

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАТИНОНОСНОСТИ ФЕРРОКЛИНОПИРОКСЕНИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ УРАЛЬСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА

Ю. А. Волченко, В. А. Коротеев, С. И. Нестерова

Платиноидно-титаномагнетитовая рудная формация охватывает многочисленные платинопроявления ферроклинопироксенит-метагаббровых серий Платиноносного пояса Урала и связана с месторождениями комплексных руд качканарского, первоуральского, баронского, волковского типов [1, 5–7]. Платиноносность руд крупнейшего и наиболее хорошо изученного качканарского ферроклинопироксенит-метагаббрового комплекса рассмотрена на основе собранной нами представительной коллекции (более 1000 проб) и проанализированной на основные компоненты и все благородные металлы.

Установлено, что руды рассматриваемой формации в отношении ЭПГ и Au являются бедными и убогими, а специализация их определяется следующим рядом убывания благородных металлов: палладий, платина, рутений, осмий, родий, иридий, золото. Пропорции ведущих платиновых металлов (палладия и платины) варьируют от месторождения к месторождению, а в пределах отдельных месторождений от одной рудной зоны к другой, но обычно в основной массе руд качканарского ферроклинопироксенитового комплекса отношение палладия к платине составляют 3:1–2:1. Содержания ЭПГ (по сумме) изменяются в широких пределах – от 30–70 мг/т до 500–1000 мг/т и более, но обычно не превышают 100 мг/т. В распределении ведущего ЭПГ палладия отмечаются 3 абсолютных максимума, приуроченных к габбро тыловых зон, горнблендитам и амфиболизированным ферроклинопироксенитам притыловых зон, а так же к оливиновым разностям титаномагнетитовых руд фронтальных зон (рис. 1).

Наиболее перспективны телескопированные фронтальные зоны, которые представляют собой линейные структуры в виде апофиз среди оливиновых ферроклинопироксенитов с богатым титаномагнетитовым оруденением. Исследование одной такой зоны, сложенной оливиновыми магнетитовыми ферроклинопироксенитами, амфиболизированными, хлоритизированными с рассеянной вкрапленностью халькопирита, пирита и борнита дало следующие результаты: мощность зоны – от 10–20 см до 2 м, протяженность ее – 60–70 м; содержание ЭПГ и Au на эту мощность составляет в различных сечениях зоны от 0.5 до 1–2 г/т при отношении палладия к платине 10–15 и более. В ком-

