.13	100,48	8,71

Химический состав оливинов (мас. %) из дунитов и руд дунитового подтипа

Примечание. Образцы из Соловьевогорского карьера. Анализы выполнены методами РСМА на приборе JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитик Л.К. Воронина). Fe<sup>+</sup> – все железо в виде FeO.



Рис. 5. Железистость (Fa, мол. %) и содержание CaO (мас. %) в оливинах хромит-платиновых рудах уральского типа и рудовмещающих дунитах.

1 – хромитовый подтип; 2 – дунитовый подтип; 3 – пегматитовый подтип; 4 – негативные геохимические аномалии; 5 – фоновые дуниты.



Рис. 6. А - схематическая геологическая карта массива г. Косьвинский Камень.

1 – дуниты; 2 – клинопироксениты; 3 – кытлымиты; 4 – гнезда и жилы хромитов; 5 – хромит-платиновые рудные тела: а – столбо-трубообразные; б – зоны линейных жил; 6 – геологические границы; 7 – горные выработки: а – глубокая шахта № 4; б – Бутыринское рудопроявление; 8 – места отбора проб на платину.

Б – геологический план-схема горных выработок и схема опробования Бутыринского палладиево-платинового рудопроявления.

 дуниты; 2 – пироксенит-пегматиты с включениями обломков дунита; 3 – элементы залегания рудной жилы; 4 – рудный штабель шурфа № 24; 5 – места отбора проб для анализа на платиновые металлы.

Таблица 6

# Химический состав минералов платины (мас. %) дунитового подтипа. Месторождение Дунитовое, Соловьевогорский дунитовый карьер

№ п/п	№ обр	Pt	Pd	Ir	Os	Ru	Rh	Fe	Cu	Ni	Сумма
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	6-2	73,48	0,22	0,45	0,00	0,03	0,61	14,23	8,03	0,41	97,46
2	211-10	74,72	0,28	0,68	0,00	0,00	0,33	14,10	3,52	4,84	98,47
3	66-5	75,85	0,25	0,78	0,00	0,00	0,26	14,78	5,60	2,19	99,71
4	66-5	73,81	0,24	0,80	0,00	0,00	0,27	14,83	5,61	2,28	97,84
5	211-10	74,36	0,27	0,87	0,00	0,00	0,36	14,08	3,43	5,05	98,42
6	211-10	74,34	0,34	0,94	0,00	0,00	0,34	14,05	3,94	4,30	98,25
7	6-4	74,66	0,29	1,01	0,02	0,01	0,80	12,57	8,32	0,37	98,05
8	211-5	74,34	0,26	1,08	0,00	0,00	0,30	14,77	5,45	2,22	98,42
9	6-13	75,36	0,24	1,10	0,00	0,00	0,61	16,00	2,49	1,29	97,09
10	211-5	73,85	0,26	1,19	0,00	0,00	0,33	14,59	5,32	2,43	97,97
11	6-15	75,39	0,25	1,25	0,00	0,03	0,57	13,61	3,77	4,20	99,07
12	211-10	73,79	0,26	1,27	0,00	0,00	0,33	14,07	3,49	5,15	98,36
13	6-20	75,97	0,25	1,32	0,00	0,04	0,57	12,90	8,13	0,25	99,43
14	6-3	73,80	0,28	1,33	0,00	0,09	0,58	12,37	8,69	0,21	97,35
15	211-5	74,91	0,24	1,37	0,00	0,00	0,31	14,15	5,17	2,36	98,51
16	6-18a	75,76	0,30	1,38	0,00	0,03	0,55	16,19	4,90	0,44	99,55
17	43-95	74,67	0,26	1,45	0,00	0,03	0,84	14,16	3,78	5,20	100,39
18	43-96	74,38	0,26	1,46	0,00	0,03	0,77	14,16	3,64	4,66	99,36
19	6-11	75,70	0,33	1,54	0,00	0,00	0,57	12,62	7,79	0,22	98,77
20	6-14	75,97	0,28	1,56	0,00	0,00	0,67	17,23	2,95	1,22	99,88
21	211-5	73,92	0,24	1,57	0,00	0,00	0,31	15,07	5,51	2,28	98,90
22	211-10	73,02	0,29	1,58	0,00	0,00	0,38	13,70	3,74	4,31	97,02
23	6-5	73,73	0,23	1,59	0,00	0,02	0,61	12,05	8,82	0,21	97,26
24	6-6	74,02	0,21	1,61	0,00	0,03	0,57	12,49	8,31	0,19	97,43
25	6-19	73,55	0,27	1,65	0,02	0,03	0,58	12,31	8,59	0,27	97,27
26	6-7	73,10	0,29	1,66	0,00	0,00	0,64	15,35	4,16	2,11	97,31
27	6-16	74,54	0,33	1,70	0,00	0,00	0,57	11,87	8,93	0,21	98,15
28	6-8	74,85	0,24	1,77	0,00	0,01	0,64	13,17	8,78	0,27	99,73
29	43-94	74,65	0,13	1,81	0,00	0,02	0,73	14,98	2,87	2,02	97,21
30	6-1	74,15	0,36	1,99	0,00	0,03	0,70	12,27	8,80	0,20	98,50
31	43-93	75,17	0,27	2,02	0,00	0,03	0,77	14,97	2,88	2,01	98,12
32	43-91	72,20	0,13	2,04	0,00	0,02	0,70	13,65	2,47	7,06	98,27
33	43-92	72,14	0,13	2,08	0,00	0,03	0,65	13,48	2,47	7,02	98,00
34	6-10	73,80	0,25	2,08	0,00	0,04	0,68	12,25	8,46	0,61	98,17
35	6-12	73,81	0,30	2,28	0,07	0,03	0,68	12,57	9,29	0,43	99,46
36	6-9	75,83	0,26	2,43	0,00	0,06	0,64	15,49	6,04	0,44	101,19
37	6-17	75,32	0,24	3,35	0,00	0,05	0,61	17,17	1,66	1,14	99,54
38	6-180	84,01	0,44	0,86	0,00	0,03	0,69	12,46	1,07	0,82	100,38
39	6-8a	81,63	0,30	1,81	0,14	0,00	0,65	12,24	0,91	0,31	97,99
40	6-9a	83,05	0,40	2,35	0,00	0,06	0,58	12,70	0,79	0,55	100,48
1	( )	40.770	0.047		омные ко	нцентра		22.050	1( 007	0.001	
	0-2	48,5/2	0,267	0,302	0,000	0,038	0,764	32,859	10,297	0,901	
2	211-10	48,934	0,336	0,452	0,000	0,000	0,410	32,257	/,0/8	10,533	
5	00-5	49,551	0,298	0,515	0,000	0,000	0,321	24.042	11,18/	4,/33	_
4	00-5	48,502	0,289	0,534	0,000	0,000	0,330	34,042	11,319	4,9/8	_
5	211-10	48,027	0,524	0,5//	0,000	0,000	0,446	32,105	0,88/	10,9/4	
0	211-10	48,899	0,410	0,027	0,000	0,000	0,424	32,284	17 207	9,399	_
/	0-4	50,290	0,338	0,091	0,014	0,013	1,022	29,377	17,207	0,828	-

### Окончание таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8	211-5	48,848	0,313	0,720	0,000	0,000	0,374	33,903	10,995	4,847	_
9	6-13	51,652	0,302	0,765	0,000	0,000	0,793	38,310	5,240	2,938	_
10	211-5	48,734	0,315	0,797	0,000	0,000	0,413	33,634	10,779	5,328	-
11	6-15	49,818	0,303	0,838	0,000	0,038	0,714	31,417	7,649	9,223	-
12	211-10	48,178	0,311	0,842	0,000	0,000	0,409	32,091	6,996	11,173	-
13	6-20	50,720	0,306	0,895	0,000	0,051	0,721	30,086	16,666	0,555	
14	6-3	50,024	0,348	0,915	0,000	0,118	0,745	29,291	18,086	0,473	-
15	211-5	49,783	0,292	0,924	0,000	0,000	0,391	32,850	10,549	5,211	-
16	6-18a	49,883	0,362	0,922	0,000	0,038	0,687	37,239	9,906	0,963	-
17	43-95	47,694	0,304	0,940	0,000	0,000	1,017	31,595	7,413	11,037	
18	43-96	48,322	0,310	0,963	0,000	0,000	0,948	32,136	7,261	10,060	_
19	6-11	51,258	0,410	1,058	0,000	0,000	0,732	29,851	16,196	0,495	-
20	6-14	49,771	0,336	1,038	0,000	0,000	0,832	39,433	5,934	2,656	-
21	211-5	48,100	0,286	1,037	0,000	0,000	0,382	34,256	11,009	4,930	1
22	211-10	48,830	0,356	1,072	0,000	0,000	0,482	32,004	7,679	9,577	-
23	6-5	50,214	0,287	1,099	0,000	0,026	0,788	28,668	18,443	0,475	-
24	6-6	50,370	0,262	1,112	0,000	0,039	0,735	29,690	17,362	0,430	-
25	6-19	49,978	0,336	1,138	0,014	0,039	0,747	29,220	17,918	0,610	-
26	6-7	48,754	0,355	1,124	0,000	0,000	0,809	35,763	8,519	4,676	-
27	6-16	50,524	0,410	1,170	0,000	0,000	0,732	28,106	18,585	0,473	_
28	6-8	49,185	0,289	1,180	0,000	0,013	0,797	30,232	17,714	0,590	-
29	43-94	51,143	0,163	1,259	0,000	0,000	0,948	35,851	6,037	4,599	-
30	6-1	49,845	0,444	1,358	0,000	0,039	0,892	28,813	18,163	0,446	_
31	43-93	51,135	0,337	1,402	0,000	0,000	0,993	35,574	6,015	4,544	_
32	43-91	46,712	0,154	1,340	0,000	0,000	0,859	30,850	4,907	15,178	-
33	43-92	46,929	0,155	1,373	0,000	0,000	0,802	30,633	4,933	15,175	_
34	6-10	49,686	0,309	1,421	0,000	0,052	0,868	28,811	17,488	1,365	-
35	6-12	48,573	0,362	1,523	0,048	0,038	0,848	28,897	18,771	0,940	-
36	6-9	49,170	0,309	1,599	0,000	0,075	0,787	35,087	12,025	0,948	_
37	6-17	50,456	0,295	2,278	0,000	0,065	0,775	40,180	3,414	2,537	_
38	6-18b	61,504	0,591	0,639	0,000	0,042	0,958	31,866	2,405	1,995	_
39	6-8a	61,853	0,417	1,392	0,109	0,000	0,934	32,398	2,117	0,780	_
40	6-9a	61,065	0,539	1,754	0,000	0,085	0,809	32,621	1,783	1,344	_

Примечание. Образцы 1-35 – тетраферроплатина малоиридистая; 36, 37 – тетраферроплатина иридистая; 38-40 – изоферроплатина малоиридистая. Анализы выполнены методами РСМА на приборе JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитики В.Г. Гмыра, Л.К. Воронина).

крупнообъемная проба весом 52 кг, характеризующая без изъятия весь материал сечения жилы от контакта до контакта, включая и останцы дунита. После обычной процедуры пробоподготовки, крупнообъемная проба Б-1 была проанализирована и затем обогащена по комбинированной (гравитационно-флотационной схеме). Выполнен анализ всех промпродуктов и концентратов на благородные и цветные металлы, а также хром и серу (табл. 9). Суммарное содержание платиновых металлов в композитной пробе составляет около 3 г/т, при содержании оксида хрома 2,9 мас. %. Во флотационных концентратах содержание платиноидов около 47 г/т, при содержании оксида хрома 1,38 мас. %, меди 1,12 мас. %, никеля 0,16 мас. % и серы 0,77 мас. %. Из полученных концентратов изготовлены цементационные препараты (полированные шлифы), в которых найдены и изучены многочисленные (более 75 фаз) мелкие и тонкие зерна платиновых и палладиевых минералов, находящихся в срастании с хромтитаномагнетитом, клинопироксеном, амфиболом и сульфидами цветных металлов. Рудообразующие хромтитаномагнетиты на диаграмме «хромистость-магнезиальность» формируют изолированное поле составов с параметрами Cr/Cr + Al = 0,71-0,76 и Mg/Mg + Fe<sup>2+</sup>= 0,22-0,37, завершающее эволюцию составов хромферришпинелидов в месторождениях платиновых руд

Таблица 7

Химический	состав	(мас.	%)	оливинов	ИЗ	руд	пегматитов	ого	подтипа
	]	Бутыр	ин	ского рудог	ipo	явле	ния		

N⁰	N⁰		f wor %						
пп	проб	SiO <sub>2</sub>	$FeO^+$	MgO	CaO	MnO	NiO	сумма	1, МОЛ. 70
1	B-1-2-4	40,90	7,96	49,85	0,49	0,26	-	99,46	8,23
2	B-1-2-5	40,96	8,41	50,10	0,56	0,23	_	100,26	8,61

Примечание. Анализы выполнены методами PCMA на приборе JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитик Л.К. Воронина). FeO<sup>+</sup> – все железо в виде FeO.

уральского типа на заключительной стадии их образования (рис. 2). Сосуществующие с ними оливины имеют также повышенную железистость (8,2-8,6 мол. %) и содержат максимальное количество СаО – 0,49-0,56 мас. %. Гранулометрический анализ платины, проведенный на основе изучения 75 зерен, показал, что 87 % из них относится к классу менее 100 мкм, 11,5 % к классу 100-400 мкм, и лишь 1,5 % зерен – к классу более 400 мкм. Полифазные (2-4 фазные) выделения платиновых и палладиевых минералов часто имеют сложное пятнистое и зональное строение с неравномерным распределением основных минералообразующих компонентов – платины, палладия, железа, меди, ртути. Ксеноморфные сложные и пластинчатые зерна и кристаллические сростки зерен платины с периферии обрастают палладиевыми фазами и амальгамами, а также имеют каймы из самородной меди. Платиновые фазы идиоморфной формы встречаются крайне редко, имеют размеры 10-15 до 20-40 мкм и включены в различные силикатные минералы. Основные платиновые и палладиевые минералы руд представлены палладистой и медистой тетраферроплатиной, палладистой и медистой ферроникельплатиной, палладистым туламинитом, а также амальгамами платинисто-палладистой меди с широко варьирующими стехиометрическими соотношениями от Ме<sub>0</sub>Hg<sub>1</sub>-Me<sub>5</sub>Hg<sub>1</sub> до Ме, Нg, -Ме, Нg, (табл. 10). В ассоциирующих с платиновыми и палладиевыми минералами сульфидах и арсенидах цветных металлов, а также в самородной меди установлены ощутимые примесные количества благородных металлов. Таким образом, для руд пегматитового подтипа наиболее характерна тонкая пылевидная платино-палладиевая минерализация пестрого состава, представленная в первую очередь палладистой малоиридистой тетраферроплатиной, палладистым малоиридистым туламинитом и широко варьирующими по составу амальгамами платинисто-палладистой меди.

# Основные парагенезисы минералов платиновых металлов в различных подтипах хромит-платиновых руд уральского типа: типохимизм, типоморфизм, россыпеобразующая способность

Установленная гетерогенность платиновых руд уральского типа и отчетливая связь каждого из трех выделенных подтипов со своими характерными парагенезисами рудных и силикатных минералов, определяются особенностями геолого-структурной обстановки их формирования и отражают общую эволюцию рудообразующей системы в комплексах Платиноносного пояса Урала.

### Хромитовый подтип руд

Как уже отмечалось выше, для хромитплатиновых руд этого подтипа характерна тесная связь наиболее высокохромистых предельно магнезиальных хромшпинелидов с наименее железистыми оливинами и наиболее иридистой платиной и другими иридийсодержащими минералами. Железо-платиновые сплавы являются наиболее распространенными минералами платиновых металлов в рудах хромитового подтипа, составляющими около 95 % из идентифицированных минеральных фаз платины. Отношение суммы всех ЭПГ в платине к сумме неблагородных примесей (Fe + Cu + Ni) в ней изменяется в пределах (ат. %): 71,67/28,33 и 64,89/35,11. Для месторождения Госшахта это 62,38/37,62 и 49,62/50,38; далее 68,53/31,47 и 66,35/33,65 – для месторождения Александровское-Восточное; далее 71,10/28,90 и 66,62/33,38 для месторождения Крутой Лог-Катаевское;



Рис. 7. Характерные текстуры платинометальных руд пегматитового подтипа.

А. Прожилково-вкрапленная текстура руд в приконтактовой части жилы оливинсодержащих клинопироксенит-пегматитов с обломками мелкозернистых дунитов. Черное и темносерое – хром-титаномагнетит; светлосерое – клинопироксен. По трещинам – пленки карбоната (светлосерое и белое). Светлые участки по правому краю образца, а также слева внизу и на участке пережима карбонатного прожилка – включения бесформенных обломков дунита. Рудопроявление Бутыринское, шурф № 24. Обр. 27В.

Б. Пироксенит-пегматиты полосчатые с мелкопрожилково-вкрапленным хром-титаномагнетитовым оруденением (сидеронитового типа). Серое – хром-титаномагнетит. Темносерое – клинопироксен. Черное – крупные секущие кристаллы роговой обманки. Белое – блики на плоскости спайности клинопироксена. Рудопроявление Бутыринское, шурф № 24. Обр. 30В.