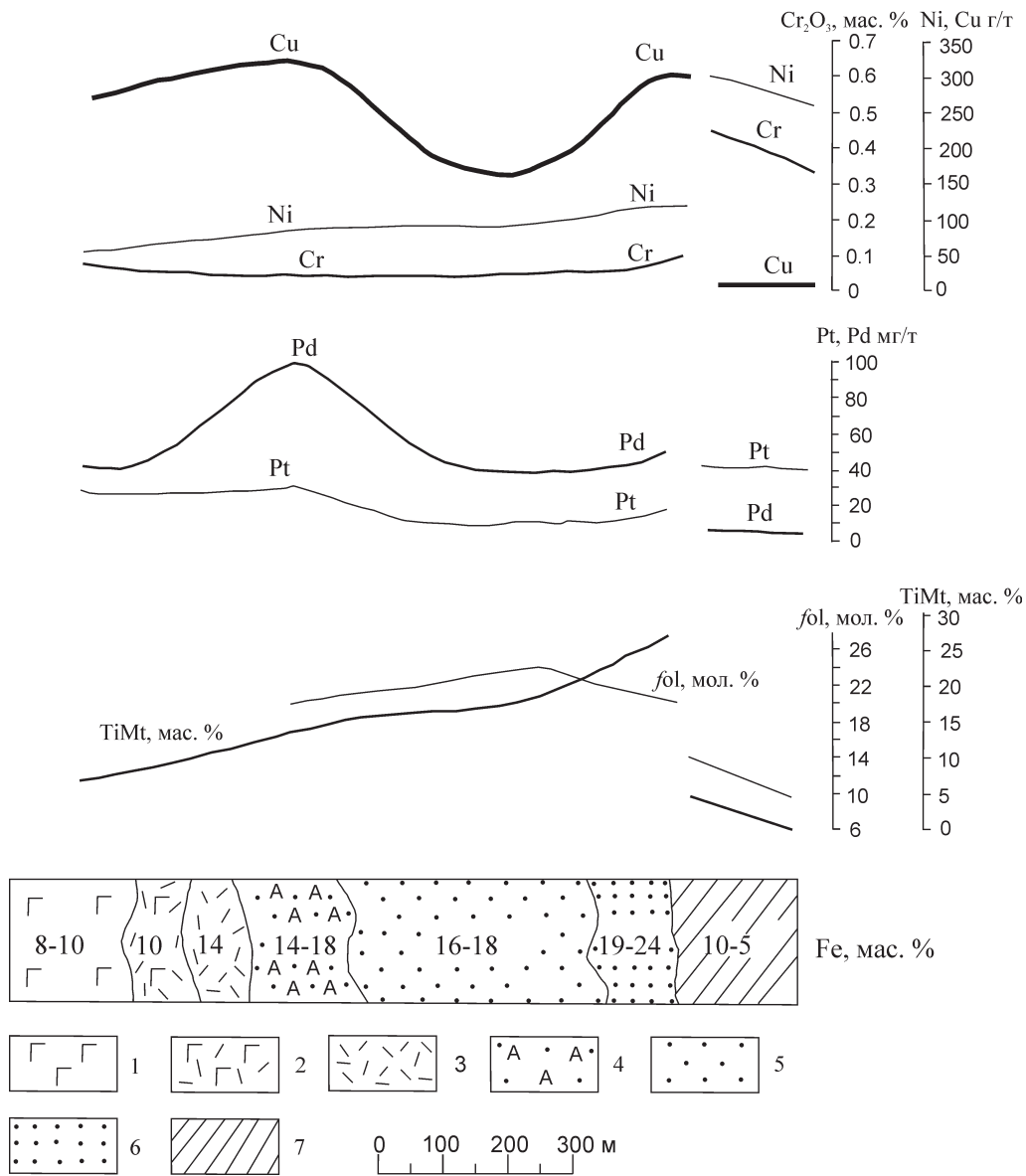
позитной пробе, характеризующей полное сечение этой зоны при мощности около 12 м, содержание палладия – около 1 г/т, платины – 0.06 г/т, золота – 0.18 г/т, при этом содержание меди – 1.03 мас. %, никеля – 0.018 мас. % и серы – 0.040 мас. %. Во флотационных концентратах из этой зоны содержание палладия превышает 100 г/т.

Как уже отмечалось, платиносодержащие руды качканарского типа формируются в процессе образования реакционно-метасоматических ореолов габбровых интрузий, занимая вполне определенное положение во внешних частях этих ореолов [6]. Целенаправленное картирование ряда месторождений Качканарского рудного поля позволило расшифровать их строение и наметить стандартный ряд закономерно сменяющих друг друга ассоциаций пород и руд: габбро лабрадорное двупироксенное (оруденелое и безрудное) и продукты его динамотермального метаморфизма в условиях амфиболитовой фации (тыловых зон) – горнблендиты и амфиболизированные клинопироксениты с плагиоклазом или без него (чаще всего безрудные или слабо оруденелые) – магнетитовые клинопироксени-

**Таблица 1.** Состав (мас. %) пород и титаномагнетитовых руд по разрезам ферроклинопироксенит-метагаббровых серий Качканарского комплекса

Компонент	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	41.35	39.2	37.1	38	32.9	34
TiO <sub>2</sub>	1.22	1.4	1.5	1.2	0.9	1.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.16	11.1	6.8	4.9	2.8	6.44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.85	8.8	15.3	13.5	14.52	17.68
FeO	7.62	8.5	9.7	10.1	13.2	10.16
MgO	7.94	13.6	11.5	13.5	26.2	16.9
CaO	14.74	13	16.6	16.3	5.83	13.64
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.04	0.03	0.05	0.11	0.05
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	0.13	0.17	0.13	0.11	0.17
Ni	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03
Co	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
п.п.п.	2.49	1.76	0.94	1.1	2.2	1.35
Сумма	98.3	97.6	99.7	99.8	99.8	101.7

Примечание. Типы пород и руд: 1 – габбро двупироксенное, амфибол-клинопироксенное и амфиболовое (9); 2 – горнблендиты; 3 – магнетитовые клинопироксениты амфиболизированные и фельдшпатизированные (12); 4 – магнетитовые клинопироксениты (19); 5 – магнетитовые оливиниты и верлиты (19); 6 – оливиновые магнетитовые клинопироксениты (6); в скобках – количество анализов по типам; анализы выполнены в химической лаборатории ИГГ УрО РАН.