В. Центральная часть жилы пироксенит-пегматитов, обогащенная обломками мелкозернистых дунитов. Светлые обломки дунитов прямоугольной и полигональной формы цементируются хром-титаномагнетитом и клинопироксеном, формирующими протяженные прожилки. Рудопроявление Бутыринское, шурф № 24. Обр. 28В.

Г. Крупный обломок мелкозернистого массивного дунита в клинопироксенит-пегматитовой жиле в окружении сплошного хром-титаномагнетита (темносерое и черное). Рудопроявление Бутыринское, шурф № 24. Обр. 28В.

Д. Хром-титаномагнетитовые руды сидеронитовой текстуры (темносерое и черное) в жиле клинопироксенит-пегматитов (светлосерое и серое) с многочисленными мелкими (0,5 × 0,5-1 ×3 см) бесформенными обломками дунитов. Рудопроявление Бутыринское, шурф № 24. Обр. 29В.

Е. Приконтактовая часть жилы клинопироксенит-пегматитов (светлосерое) с бедным вкрапленным хром-титаномагнетитовым оруденением и многочисленными мелкими прожилками и включениями крупных кристаллов роговой обманки (черное). Рудопроявление Бутыринское, шурф № 24. Обр. 31В.

Масштабом служит полоска бумаги с чертой = 5 см.

Таблица 8

N⁰	N⁰			Основ	ные комі	$Cr/(Cr+\Lambda 1)$	$M\alpha/(M\alpha + E\alpha^{2+})$			
ПП	обр.	TiO <sub>2</sub>	$Al_2O_3$	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$FeO^+$	MnO	MgO	Сумма	CI/(CI+AI)	Mg/(Mg + Fe)
1	Б1-1	1,98	7,14	28,35	55,95	0,44	5,28	99,14	0,73	0,27
2	Б1-2	1,98	5,72	27,06	59,24	0,29	4,72	99,00	0,76	0,25
3	Б1-3	2,60	6,17	25,17	57,35	0,29	5,78	97,36	0,73	0,31
4	Б1-4	2,14	5,96	25,98	57,92	0,29	7,19	99,48	0,75	0,37
5	Б1-5	2,10	6,00	23,27	63,10	0,32	6,40	101,19	0,72	0,32
6	Б1-6	2,74	5,55	22,61	64,26	0,44	4,14	99,30	0,73	0,22
7	Б1-7	2,44	5,97	22,13	64,74	0,29	4,14	99,69	0,71	0,22

Химический состав (мас. %) хромтитаномагнетитов из руд пегматитового субтипа Бутыринского рудопроявления

Примечание. Анализы выполнены методами РСМА на приборе JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитик Л.К. Воронина). FeO<sup>+</sup> – все железо в виде FeO.

Таблица 9

Результаты флотации палладиево-платиновых	руд Бутыринского рудопроявления.	Проба Б-1
---	----------------------------------	-----------

				в г/т	мас. %							
	Pt	Pd	Ir	Rh	Os	Ru	Au	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu	Ni	Со	S
К-Т	24,47	17,53	2,98	0,55	0,51	0,23	1,80	1,38	1,120	0,160	0,013	0,770
пр.пр. III	13,30	10,90	0,24	0,29	0,042	0,030	0,70	1,62	0,086	0,073	0,007	0,076
пр.пр. II	5,12	3,60	0,045	0,07	0,041	0,070	0,68	1,65	0,037	0,058	0,006	0,043
пр.пр. I	3,20	2,25	0,040	0,064	0,028	0,026	0,45	2,10	0,020	0,058	0,005	0,022
к-т контр. флотац.	3,90	2,70	0,040	0,064	0,04	0,017	0,61	1,76	0,028	0,058	0,005	0,030
хвосты контр. флотац.	0,88	0,51	0,010	0,014	0,019	0,010	0,50	2,99	0,007	0,046	0,006	0,012
исходн. руда	1,54	1,18	0,060	0,015	0,035	0,015	0,03	2,90	0,014	0,050	0,006	0,015

Примечание. Анализы на ЭПГ выполнены в Институте геологии и геохимии УрО РАН химико-спектральным и спектрофотометрическим методами по аттестованным и сертифицированным методикам с чувствительностью: Pt 10 мг/т, Pd 2 мг/т, Rh 5 мг/т, Ir 10 мг/т, Ru 6 мг/т, Os 6мг/т. (Аналитики И.И. Неустроева, Ю.П. Любимцева, О.А. Березикова). К-т – концентрат флотации палладиево-платиновых руд; пр.пр. III – промпродукт III флотации руд; пр.пр. II – промпродукт II флотации руд; пр.пр. I – промпродукт I флотации руд; к-т контр. флот. – концентрат контрольной флотации руд; хвосты контр. флотац. – хвосты контрольной флотации руд; исходн. руда – исходная руда.

Таблица 10

Химический состав (мас. %) минералов платиновых металлов из руд пегматитового подтипа Бутыринского рудопроявления

№ пп	№ обр.	Pt	Pd	Rh	Ir	Au	Fe	Cu	Ni	Hg	Сумма
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Б-1-10	71,96	4,20	0,02	0,60	0,02	14,00	6,62	0,26	0,63	98,31

# Окончание таблицы 10

				-	-	_		0	10		1.0
1	2	3	4	5	6	- 7	8	9	10		12
2	b-1-13	70,50	5,20	0,11	1,04	0,00	11,60	8,20	0,92	1,04	98,61
3	Б-1-19	70,20	2,00	0,04	1,80	0,00	11,61	10,90	0,64	0,90	98,09
4	Б-1-21	71,50	1,74	0,06	1,12	0,00	12,10	11,00	0,56	0,46	98,54
5	Б-1-22	69,20	4,50	0,06	1,60	0,00	13,30	11,80	0,81	0,39	101,66
6	Б-1-25	72,29	2,80	0,05	1,20	0,00	10,94	10,89	2,03	0,41	100,61
7	Б-1-7	55,60	14,00	0,07	2,30	0,03	2,60	3,33	13,64	10,40	101,97
8	Б-1-1	70,68	1,90	0,05	0,48	0,00	12,63	10,93	1,10	0,71	98,48
9	Б-1-2	70,42	3,89	0,03	1,66	0,03	11,14	8,25	0,73	5,00	101,15
10	Б-1-8	63,00	6,49	0,04	0,91	0,02	4,34	11,80	2,46	12,90	101,96
11	Б-1-12	71,80	6,55	0,11	0,82	0,02	9,96	11,90	0,38	0,41	101,95
12	Б-1-16	68,90	5.80	0.03	0.78	0.00	11.90	13.00	1.27	0.57	102.25
13	Б-1-18	71.00	1.50	0.03	0.56	0.00	11.64	14.60	0.72	0.38	100.43
14	Б1-3	35 94	16 10	0.00	1 1 5	0.02	4 65	22 40	0.51	17.82	98.59
15	5-1-4	38 30	24.66	0.00	0.78	0.02	2 27	9 54	0.64	25.21	101 42
16	5-1-9	15 10	33.09	0.00	1 70	0.00	<u>2,2</u> 7 <u>4</u> 7 <u>4</u>	11.43	2 36	30.41	98.83
17	5-1-11	32 70	30.43	0,00	0.32	0.02	2.66	3.00	0.41	31.78	101.32
18	<b>5</b> -1-17	20.61	26 20	0.10	1.80	0.00	3.60	15.00	2,00	32.60	101,92
10	D-1-17	6.22	20,20	0,10	0.60	0,00	2 11	21.10	0.20	32,00	08.26
20	D-1-5	20.71	30.63	0,00	0,00	0.02	3.67	5.12	3 3 7	36.80	100 70
20	E 1 22	20,71	31.00	0,00	0,47	0,02	2.60	12 20	1.07	27.25	08.03
21	D-1-23	5,09	20.00	0,00	9,10	0,03	2,00	5.80	0.74	42 20	96,05
22	D-1-13	2,00	21.20	0,00	4,00	0,03	3,20	3,80	0,74	43,30	90,17
23	D-1-20	2,90	21.40	0,00	3,90	0,04	2,10	0.20	1,05	45,74	97,44
24	Б-1-14	3,10	31,40	0,00	4,00	0,02	3,00	9,30	0,39	44,00	97,21
25	<b>D-1-24</b>	3,33	30,40	0,00	8,00	0,04	1,00	8,90	0,45	45,40	97,78
	•			Ат	омные кс	нцентра	ции				
1	Б-1-10	47,644	5,099	0,025	0,403	0,013	32,380	13,458	0,572	0,406	_
2	Б-1-13	46,668	6,312	0,139	0,699	0,000	26,822	16,666	2,024	0,670	_
3	Б-1-19	45,954	2,400	0,050	1,196	0,000	26,527	21,908	1,392	0,573	_
4	Б-1-21	46,341	2,068	0,074	0,737	0,00	27,394	21,890	1,206	0,290	_
5	Б-1-22	41,952	5,002	0,069	0,985	0,000	28,166	21,964	1,632	0,230	_
6	Б-1-25	45,889	3,259	0,060	0,773	0,000	24,259	21,225	4,282	0,253	_
7	Б-1-7	35,076	16,194	0,084	1,473	0,018	5,730	6,450	28,594	6,381	_
8	Б-1-1	45,085	2,222	0,060	0,311	0,000	28,143	21,407	2,332	0,440	_
9	Б-1-2	46,652	4,725	0,038	1,116	0,020	25,781	16,781	1,607	3,280	_
10	Б-1-8	42,471	8,022	0,051	0,623	0,013	10,220	24,631	5,511	8,458	_
11	Б-1-12	45,483	7,608	0,132	0,527	0,012	22,040	23,145	0,800	0,253	_
12	Б-1-16	41,346	6,382	0,034	0,475	0,000	24,946	23,952	2,532	0,333	_
13	Б-1-18	43,658	1,691	0,035	0,350	0,000	25,003	27,565	1,471	0,227	_
14	Б-1-3	21,055	17,294	0,000	0,684	0,012	9,517	40,292	0,993	10,153	_
15	Б-1-4	25,846	30,513	0,000	0,535	0,013	5,351	19,767	1,435	16,54	_
16	Б-1-9	9,062	36,410	0,000	1,042	0,000	9,937	21,060	4,710	17,780	-
17	Б-1-11	23,422	39,964	0,000	0,233	0,012	6,656	6,598	0,976	22,139	_
18	Б-1-17	12,288	28,656	0,113	1,091	0,000	7,502	27,473	3,964	18,913	_
19	Б-1-5	3,534	36,257	0,000	0,346	0,023	4,188	36,812	0,547	18,292	_
20	Б-1-6	13,542	36,723	0,000	0,312	0,013	8,406	10,279	7,322	23,403	_
21	Б-1-23	2,335	37,116	0,000	5,845	0,019	5,747	23,703	2,250	22,986	
22	Б-1-15	3,797	38,411	0,000	3,166	0,020	12,315	12,073	1,667	28,551	_
23	Б-1-20	1,872	38,104	0,000	3,976	0,026	4,870	20,589	2,317	28,245	_
24	Б-1-14	3,403	38,411	0,000	2,709	0,013	6,992	19,050	0,865	28,558	_
25	Б-1-24	2,452	38,712	0,000	5,554	0,027	2,572	18,978	1,039	30,666	_

Примечание. 1-6 – тетраферроплатина палладистая, медистая малоиридистая; 7 – ферроникельплатина палладистая и медистая; 8-13 – туламинит палладистый; 14-25 – амальгамы платинисто-палладистой меди. Анализы выполнены методами РСМА на приборе JXA-5 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (аналитик Л.К. Воронина). далее 68,79/31,21 и 64,31/35,69 - для месторождения Сырковское (табл. 3). Содержание меди в этих составах обычно от 0,73 до 2,51 ат. % с возрастанием в отдельных случаях до 5,6-6,1 ат. %. Содержание никеля обычно от 0,2 до 1,0 ат. % с возрастанием в отдельных образцах до 6,0-16,6 ат. %. Иридий является характерной постоянной составляющей в количестве от 1,0 до 3,0 ат. %, в единичных случаях до 8,0 ат. % (табл. 3). Палладий и родий обычно присутствуют в небольших количествах – менее 1,0 ат. %. Осмий и рутений либо отсутствуют вообще, либо установлены в незначительных количествах – менее 0,1-0,5 ат. %. Зерна платины являются неоднородными и часто состоят из двух-четырех минеральных фаз. Наиболее распространенными (около 80 % фаз) являются составы со стехиометрическими соотношениями приближающимися к 3 : 1 (ЭПГ – 2,80-2,62; БМ (базисные металлы) – 1,20-1,38). Более редкие составы (около 13,5 % фаз) имеют соотношения 1 : 1 (ЭПГ – 1,0-1,1; БМ – 1,0-0,9) при ведущей роли железа. Еще более редкие составы (около 5,5 % фаз) при той же стехиометрии обогащены медью (ЭПГ – 1,0; Си, Fe – 1,0). Прочие составы (менее 1 % фаз) представлены редкими изолированными включениями минералов платиновых металлов в платине и продуктами распада в ней твердых растворов тугоплавких платиноидов (иридия, осмия, рутения). Таким образом, на основе оптических, кристалломорфологических и вещественных характеристик (соотношения основных компонентов в минералах) можно считать установленным, что в рудах хромитового подтипа наиболее распространена изоферроплатина иридистая, а в отдельных случаях и высокоиридистая (табл. 3, ан. 30, 31). Реже присутствуют составы, отвечающие по тем же характеристикам иридистой тетраферроплатине и туламиниту (табл. 3). Изучение распределения основных минералообразующих компонентов внутри минеральных зерен показало, что для рассмотренных железо-платиновых твердых растворов характерно относительно равномерное распределение всех компонентов, включая иридий, родий, медь и никель.

Установленный типохимизм изоферроплатины месторождения Госшахта заключается в устойчиво повышенном содержании иридия (2,29 ат. %) при крайне низких примесных количествах меди (1,33 ат. %) и особенно никеля (0,61 ат. %). В других месторождениях Соловьевогорского рудного поля эти содержания в изоферроплатине несколько выше и составляют для иридия – 3,29 ат. %, для меди – 1,43 ат. % и для никеля – 0,68 ат. %. Типохимизм тетраферроплатины месторождения Госшахта несколько иной: при повышенном содержании иридия (2,37 ат. %) в ней присутствует больше меди (3,90 ат. %) и, особенно, никеля – до 8,60 ат. % и более. Иридистая изоферроплатина и иридистая тетраферроплатина слагает изолированные зерна и скопления кристаллических зерен в хромшпинелидах и оливинах, а также присутствует в виде полифазных сростков, причем иридистая тетраферроплатина нарастает в виде тонких (50-200 мкм) кайм на зерна иридистой изоферроплатины. В кристаллических зернах высокоиридистой изоферроплатины месторождений Сырковское и Крутой Лог встречаются мелкие и тонкие (5-10 до 50 мкм) выделения иридия и осмирида (платинистого осмирида), морфологически похожие на продукты распада твердых растворов иридия и осмия в платине. В парагенезисе с иридистой изоферроплатиной и тетраферроплатиной присутствуют также осмирид, иридосмин и лаурит (лаурит осмиевый) в виде пластинчатых и игольчатых включений, доматических кристаллов, пучкообразных гнезд размерами от 5-10 × 20-40 мкм и до  $20 \times 100-150$  мкм, находящихся в краевых частях этих зерен. Полученные данные по составу главных минералов платиновых металлов в месторождениях хромитового подтипа свидетельствуют, что в процессе рудоотложения происходит существенное уменьшение отношения Pt/Ir и отношения платины к сумме неблагородных примесей (рис. 8). Результаты гранулометрического анализа платины из руд рассмотренных месторождений (Госшахта и Сырковское) показали, что более 80 % извлеченных зерен платины относятся к классам крупности более 100 мкм, то есть, что руды хромитового подтипа обладают наилучшей способностью к формированию концентраций в виде обычных и самородкосодержащих россыпей.

### Дунитовый подтип руд

Руды этого подтипа встречены в различных местах Соловьевогорского рудного поля (участки Александровский, Крутой Лог и др.), но наиболее полно представлены и изучены в пределах месторождения Дунитовое в районе нового Соловьевогорского карьера. Как отмечалось выше, для хромит-платиновых руд дунитового подтипа установлено сонахождение в едином парагенезисе умеренно хромистых и умеренно магнезиальных хромшпинелидов, оливинов относительно повышенной железистости, более железистой и менее иридистой, по сравнению с хромитовым подтипом, платины (рис. 8, табл. 4-6). Железо-платиновые сплавы являются резко преобладающими минералами платиновых металлов в рудах дунитового подтипа, составляющими около 98 % от идентифицированных минеральных фаз. Отношения суммы всех ЭПГ в платине к сумме неблагородных примесей (Fe + Cu + Ni) в ней изменяется в пределах (ат. %): 53,51/46,49 (64,71/35,29) и 49,07/50,93 (64,25/35,75). Содержания меди в наиболее распространенных составах – от 4,9 до 11,0 ат. % с возрастанием в отдельных образцах до 18,0-19,0 ат. %. Содержание никеля в них – от 0,5 до 5,0 ат. % с возрастанием в отдельных образцах до 15,2 ат. %. Иридий является характерной примесью в платине, но обычно присутствует в небольших количествах (от 0,3 до 1,0 ат. %), лишь изредка достигая содержаний в 1,50-2,28 ат. % (табл. 6). Палладий и родий содержатся в малых количествах – 0,15-0,6 и 0,3-1,0 ат. % соответственно. Осмий и рутений либо вообще отсутствует, либо содержатся в количествах менее 0,1 ат. %. Зерна платины чаще имеют однородное строение, но иногда состоят из 2-5 минеральных фаз различного состава. Резко преобладают (около 90 % фаз) составы со стехиометрическими соотношениями, приближающимися к 1:1 (ЭПГ – 1,03; БМ – 0,97). Более редкие составы (около 8 % фаз) имеют соотношения ЭПГ – 2,59; БМ – 1,41. Прочие составы (менее 2 % фаз) представлены редкими зернами туламинита и изолированными включениями минералов осмия, рутения и иридия в платине.