**Рис. 1.** Распределение платиновых металлов (Pt, Pd), цветных металлов и хрома (Cu, Ni, Cr) по разрезу метагаббро-ферроклинопироксенитовых серий зональных комплексов Урала.

1 – метагаббро-норит; 2 – амфибол-сосюритовое метагаббро; 3 – горнблендиты плагиоклазовые и безплагиоклазовые; 4 – амфиболлизированные клинопироксениты; 5 – магнетитовые клинопироксениты; 6 – оливиновые ферроклинопироксениты с участками магнетитовых оливинитов и верлитов; 7 – оливиновые клинопироксениты.

ты, магнетитовые верлиты, магнетитовые оливиниты (фронтальных зон) – оливиновые, оливинсодержащие клинопироксениты, вмещающие телескопированные фронтальные зоны рудных залежей. Проявления данной зональной метаморфогенно-метасоматической колонны определяет наличие в ферроклинопироксенитовых комплексах зональности второго типа, вещественный состав которой приведен в табл. 1.

В коллективном сульфидном концентрате, полученном при флотации из хвостов мокрой магнитной сепарации титаномagnetитовых руд Западной залежи Гусевогорского ферроклинопироксенитово-

го комплекса, содержание палладия – 1280 г/т, платины – 82 г/т. Проведенное картирование Западной залежи позволило выделить нам следующие зоны, вещественный состав которых и распределение благородных металлов в них приведены в табл. 2: габбро пироксен-амфиболовое лейкократовое, габбро амфиболовое мезо-меланократовое, габбро-пегматиты амфиболовые мезо-меланократовые, горнблендиты плагиоклазсодержащие, магнетитовые клинопироксениты амфиболлизированные с аксессуарным плагиоклазом и зонками анортитизации, магнетитовые клинопироксениты амфиболлизированные, магнетитовые клинопироксениты,

магнетитовые оливинсодержащие клинопироксениты и магнетитовые верлиты фронтальных зон, оливиновые клинопироксениты и верлиты.

Особо рассмотрим состав и строение реакционных фронтальных зон, возникающих на периферии титаномагнетитовых залежей и фиксирующих собой дискретность разрезов ультрамафитов ферроклинопироксенитовых комплексов. Мощность этих зон изменяется в широких пределах, но чаще всего составляет от 5 до 70 м, хотя могут быть участки их расширения до 100 м, либо сужение до 5–20 м. Сложены они специфическими породами, одновременно обогащенными и оливином, и магнетитом: оливиновыми магнетитовыми клинопироксенитами, магнетитовыми верлитами, магнетитовыми оливинитами с многочисленными пятно-полосообразными реликтовыми блоками оливиновых безрудных клинопироксенитов и многочисленными прожилково-шпировыми оливин-титаномагнетитовыми и титаномагнетитовыми обособлениями. Последнее придает фронтальным зонам в целом полосчатый облик разнозернистых, крупнозернистых и пегматоидных образований, полосчатость которых обычно несогласна с полосчатостью вмещающих безрудных дунит-клинопироксенитовых серий. Рудоносные ферроклинопироксениты фронтальных зон постоянно содержат рассеянную и повышенную вкрапленность сульфидов: халькопирита, пирита, борнита, кобальтина и др.

По мере приближения к фронтальным зонам со стороны магнетитовых клинопироксенитов, составляющих основную массу руд, происходит одновременное нарастание содержания валового железа в рудах (до 16–18 мас. %), количество свободного магнетита (до 15–16% и более), железистости оливина и клинопироксена (соответственно, до 24 и 21 мол. %). Эти величины железистости сосуществующих силикатов являются предельными для титаномагнетитовых руд, и, далее, при переходе

**Таблица 2.** Распределение основных компонентов (мас. %) и платиновых металлов (мг/т) в разрезе Западной залежи Качканарского ферроклинопироксенитового комплекса