Таким образом, на основе оптических характеристик и соотношения основных компонентов в минералах, можно считать установленным, что в рудах дунитового подтипа наиболее распространена тетраферроплатина малоиридистая и иридистая (табл. 6). Редко встречаются составы, отвечающие в первом приближении малоиридистой изоферроплатине, обогащенной железом, и туламинитом. Изучение распределения основных минералообразующих компонентов (Pt, Fe, Ir, Cu и Ni) по профилям внутри десятков отдельных минеральных зерен тетраферроплатины величиной от 50 × 50 до 400 × 400 мкм показало их равномерное распределение, однако установлено, что содержания меди и никеля в них резко изменяются от зерна к зерну даже в пределах одного образца. Установленный типохимизм тетраферроплатины месторождения Дунитовое заключается в устойчиво низком (около 1 ат. %) содержании иридия при высоком (около 11,4 ат. %) содержании меди и повышенном и резко варьирующим содержании никеля (от 5,0 до 15,0 ат. %). Наряду с изолированными однородными кристаллическими зернами малоиридистой тетраферроплатины и малоиридистой изоферроплатины встречаются их кристаллические сростки зонального строения, центральная часть которых представлена малоиридистой изоферроплатиной, а периферия, в виде каймы шириной до 100 мкм, - тетраферроплатиной. В гнездообразных кристаллических сростках зерен малоиридистой тетраферроплатины размером до 1 × 2 мм встречены идиоморфные игольчатые, пластинчатые и доматические включения иридосмина, осмия самородного и лаурита осмиевого. Полученные данные по составу основных платиновых минералов месторождения Дунитовое (табл. 6) свидетельствует о наличии четко выраженного иридиевого тренда, фиксирующего резкое понижение содержания иридия и других тугоплавких платиноидов и возрастание содержаний железа и цветных металлов к заключительным стадиям процесса формирования руд дунитового подтипа (рис. 8).

Гранулометрический анализ платины, извлеченной из руд этого подтипа, указывает, что менее половины (45 %) ее кристаллических зерен относится к классам крупности более 100 мкм, то есть что руды месторождений дунитового подтипа являются основным поставщиком тонкого и мелкого металла в платиновые россыпи, связанные с месторождениями уральского типа.

### Пегматитовый подтип руд

Для палладиево-платиновых руд пегматитового подтипа характерен тесный парагенезис силикатных минералов относительно повышенной железистости (оливинов с Fa 8-9 мол. % и клинопироксенов с Fa 8-12 мол. %) и специфичного рудного минерала – хромферришпинелида, содержащего минимальное количество хрома и магния и максимальное количество железа и титана (табл. 7, 8, рис. 3). Столь же специфичным является и состав платиновых и паллади-

евых фаз, находящихся в парагенезисе с этими силикатными и рудными минералами, а также с сульфидами железа и цветных металлов, количество которых оказалось значительным, в отличие от хромитового и дунитового подтипов руд (табл. 9). Железо-платиновые сплавы, обогащенные палладием и медью, составляют около 60 % от идентифицированных минеральных фаз платины (табл. 10). Около 40 % встреченных фаз представлены амальгамами переменного состава на основе палладия, платины и меди (табл. 10). Около 1 % фаз сложено сульфидами (арсенидами) цветных металлов и продуктами их изменения, содержащими ощутимые примесные количества палладия, платины, родия и золота (от 0,1-0,5 до 1,0-5,0 мас. %). Отношения суммы всех ЭПГ в платине (палладистой тетраферроплатине, палладистом туламините) к сумме неблагородных примесей в ней изменяется в следующих пределах (ат. %): 53,82/46,18 (53,76/46,24) и 48,01/51,99 (45,73/ 54,27). Содержание меди в этих составах – от 13,5 до 22,0 ат. % с возрастанием в отдельных образцах до 24,0-27,5 ат. %. Содержание никеля в них – от 0,57 до 2,0-5,5 ат. %, с возрастанием в палладистой ферроникельплатине до 28,5 ат. %. Иридий является характерной примесью в этих составах, но присутствует в небольших количествах – от 0,3 до 1,0 ат. %, в единичных случаях - до 1,5 ат. %. Палладий - типичная примесь в платине, присутствующая в количестве от 2,0 до 8,0 ат. %, в единичных случаях - до 16,2 ат. %. Осмий и рутений отсутствуют, родий содержится в минимальных количествах – около и менее 0,1 ат. %. Составы амальгам варьируют в широких пределах (табл. 10): отношение суммы всех ЭПГ в них к сумме неблагородных примесей изменяется от 63,63/36,37 до 39,05/60,95. Содержание платины в них – от 1,9 до 25,8 ат. %, а палладия при этом – от 17,3 до 39,9 ат. %. Медь содержится в количестве от 6,6 до 36,0-40,0 ат. %. Специфика платино-палладиевых амальгам определяется постоянным присутствием меди и наличием иридия в количестве от 0,2-0,5 до 1,0-3,0 ат. %, в единичных случаях – до 5,0-6,0 ат. %. Зерна минералов платиновых металлов чаще имеют 1-, 2-фазное строение, но иногда состоят из сростков 3-6 минеральных фаз различного состава. Преобладают (около 46 % фаз) составы со стехиометрическими соотношениями, приближающимися к 1:1 (ЭПГ – 0,96-1,08; БМ – 0,92-1,04). Более редки (около 12 % фаз) составы с ЭПГ – 1,83-2,15; БМ – 1,85-2,17. Среди амальгам платинисто-палладистой меди (около 40 % фаз) резко преобладают составы с соотношениями 5 : 1-3 : 1 (ЭПГ – 4,88; БМ – 1,12-ЭПГ – 2,95; БМ – 1,05).

Таким образом, на основе изучения оптических свойств и соотношения основных компонентов в минералах, можно утверждать, что в рудах пегматитового подтипа наиболее распространены тетраферроплатина палладистая и медистая и туламинит палладистый. Менее распространены, но очень характерны, амальгамы платинисто-палладистой меди. Редко встречаются составы, отвечающие палладистой и медистой ферроникельплатине. Изучение распределения основных минералообразующих компонентов по профилям и всей площади зерен платины, имеющих размеры от 50 × 50 до 100 × 200 мкм, выявило их характерную неоднородность, определяемую пятнистым распределением концентраций этих элементов и наличием узких (10-25 мкм) кайм и полос, сложенных амальгамами и самородной медью, содержащей примесные количества ЭПГ. Типохимизм тетраферроплатины и туламинита рассматриваемого подтипа руд в первую очередь определяется повышенным и высоким содержанием палладия и меди, при устойчиво низких содержаниях иридия, и наличии постоянной и характерной примеси ртути в количестве 0,3-0,6 ат. %, в единичных случаях - до 3,0-8,0 ат. %. Амальгамы присутствуют не только в виде кайм и полос на стыках зерен, но и в виде самостоятельных зерен размером от  $40 \times 70$  до  $100 \times 200$  мкм в силикатах, хромтитаномагнетитах и сульфидах цветных металлов. Не исключено, что отдельные тонкие (5 мкм и менее) включения в амальгамах сложены медистым потаритом (Pd,Cu)Hg. Морфология выделений минералов платиновых металлов разнообразна, но резко преобладают изометричные, пластинчатые и клиновидные зерна. Реже встречаются кристаллические зерна, сростки неправильной сложной формы и зерна зонального строения. Полученные данные по составу и соотношению основных минералов руд пегматитового подтипа свидетельствуют о возникновении на заключительной стадии их формирования ртутьсодержащих туламинитов и амальгам, содержащих максимальное количество неблагородных примесей (табл. 10, рис. 8). Для рассмотренного парагенезиса характерно присутствие различных сульфидов и арсенидов цветных металлов, и продуктов их изменения (замещения), содержащих примесные количества палладия, платины, родия и золота. Эти минералы представлены халькопиритом, медистым пентландитом, маухеритом, самородной медью и другими. Так, в арсенидах никеля, типа маухерита, содержится до 5-6 мас. % платины, до 1 мас. % палладия, до 0,9 мас. % иридия и до 0,6 мас. % золота. В медистом пентландите, содержащем до 12,5 мас. % меди, установлено присутствие платины, палладия и родия в количестве до 0,3, 0,6 и 0,2 мас. %, соответственно. Как уже отмечалось выше, по результатам гранулометрического анализа платины, извлеченной из руд пегматитового подтипа (статистика по 75 зернам), 87,0 % зерен относится к классам менее 100 мкм, то есть к мелким и тонким классам. Лишь 1,5 % из них – к средним и крупным классам - более 400 мкм. Таким образом, установлено, что платинометальная минерализация пегматитового подтипа руд обладает минимальной, по сравнению с хромитовым и дунитовым подтипами руд, россыпеобразующей способностью, добавляя лишь пылевидную платину и амальгамы в материал уральских россыпей.