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fe <sub>общ</sub>	6.2	10.7	10.6	15.5	17.9	16.8	16	19.3	8.8
TiO <sub>2</sub>	0.64	1.22	1.21	1.59	1.45	1.28	1.1	1.12	0.7
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.037	0.097	0.083	0.15	0.19	0.135	0.13	0.15	0.055
Pt	<10	22	28	60	20	28	<20	20	68
Pd	10	78	36	90	43	75	30	50	20
Rh	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ir	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Os	10	6	8	14	14	16	15	26	35
Ru	18	15	18	20	14	30	25	28	32
Au	<20	20	20	20	<20	<20	<20	<20	<20

Примечание. Типы пород и руд: 1 – габбро пироксен-амфиболовое лейкокр.; 2 – габбро амфиболовое мезо-меланокр.; 3 – габбро-пегматиты амфиболовые мезо-меланокр.; 4 – горн-блендиты плагиоклазсодержащие; 5 – магнетитовые клинопироксениты амфиболлизированные с аксессуарным плагиоклазом; 6 – магнетитовые клинопироксениты амфиболлизированные; 7 – магнетитовые клинопироксениты; 8 – магнетитовые оливинсод. клинопироксениты и магнетитовые верлиты фронтальных зон; 9 – оливиновые клинопироксениты и верлиты. Анализы выполнены в химической лаборатории и платиновой группе ИГТ УрО РАН.

в область фронтальных зон железистость их в одних случаях остается постоянной, а в других даже несколько снижается (до 21 мол. % для оливина и 18 мол. % для пироксена), в то время как содержание валового железа и количество титаномагнетита в рудах продолжает резко возрастать, достигая, соответственно, величин 20–24 вес. % и 20–30 вес. %, что является весьма характерным для этих фронтальных зон.

Переход от фронтальных зон к оливиновым клинопироксенитам, верлитам или иным членам рудовмещающей серии является резким и отчетливо ступенчатым. Содержание валового железа падает до 8–10 вес. %, количество титаномагнетита

**Таблица 3.** Состав (мас. %) минералов платиновых металлов в рудах и горных породах Качканарского ферроклинопироксенитового комплекса

Минеральные виды и разновидности	Pd	Pt	Fe	Cu	Ni	Hg	Au	Te	Sb	As	S	Сумма
Высоцкит безникелевый PdS	73.5	4.6	0.4	0.5	1.0	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	21.4	101.4
Высоцкит платиновый (Pd,Pt)S	62.0	16.3	0.5	0.2	1.5	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	20.0	100.5
Бреггит (Pt,Pd)S	9.4	73.2	0.7	0.8	2.4	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	14.1	100.6
Бреггит ртутный (Pt,Pd,Hg)S	14.1	51.1	1.3	0.02	0.01	21.8	н/о	н/о	н/о	н/о	13.6	101.9
Атенеит (Pd,Hg) <sub>3</sub> As	62.6	0.3	1.1	0.1	0.2	21.1	н/о	н/о	н/о	15.5	н/о	100.9
Мертиит Pd <sub>3</sub> (Sb,As) <sub>2</sub>	71.6	0.3	0.3	0.4	0.01	н/о	н/о	н/о	22.7	4.1	0.1	99.5
Котульскит PdTe <sub>1+x</sub>	34.1	0.1	1.2	0.3	0.01	0.1	н/о	57.7	н/о	0.1	0.3	94.0
Котульскит ртутный (Pd,Hg)Te	26.5	0.1	2.4	1.2	0.01	18.3	н/о	51.0	н/о	0.2	0.1	99.8
Потарит PdHg	21.1	0.2	0.4	0.01	0.01	60.5	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	82.2
Тетраферроплатина палладистая Pt(Fe,Pd)	25.5	60.4	12.6	0.4	0.01	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	98.9
Палладий медистый PdCu	55.9	4.8	3.2	28.7	н/о	н/о	4.0	3.2	н/о	н/о	н/о	99.8
Золото палладистое Au,Ag,Pd	0.4	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	85.6	Ag-13.3	н/о	н/о	н/о	99.3

Примечание. н/о – элемент не обнаружен; анализы выполнены методами РСМА в ИГТ УрО РАН, аналитики Сандлер Г.А., Воронина Л.К.

**Таблица 4.** Вещественный состав исследованных проб горных пород и руд Суоямского мафит-ультрамафитового комплекса

Элемент	1ВК07	2В-07	3В-07	4В-07	5В-07	6В-07	7В-07	8В-07	9В-07	10В-07	11В-07	12В-07	13В-07	14В-07
SiO <sub>2</sub>	38.71	38.13	41.89	37.19	40.01	38.22	37.99	39.55	38.75	37.11	38.69	43.44	37.4	39
TiO <sub>2</sub>	1.202	1.314	1.112	1.334	1.063	1.052	1.216	1.201	1.061	1.35	1.262	0.987	1.303	1.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.96	4.92	3.57	3.45	3.16	3.52	3.97	3.81	3.7	4.48	9.4	3.25	3.42	4.2
Feобщ	21.6	19.7	20.7	22.1	23	19.4	22.8	18.6	20.7	21.6	21	19.6	22.2	21
MnO	0.183	0.166	0.144	0.165	0.132	0.132	0.178	0.136	0.132	0.209	0.302	0.127	0.18	0.168
MgO	10.35	11.08	12.39	10.67	12.85	11.91	12.07	12.26	12.25	9.23	6.1	12.39	10.1	11.05
CaO	19.7	18.92	18.83	20.91	18.67	20.73	18.94	19.7	19.54	20.74	17.18	18.84	20.07	19.94
Na <sub>2</sub> O	0.6	1.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.59
K <sub>2</sub> O	0.3	1.22	0.14	0.03	0.04	0.06	0.2	0.48	0.46	0.05	1.17	0.28	0.53	0.46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.23	2.88	0.16	3.21	0.06	3.13	1.82	2.49	2.34	2.92	1.57	0.3	2.97	2.01
V	0.031	0.036	0.024	0.037	0.019	0.022	0.031	0.023	0.02	0.044	0.046	0.016	0.035	0.03
Cr	0.011	0.009	0.015	0.017	0.013	0.006	0.007	0.006	0.003	0.007	0.017	0.017	0.017	0.011
Cu	0.074	0.017	н/о	0.378	н/о	н/о	0.035	0.053	н/о	0.009	0.008	0.068	0.133	0.06
S <sub>общ.</sub>	0.7	0.7	0.015	0.292	0.014	0.04	0.04	0.08	0.018	0.182	0.027	0.053	0.179	0.18
ПП	0.44	0.62	0.44	0.38	0.34	0.36	0.38	0.47	0.31	1.19	1.37	0	0.08	0.49
сумма	100.09	101.01	99.93	100.76	99.97	99.08	100.18	99.36	99.79	99.63	98.74	99.87	99.13	99.88