# Геолого-структурная позиция и особенности формирования различных подтипов руд: общая эволюция процесса хромит-платинового рудообразования в месторождениях уральского типа

Детальное геологическое картирование дунитовых тел ряда массивов Платиноносного пояса Урала, выполненное ранее Н.К. Высоцким [1913, 1923], и значительно позднее Н.В. Бутыриным [1945], С.А. Кашиным и др. [1956], И.А. и Л.В. Малаховыми [1970], О.К. Ивановым и др. [1980, 1997, и др.] позволило установить пространственное размещение различных типов дунитов, подчеркивающее их гетерогенность, и наметить основные структурные элементы дунитовых ядер. Наиболее тонкозернистые структурные разновидности дунитов, как правило, слагают ряд небольших участков и субмеридионально вытянутых зон в центральных и западных периферийных частях массивов. Встречающиеся чаще мелкозернистые дуниты широко распространены в центральных частях массивов и по периферии дунитовых ядер. Среднезернистые и крупнозернистые дуниты часто пространственно тяготеют к центральным (приапикальным) частям массивов. Так, в частности, в южной и центральной частях массива горы Соловьевой располагаются, по крайней мере, три зоны крупнозернистых перекристаллизованных дунитов размером 500 × 600 м каждая. Вышеупомянутое крупномасштабное картирование таких зон в верховьях Александровского Лога, на южном склоне горы Соловьевой, позволило выявить однотипную картину: крупнозернистые дуниты обычно образуют серию небольших субмеридионально вытянутых зон среди поля среднезернистых дунитовых фаций с нерезкими границами между ними. Более мощные зоны среднезернистых дунитов распространены гораздо шире и образуют протяженные (1,3-2 км) поля шириной до 700 м. Отметим, что Госшахта, находящаяся на северо-западном склоне горы Соловьевой, также расположена в таких дунитах. Мелкозернистые дуниты в основном пространственно тяготеют к приосевой и западной частям массива и обладают наиболее широким распространением. Главной особенностью массива горы Соловьевой является присутствие в его центральной части огромного количества хромитовых гнезд, шлиров и жил относительно небольшой мощности. Общее зафиксированное их число приближается к 1500, причем простирание и падение их может быть самым различным. Однако тектоническая решетка Соловьевогорского рудного поля определяется наличием трех следующих главных направлений трещиноватости: субмеридионального (азимут простирания 170-180°) с крутым падением на восток; субширотного (азимут простирания 270-280°) с крутым падением на север и северовосток и северо-западного (азимут простирания 320-350°) с крутыми углами падения на северо-восток или юго-запад. Направление структурных элементов фиксируется масштабными зеркалами (площадью до 300-500 м<sup>2</sup> и более) и бороздами скольжения, зонами тектонитов и черных серпентинитов, мощностью от 5 до 50 см, зонами метасоматитов флогопит-тальк-антигоритового и хлорит-тальк-антигоритового состава мощностью 400-600 м и протяженностью до 1 км. На южном и западном склоне г. Соловьевой на площади 3 × 2 км, к узлам тектонической решетки приурочены около 40 рудных тел хромитового подтипа руд гнездо-, струеобразной и штоко-, трубообразной формы (рис. 2, Ч. І.) с диаметрами элиптического или овального сечения их в 3-5-8 м. Эти рудные тела разведаны, прослежены и отработаны до глубин 30-50-



Рис. 8. Эволюция составов минералов платиновых металлов при формировании разных подтипов руд в месторождениях уральского типа: закономерное уменьшение иридиевости и увеличение неблагородности минералов платиновых металлов.

Хромитовый подтип (сплошная толстая линия): 1 – изоферроплатина иридистая и высокоиридистая; 2 – тетраферроплатина иридистая; 3 – туламинит. Дунитовый подтип (сплошная тонкая линия): 4 – изоферроплатина малоиридистая; 5 – тетраферроплатина малоиридистая; 6 – туламинит. Пегматитовый подтип (прерывистая тонкая линия): 7 – тетраферроплатина палладистая и медистая, малоиридистая; 8 – туламинит палладистый, малоиридистый; 9 – амальгамы платинисто-палладистой меди. Составлен на основе 96 анализов минералов платиновых металлов методами РСМА в ИГГ УрО РАН (прибор JXA-5, аналитики В.Г. Гмыра, Л.К. Воронина).

120 м, а в одном случае (Госшахта) – до глубины 183 м. Расстояние между отдельными объектами этого рудного поля составляет от 20-50 до 300-500 м. Из каждого месторождения было добыто от 20-50 до 100 кг платины и более. Хромит-платиновые гнезда, линзы и струи, как правило, не выходят в дуниты за пределы трубчатых рудных тел. Однако рядом с отдельными из них соседствуют маломощные каемчатые жилы с дунитовым подтипом оруденения, фиксирующие собой дальнейшую эволюцию рудного процесса (рис. 7, Ч. І.). Ориентировка этих жил, как и многочисленных других, расположенных юго-западнее (западнее), в поле месторождения Дунитовое, определяется развитием установленного по геологическим и геофизическим данным крупного (возможно дорудного) тектонического нарушения, имеющего северо-западное простирание и крутое северо-восточное падение.

Особенности формирования рассмотренных рудных тел (месторождения Госшахта, Крутой Лог, Сырковское, Александровское-Восточное) определялись не только маловодным составом рудообразующего флюида и более высокими температурами процесса (высокое и предельное насыщение иридием железо-платиновых твердых растворов, аномально широкое присутствие свежего оливина в цементе хромит-платиновых руд), но и высокими скоростными характеристиками процесса разгрузки флюида в ограниченных объемах, что зафиксировалось в исключительно широком развитии штоко-, трубообразных рудных тел с брекчиевидными и петельчато-пятнистыми текстурами руд хромитового подтипа. Последующая генерализация структурных элементов северозападного простирания и сопряженное развитие оперяющих их трещин скалывания и трещин отрыва привели к формированию хромит-платиновых жильных тел (зон) рудного поля месторождения Дунитовое. Линейные непрерывные и прерывистые рудные зоны имеют четкое северо-западное простирание (300-330°) и крутое (60-80°) падение к юго-западу и северо-востоку. С обеих сторон эти рудные зоны ограничены низкотемпературными левыми сдвигами, по всей видимости, сингенетичными платинометальной минерализации. Для хромитплатиновых руд дунитового подтипа характерны линзовидные, прожилково-пятнистые и полосчатые текстуры. Короткие каемчатые жилки и пятнисто-полосообразные обособления хромшпинелида не содержат неизмененного оливина в цементе руд и каймах, сложенных исключительно серпентином. Признаки сильной гидратации и флюидизации руд этого подтипа зафиксированы в широком присутствии в цементе руд серпентина, хлорита, слюд, амфибола и карбонатов. Относительно более низкотемпературная природа хромит-платиновых руд дунитового подтипа подчеркивается выдержанным низкоиридиевым составом платины, содержащей большие количества железа и цветных металлов, а также и более железистым составом хромшпинелида и сосуществующих силикатов.