Примечание. 1ВК07 (06-4) – крупнообъемная проба весом 16 кг, сложенная апатитовыми клинопироксенитами мелко-средне-разнозернистыми и порфиридовидными, сидеронитовой текстуры, с многочисленными зеркалами скольжения, с обильной вкрапленностью титаномагнетита, флогопитом, хлоритом и рассеянной вкрапленностью сульфидов; 2В-07 (скв. 27) – групповая керновая проба, отобранная с 6 различных интервалов, сложена апатитовыми магнетитовыми клинопироксенитами мелко-среднезернистыми и разнозернистыми, с флогопитом, хлоритом и рассеянной вкрапленностью сульфидов; 3В-07 (скв. 26) – групповая проба, отобранная с 4 различных интервалов, магнетитовые клинопироксениты мелко-среднезернистые и крупнозернистые с рассеянной вкрапленностью апатита, флогопита и акцессорной вкрапленностью сульфидов; 4В-07 (скв. 34) – групповая керновая проба, отобранная с 4 различных интервалов сложена магнетитовыми-apatитовыми клинопироксенитами мелко-средне и разнозернистыми, с вкрапленностью апатита, флогопита, хлорита, сульфидов и редкими прожилками сульфидов; 5В-07 (скв. 25) – групповая керновая проба, отобранная с 5 различных интервалов, сложена апатитосодержащими магнетитовыми клинопироксенитами среднезернистыми и разнозернистыми с вкрапленностью флогопита и хлорита, мятые и катаклазированные, с акцессорной вкрапленностью сульфидов; 6В-07 (скв. 35) – групповая керновая проба, отобранная с 5 различных интервалов сложена апатитовыми магнетитовыми клинопироксенитами средне и разнозернистыми, с гнездами флогопита и акцессорной вкрапленностью сульфидов; 7В-07 (скв. 36) – групповая керновая проба, отобранная с 5 различных интервалов, сложена апатитовыми магнетитовыми клинопироксенитами средне-разнозернистыми и пегматоидными с вкрапленностью флогопита и хлорита и акцессорной вкрапленностью сульфидов; 8В-07 (скв. 59) – групповая проба, отобранная с 4 различных интервалов, апатитовые магнетитовые клинопироксениты разнозернистые и пегматоидные, с пятнообразными ступками апатита и флогопита с сидеронитовой текстурой, катаклазированные и милонитизированные с акцессорной вкрапленностью сульфидов в виде просечек; 9В-07 (скв. 45) – групповая керновая проба, отобранная с 2 различных интервалов, апатитовые магнетитовые клинопироксениты разнозернистые-среднезернистые, сидеронитовой текстуры, с пегматоидными пятнами флогопита и акцессорной вкрапленностью сульфидов; 10В-07 (ш-ш № 8) – групповая проба, сложенная апатитовыми магнетитовыми клинопироксенитами разнозернистыми, мятыми и катаклазированными с зеркалами скольжения, хлоритизированными и редкой вкрапленностью сульфидов; 11В-07 (скв. 62) – групповая проба, отобранная с двух различных интервалов, мелкозернистые апатитосодержащие меланократовые сиениты сидеронитовые и полосчатые с вкрапленностью флогопита и акцессорной вкрапленностью сульфидов; 12В-07 (скв. 60) – групповая проба, отобранная их 2 различных интервалов, магнетитовые клинопироксениты среднезернистые и разнозернистые катаклазированные с прожилками и крупными зернами флогопита и акцессорной вкрапленностью сульфидов; 13В-07 (скв. 44) – групповая проба, отобранная с 2 различных интервалов, апатитовые магнетитовые клинопироксениты средне-разнозернистые с вкрапленностью апатита, флогопита и повышенными содержаниями сульфидов в виде вкрапленности и тонких просечек; 14В-07 – средний состав по серии проб 1–13В07, отобранных нами совместно с В.Н. Пучковым.

**Таблица 5.** Содержания ЭПГ и золота (мг/т) в горных породах и рудах Суоямского комплекса

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
Pt		20	65–100		20–72	20	10–40	7–30
Pd	50–200	80–120	35–200	100–150	60–150	100–200	40–200	17–40
Rh		<5	<5			<5	<5	<5
Ir		<10	<10			<10	<10	<10
Au		10–600	100–1000			20–80	38	100–182
Os		10	20			10	<10	20
Ru		40	60			80	40	120

Примечание. 1 – скв. 3, инт. 10–49 м, магнетитовые верлиты; 2 – скв. 4, инт. 86.9–177 м, флогопит-apatит-магнетитовые клинопироксениты; 3 – скв. 5, инт. 127.1–264.4 м, магнетитовые клинопироксениты; 4 – скв. 6, инт. 100–300 м, апатит-магнетитовые клинопироксениты; 5 – скв. 7, инт. 0–100 м, апатит-титаномагнетитовые клинопироксениты; 6 – скв. 7<sup>а</sup>, инт. 21.4–130 м, апатит-флогопит-магнетитовые клинопироксениты; 7 – скв. 8, инт. 169–273, апатитовые клинопироксениты; 8 – скв. 28, инт. 198–266.1 м, апатит-магнетитовые клинопироксениты; анализы выполнены химико-спектральным и комбинированным методами в платиновой группе ИГГ УрО РАН (аналитики Неустроева И.И., Любимцева Ю.П.).

**Таблица 6.** Содержание ЭПГ и золота (мг/т) в горных породах и апатит-титаномагнетитовых рудах Суроямского мафит-ультрамафитового комплекса