Выявленная латеральная зональность в размещении хромитового и дунитового подтипов хромит-платиновых руд в апикальной и приапикальной частях дунитовых ядер хорошо дополняется и согласуется с положением руд третьего (пегматитового) подтипа вблизи (в 500-700 м) зоны контакта дунитов с клинопироксенитовой каймой-оторочкой. Секущие дуниты жильные тела клинопироксенитов с хром-титаномагнетитовым оруденением известны в ряде массивов Платиноносного пояса: Нижнетагильском, Каменнокосьвинском, Желтая Сопка и др. Но лишь в хромтитаномагнетит-клинопироксенитовых жилах Косьвинского Камня установлена собственная платино-палладиевая минерализация. Она присутствует в парагенезисе с малохромистыми высокожелезистыми и высокотитанистыми шпинелями (хромтитаномагнетитами) и умеренно железистыми силикатами (оливинами и клинопироксенами) с железистостью 8,2-8,6 мол. % и 7,5-12,0 мол. %, соответственно. Вкрапленно-петельчатая и сидеронитовая текстуры хромтитаномагнетитовых руд, находящихся в прифронтальной и фронтальной частях клинопироксенитовой жилы, наличие останцов дунитов со следами замещения акцессорного хромшпинелида хромтитаномагнетитом и оливина – клинопироксеном, характерная вкрапленность сульфидов железа и цветных металлов дали основание связывать образование платиноносных хромтитаномагнетит-клинопироксенитовых жил с процессами метасоматоза на пневматолит-гидротермальной стадии рудогенеза [Ярош, Фоминых, 1976].

Рудообразующие хромтитаномагнетиты аномального состава, встреченные в пироксенит-пегматитовых жилах Косьвинского Камня, редко встречаются в дунитовых массивах Платиноносного пояса Урала. Однако они довольно обычны и давно (еще в 70-е годы прошлого века) описаны в платиноносных пироксенит-пегматитах Критической зоны Бушвельда [Cameron, Glover, 1973] и платиновых самородках Гудньюс Бэй на Аляске [Snetsiger, 1973]. При этом формирование широкой серии таких шпинелей переменного состава вдоль контактовых зон «хромит-пегматит» рассматривается как результат реакции флюида, обогащенного титаном и железом, с хромитом, обогащенным хромом, алюминием и магнием. Метасоматическое замещение при этом, как считают, «является следствием твердофазной диффузии катионов по химическим градиентам между пегматитами и хромитами». В целом, хромит-титаномагнетитовые серии характеризуют широкие пределы смесимости этих минералов при относительно низких температурах. В последнее время [Сидоров и др., 2004] платиноносные хромовые шпинели ряда хромпикотит-феррихромит-хромтитаномагнетит описаны в зональном мафит-ультрамафитовом массиве Гальмоэнан (Корякия). Рассчитанные параметры термодинамического режима формирования этой минерализации свидетельствуют об условиях сравнительно низких температур процесса хромитообразования (660-820°С), при относительно высоких значениях фугитивности кислорода ((+1,3)-(+3,5) log. единиц относительно буфера FMQ). Таким образом, палладиево-платиновые хромтитаномагнетитовые руды в пироксенит-пегматитовых жилах среди ординарных дунитов не могут рассматриваться в качестве аналога, а тем более генотипа, пироксенитовых палладиевых руд Урала, но дают представление о заключительных наиболее низкотемпературных процессах, протекавших в платиновых месторождениях уральского типа.

Как установлено, дунитовые члены дунитверлит-клинопироксенит-тылаитовой серии, слагающей комплексы собственно Платиноносного пояса Урала, исходно формируются в рамках процесса, который вполне может быть описан Р-Т параметрами магматической стадии [Малахов, 1983; Иванов О., 1997, и др.]. Состав таких дунитов достаточно прост: 99 % оливина, серпентинизированного в очень широких пределах (от 5 до 85 об. % раннего петельчатого серпентина, лизардита 1 генерации), около 1 % хромшпинелида, остальное - акцессорный клинопироксен (диопсид) и суперакцессорные минералы, в первую очередь МПГ. Оливин дунитов в абсолютном большинстве случаев содержит от 7 до 9 % фаялитовой молекулы. Нижний предел состава оливинов можно определить как Fa 6, верхний – как Fa 10-11, но в общей массе дунитов такие породы редки. Содержание СаО в оливинах дунитов с фоновой железистостью составляет 0,30-0,35 вес. % (рис. 5). Хромшпинелид, присутствующий в виде акцессорной вкрапленности, имеет относительно выдержанный состав и на диаграмме «хромистость-магнезиальность» образует свое поле с параметрами Cr/(Cr + Al) = 0,70-0,85 и Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>) = 0,30-0,48 (рис. 3). Установлено, что состав хромшпинелида в сегрегационных шлирах, гнездышках и полосках (просечках) совершенно аналогичен составу акцессорного хромшпинелида.

Распределение платины и платиноидов в фоновых дунитах и ранних сегрегационных обособлениях хромшпинелида коррелирует с параметрами их состава и положением в разрезе дунитовых тел (рис. 4, Ч. І). В изученных фоновых дунитах Нижнетагильского, Светлоборского, Каменушинского и Каменнокосьвинского массивов, а так же в сегрегационных обособлениях хромшпинелида в них, содержание платины изменяется от следов (5-10 мг/т) до 70 мг/т, максимально до 100-200 мг/т, никогда не достигая высоких, рудных концентраций. Таким образом, на основе исследованных материалов можно утверждать, что геохимическое распределение платины в основной массе дунитов, как продуктах собственно магматического процесса, не приводит к формированию аномальных, рудных концентраций, а тем более месторождений платиновых руд. Как показано выше, только в локальных участках дунитовых тел, контролируемых структурными и вещественными особенностями дунитов, происходит возникновение рудных концентраций платины и платиноидов, связанных с процессами их переотложения и привноса рудообразующими флюидами на постмагматическом этапе эволюции дунитов. Постмагматическая эволюция фиксируется резким и характерным изменением структурно-текстурных и вещественных характеристик и прослеживается по закономерной смене относительно равновесных парагенезисов главных сосуществующих минералов в рудах уральского типа: хромшпинелидов, оливинов, платины.

Для наиболее ранней стадии формирования руд уральского типа (хромитовый подтип) характерны минералы более высокотемпературного парагенезиса: наиболее высокохромистые и предельно магнезиальные хромшпинелиды, наименее железистые оливины (Fa 6-7) с минимальными содержаниями CaO 0,18-0,25 вес. %, наиболее иридистая и наименее железистая изоферроплатина с включениями собственных иридиевых минералов. Резко преобладающая крупная и средняя по размерам платина (400-1000 мкм и более) обеспечивает высокую россыпеобразующую способность руд этого этапа.

Для последующей стадии формирования руд (дунитовый подтип) характерны минералы иного парагенезиса: умеренно хромистые, менее магнезиальные и более железистые хромшпинелиды, более железистые оливины (Fa 7-8 %) с более высоким содержанием CaO (0,25-0,32 вес. %), более железистая, медистая, никелистая и менее иридистая тетраферроплатина практически без включений собственных иридиевых минералов. Резко преобладающие мелкие и тонкие (около и менее 100 мкм) зерна такой платины резко снижают россыпеобразующую способность руд данного этапа.

Для заключительной, наиболее низкотемпературной стадии формирования руд (пегматитовый подтип) типичны следующие минералы: наименее хромистые и наименее магнезиальные, но наиболее железистые и наиболее титанистые шпинелиды, наиболее железистые оливины (Fa 8-9 %) с максимальными содержаниями CaO (0,50-0,60 вес. %), наименее иридистая тетраферроплатина с максимальными содержаниями палладия и меди, с палладистым туламинитом и широким спектром амальгам платинисто-палладистой меди. Резко преобладающий тонкий и пылевидный металл (менее 100-50 мкм) определяет практически нероссыпеобразующий тип руд этого этапа. В заключение подчеркнем, что к завершающим этапам формирования руд уральского типа температура их образования уменьшается, возрастает  $fO_2$  и  $fS_2$ , что прослеживается по изменению состава оливина (возрастанию железистости с 4-6 до 9-10 мол. %), увеличению степени окисления железа в сосуществующих силикатах и резкому повышению количества сульфидных минералов в платино-палладиевых рудах пегматитового подтипа.

### Выводы

Результаты многолетних исследований, проведенных на многих мафит-ультрамафитовых комплексах Платиноносного пояса Среднего и Северного Урала позволяют утверждать, что эти образования и вмещаемые ими разнообразные платиносодержащие и платиновые руды гетерогенны по своей природе. В целом Платиноносный пояс Урала имеет островодужную природу и сложен продуктами кристаллизации разноглубинных выплавок, генерировавшихся над зоной субдукции. Основная часть дунитов, клинопироксенитов и оливин-анортитовых габбро пояса образовалось в результате взаимодействия андезитоидных расплавов, поднимавшихся от силурийской зоны субдукции, с ультраосновными породами вышележащего мантийного клина. Среди пород Пояса нет комплексов моложе 410-415 млн. лет, а все полученные цифры, меньше этой величины, отражают этапы пластических деформаций. Эти деформации привели к нарушениям существовавших изотопных систем; они происходили в девоне и карбоне при разных температурах и давлениях, в частности, при коллизии Тагильского островодужного террейна с Русской платформой.

На основе исследования равновесных парагенезисов основных сосуществующих минералов дунитов и хромит-платинометальных руд (хромшпинелидов, оливинов, платины) установлена гетерогенность рудовмещающих дунитов и полигенность платинометальных руд уральского типа. Наряду с наиболее распространенными ординарными (фоновыми) дунитами, образование которых происходило на магматической стадии формирования зональных комплексов, существуют разнообразные другие, возникающие на постмагматической стадии их преобразования под воздействием деформаций и флюидов при перемещении на уровень верхней коры в условиях падающих температур и давлений. Содержание рассеянной платины в фоновых дунитах весьма низкое (от 10 до 70 мг/т) и коррелируется с их составом и положением в разрезе дунитовых тел. В находящихся среди них тонкополосчатых хромитоносных дунитах и сегрегационных хромитовых шлирах содержания платины также весьма низкие, максимально до 100-200 мг/т, а состав хромшпинелида аналогичен составу акцессорных хромшпинелидов фоновых дунитов. Среди ординарных дунитов с закономерными вариациями геохимического поля по платине и ЭПГ впервые выявлены парные (негативные и позитивные) геохимические аномалии по платине, и установлена стандартная мегазональность дунитовых тел: фоновый дунит-негативная геохимическая аномалия-позитивная геохимическая аномалия (хромит-платиновое рудное тело). Все крупные хромит-платинометальные концентрации, и сопряженные негативные ореолы в дунитах, связаны с зонами и узлами хрупких деформаций, определяемыми тремя основными направлениями структурных элементов: субмеридиональным, субширотным, северо-западным. В целом, структуры платиноворудных полей аппроксимируются планами поздних постпластических хрупких деформаций дунитовых тел.

В объеме руд уральского типа на основе минералого-геохимических и структурно-геологических критериев выделены три дискретных подтипа коренных платинопроявлений, различающихся относительной степенью связи феррихромшпинелидов и платины, морфологией, крупностью, составом выделений минералов платины, составом шпинелидов, оливина, положением в структуре комплекса: хромитовый подтип, дунитовый подтип, пегматитовый подтип.

Впервые установлена латеральная зональность в размещении этих разностей хромит-платинометальных руд. В апикальной части дунитовых ядер проявлен наиболее ранний хромитовый подтип иридиево-платиновых руд, формирующий многочисленные небольшие по размерам и разобщенные гнездо-, струеобразные и штоко-, трубообразные рудные тела с пятнисто-петельчатыми и брекчиевидными текстурами. В приапикальных частях дунитовых тел находятся маломощные протяженные зоны каемчатых жил с пятнисто-прожилкововкрапленной и полосчатой текстурами – дунитовый подтип платиновых руд. В периферических частях дунитовых тел, зонах контакта с клинопироксенитами, формируются жильные тела пироксенит-пегматитов (дунит-пегматитов) с хромтитаномагнетитовыми и палладиево-платиновыми рудами, обладающими вкрапленно-петельчатыми, сидеронитовыми и брекчиевидными текстурами – пегматитовый подтип платинометальных руд.

Постмагматическая эволюция дунитов при формировании различных подтипов платинометальных руд прослеживается по закономерной смене равновесных парагенезисов их главных сосуществующих минералов. Для наиболее ранней стадии (хромитовый подтип руд) характерны минералы наиболее высокотемпературного парагенезиса: высокохромистые предельно магнезиальные хромшпинелиды, наименее железистые оливины, наиболее иридистая изоферроплатина с включениями собственных иридиевых и иридийсодержащих минералов. Для средней стадии (дунитовый подтип руд) типичны умеренно хромистые, менее магнезиальные и более железистые хромшпинелиды, более железистые оливины, малоиридистая (медистая и никелистая) тетраферроплатина без включений собственных иридиевых фаз. Для заключительной, наиболее низкотемпературной стадии формирования руд (пегматитовый подтип руд) характерны наименее хромистые и магнезиальные, но наиболее железистые и титанистые шпинелиды, оливины с максимальной железистостью, наименее иридистая палладистая тетраферроплатина с максимальными содержаниями меди и широкий спектр амальгам платинисто-палладистой меди.

В целом, образование и преобразование хромит-платинометальных руд уральского типа происходило в рамках постмагматического этапа их эволюции. Россыпеобразующая способность платинометальных руд к заключительным стадиям их формирования резко уменьшается. Относительная степень проявления в дунитовых массивах пояса различных подтипов платинометальных руд, обладающих резко различной россыпеобразующей способностью, является ведущим критерием при прогнозировании платинометальных россыпей в пределах Платиноносного пояса Урала.

Мы благодарны И.И. Неустроевой, Ю.П. Любимцевой, О.А. Березиковой за выполнение многочисленных анализов на ЭПГ, Л.К. Воро-

ниной за анализы руд и концентратов на микрозонде, Н.Г. Наумовой и С.И. Нестеровой за технологические опыты по обогащению проб руд и горных пород и выделению концентратов. Особо благодарим С.И. Нестерову за подготовку большого количества проб к различным видам исследований и компьютерную обработку материалов статьи.

Исследования выполнены в рамках программы ОНЗ РАН «Геодинамика и механизмы деформирования литосферы», при частичной поддержке РФФИ (грант 06-05-64133) и программы «Ведущие научные школы» (НШ-4210.2006.5). Исследования были также поддержаны Европейским Союзом через проект INCO Copernicus (MinUrals no ICA2-CT-2000-10011).

## Список литературы

*Бутырин Н.В.* Месторождения коренной платины в Кытлымском платиноносном районе. Фонды Горно-геологического института УФАН СССР. Свердловск, 1945. 103 с.

Волченко Ю.А. Платиновое оруденение Нижнетагильского массива (Коренные проявления и россыпи). Путеводитель экскурсии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1999. 26 с.

*Высоцкий Н.К.* Месторождения платины Исовского и Нижне-Тагильского районов на Урале. Тр. Геолкома. Нов. сер. Вып. 62. СПб., 1913. 694 с.

*Высоцкий Н.К.* Платина и районы ее добычи. Ч. 2-3. Вып. 11. Петроград: КЕПС., 1923. С. 111-341.

*Высоцкий Н.К.* Платина и районы ее добычи. Ч. 4. Вып. 11. Петроград: КЕПС, 1925. С. 347-692.

Заварицкий А.Н. Коренные месторождения платины на Урале. Мат-лы по общей и прикладной геологии. Вып. 108. Л.: Изд. Геолкома, 1928. 56 с.

*Иванов А.А., Лизунов Н.В.* Платиноиды в ультраосновных породах Урала. Изв. АН СССР. Сер. геол. № 5. 1944. С. 178-186.

Иванов О.К., Шилов В.А., Шилова Т.А. Дуниты Нижнетагильского массива (Урал) // Изв. АН СССР. Сер. геол. № 10. 1980. С. 29-40.

Кашин С.А., Козак С.С., Николаева Л.А. и др. Минералогические и петрохимические особенности пород платиноносной формации Среднего Урала и некоторые закономерности распространения коренной платины. Тр. НИГРИ золота. М., 1956. 113 с.

*Малахов И.А.* Петрохимия главных формационных типов ультрабазитов. М.: Наука, 1983. 222 с.

*Малахов И.А., Малахова Л.В.* Нижне-Тагильский пироксенит-дунитовый массив и вмещающие его породы. Тр. ИГГ УФАН СССР. Вып. 83. Свердловск, 1970. 166 с.

Сидоров Е.Г. Осипенко А.Б., Козлов А.П., Костоянов А.И. Хромитовая минерализация в породах мафит-ультрафитового массива Гальмоэнан, Корякия (Россия) // Геология рудных месторождений. Т. 46. № 3. 2004. С. 235-252.

Фосс Г.В. Промышленная оценка коренных месторождений платины Нижне-Тагильского дунитового массива. Фонды Нижне-Тагильского приискового управления. Цветметзолото, 1931. 21 с.

Ярош П.Я., Фоминых В.Г. Платиноиды в хром-

титаномагнетитовой жиле Косьвинского дунитового тела Кытлымского массива // Ежегодник-1975. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 1976. С. 100-101.

*Cameron E.N., Glover E.D.* Unusual titanianchromian spinels from the eastern Bushveld Complex // Amer. Mineral. 1973. V. 58. № 3-4. P. 172-188.

Snetsinger K.G. Chromian-aluminian magnetite and two rhodium alloys in a platinum nugget from Goodnews Bay, Alaska // Amer. Mineral. 1973. V. 58. № 3-4. P. 189-194.

Рецензент член-корр. РАН Н.М. Чернышев