№ проб	Наименование материала проб	Pt	Pd	Rh	Ir	Au
1ВКр-07	Апатитовые клинопироксениты, разнозернистые и порфиридные флогопитсодержащие, амфиболизированные, с акцессорной вкрапленностью сульфидов	25	45	<5	<10	30
2В-07, скв. 27	Магнетитовые клинопироксениты различных текстурных типов, мелко-среднезернистые и разнозернистые с вкрапленностью и пятнообразными выделениями флогопита, апатитсодержащие с акцессорной вкрапленностью сульфидов	30	125	<5	<10	40
3В-07, скв. 26	Магнетитовые клинопироксениты, апатитсодержащие мелко-среднезернистые и разнозернистые с акцессорной вкрапленностью сульфидов	20	20	<5	<10	30
4В-07, скв. 34	Магнетит-apatитовые клинопироксениты, мелко-среднезернистые и разнозернистые, флогопитсодержащие с вкрапленностью и прожилками сульфидов	40	130	<5	<10	20
5В-07, скв. 25	Магнетитовые клинопироксениты, средне-разнозернистые, апатитсодержащие с вкрапленностью флогопита и акцессорной вкрапленностью сульфидов	20	10	<5	<10	10
6В-07, скв. 35	Апатит-магнетитовые клинопироксениты, средне-разнозернистые с вкрапленностью и гнездами флогопита	35	40	<5	<10	45
7В-07, скв. 36	Магнетитовые клинопироксениты, апатит и флогопитсодержащие с акцессорной вкрапленностью сульфидов	20	25	<5	<10	15
8В-07, скв. 59	Магнетитовые клинопироксениты, мелко-среднезернистые и разнозернистые с апатитом и флогопитом в виде вкрапленности и сгустков с сульфидами в виде вкрапленности и тонких просечек	50	50	<5	<10	50
9В-07, скв. 45	Магнетитовые клинопироксениты, среднезернистые-разнозернистые и пегматоидные с пятнообразными скоплениями магнетита, апатита и флогопита	30	40	<5	<10	45
10В-07, ш-ш 8	Магнетитовые клинопироксениты, апатит- и флогопитсодержащие с зеркалами скольжения и редкой вкрапленностью сульфидов	50	90	<5	<10	60
11В-07, скв. 62	Магнетитовые клинопироксениты, апатитсодержащие мелко-среднезернистые с повышенной вкрапленностью сульфидов	10	10	<5	<10	20
12В-07, скв. 60	Клинопироксениты, магнетит- и апатитсодержащие, мелко-среднезернистые с вкрапленностью и пятнообразными сгустками флогопита и повышенной вкрапленностью сульфидов	10	10	<5	<10	15
13В-07, скв. 44	Магнетитовые клинопироксениты, апатит-флогопитсодержащие, разнозернистые и мелко-среднезернистые с обильной вкрапленностью и тонкими прожилками различных сульфидов	10	50	<5	<10	35

Примечание. Анализы выполнены в ИГГ УрО РАН, химико-спектральным и комбинированным методами (аналитики Неустроева И.И., Любимцева Ю.П.).

– до 5 вес. % при резко отличном его составе. Железистость оливина и клинопироксена, соответственно, падает до 15 и 13 мол. % (рис. 1). Выявленная резкая ступенчатость исследованных разрезов, наряду с другими структурными и минералогическими доказательствами, свидетельствует об отсутствии постепенности при переходе от оливиновых клинопироксенитов к магнетитовым клинопироксенитам.

Титаномагнетитовые руды качканарского типа практически не золотоносны. Относительное повышение содержаний золота отмечается лишь в горнблендитах притыловых частей рудных залежей, в амфиболовом габбро и возле даек плагитогранитоидов, секущих любые типы титаномагнетитовых руд и горных пород.

Отметим также установленную нами взаимосвязь процессов накопления железа и палладия в титаномагнетитовых рудах.

Попытки придать реально существующей в мафит-ультрамафитовых комплексах концентрической зональности (зональности первого типа) универсальный характер сопровождались, с одной стороны, стремлением отыскать постепенные взаимные переходы между всеми присутствующими здесь типами горных пород и руд, с другой развитием представлений о нахождении в этих комплексах генетически единого ряда взаимосвязанных рудных формаций. Такой подход нивелировал выявленную нами дискретность геологических разрезов ультрамафит-мафитовых комплексов, отводя их метагабброноритовым членам роль пассивных матриц.

Однако довольно скоро выяснилось, что металлогенические нагрузки, присущие зональностям первого и второго типа принципиально различны и тесно связаны с геодинамическим режи-

**Таблица 7.** Состав собственных минералов благородных металлов и минералов с примесными их количествами в рудах Суроямского мафит-ультрамафитового комплекса, мас. %

№ п.п.	№ обр., фаз	Pd	Pt	Au	Ag	Bi	Hg	Cu	Fe	Ni	Co	Te	S	Сумма
1	13В-07	26.10	2.30	н/о	н/о	2.10	1.50	0.31	0.11	2.10	н/о	66.0	н/о	100.52
2	1ВК-1-2	сл.	0.05	0.05	0.03	н/о	н/о	34.69	30.89	н/о	н/о	н/о	34.90	100.61
3	1ВК-1-3	сл.	0.11	0.02	0.03	н/о	н/о	34.01	30.83	н/о	н/о	н/о	34.96	99.96
4	1ВК-1-3(4)	0.03	0.08	0.03	0.07	н/о	н/о	33.82	30.44	н/о	н/о	н/о	34.95	99.42
5	4В-07(4)	0.02	0.11	0.11	0.04	н/о	н/о	34.17	30.59	н/о	н/о	н/о	35.11	100.15
6	4В-07(3)	0.05	0.05	0.06	0.12	н/о	н/о	34.35	30.61	н/о	н/о	н/о	34.98	100.22
7	4В-07-3(1)	0.03	0.13	0.11	0.04	н/о	н/о	34.37	30.50	н/о	н/о	н/о	34.88	100.06
8	4В	0.02	0.08	н/о	0.10	н/о	н/о	68.55	3.03	0.03	н/о	н/о	27.63	99.44
9	23В	0.02	0.04	н/о	0.06	н/о	н/о	60.70	9.84	0.03	н/о	н/о	28.40	99.09
10	19В	0.02	0.13	н/о	0.08	н/о	н/о	67.41	7.71	0.04	н/о	н/о	25.26	100.65
11	14В	сл.	0.06	н/о	0.07	н/о	н/о	64.24	7.80	0.03	н/о	н/о	27.77	99.97
12	1ВК-1-1	0.06	0.25	0.47	0.10	н/о	н/о	0.20	4.91	0.10	61.49	н/о	32.58	100.16
Атомные концентрации														
1	13В-07	29.396	1.413	н/о	н/о	1.204	0.896	0.585	0.236	4.286	н/о	61.984	н/о	100.00
2	1ВК-1-2	0.0043	0.012	0.012	0.013	н/о	н/о	24.949	25.276	н/о	н/о	н/о	49.739	100.00
3	1ВК-1-3	0.0043	0.026	0.0047	0.013	н/о	н/о	24.569	25.340	н/о	н/о	н/о	50.047	100.00
4	1ВК-1-3(4)	0.013	0.0189	0.007	0.030	н/о	н/о	24.542	25.132	н/о	н/о	н/о	50.258	100.00
5	4В-07(4)	0.0086	0.0258	0.026	0.017	н/о	н/о	24.644	25.101	н/о	н/о	н/о	50.179	100.00
6	4В-07(3)	0.0215	0.012	0.014	0.051	н/о	н/о	24.778	25.122	н/о	н/о	н/о	50.002	100.00
7	4В-07-3(1)	0.013	0.031	0.026	0.017	н/о	н/о	24.850	25.089	н/о	н/о	н/о	49.970	100.00
8	4В	0.009	0.0205	н/о	0.0464	н/о	н/о	54.027	2.717	0.0256	н/о	н/о	43.154	100.00
9	23В	0.0093	0.0102	н/о	0.276	н/о	н/о	47.323	8.728	0.0253	н/о	н/о	43.876	100.00
10	19В	0.0095	0.0335	н/о	0.373	н/о	н/о	53.338	6.941	0.0343	н/о	н/о	39.607	100.00
11	14В	0.010	0.015	н/о	0.032	н/о	н/о	50.0942	6.920	0.0253	н/о	н/о	42.913	100.00
12	1ВК-1-1	0.0261	0.0594	0.1106	0.043	н/о	н/о	0.1459	4.075	0.079	48.363	н/о	47.0974	100.00

Кристаллохимические формулы минералов:

- 1 – меренскиит, висмут и ртутьсодержащий, –  $(Pd_{0.882}Pt_{0.0424}Ni_{0.129}Fe_{0.036})_{1.107}(Te_{1.885}Bi_{0.0144}Hg_{0.011})_{1.910}$ ;
- 2 – халькопирит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{0.998}Fe_{1.011...})_{2.01} S_{1.99}$ ;
- 3 – халькопирит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{0.983}Fe_{1.014...})_{1.998} S_{2.002}$ ;
- 4 – халькопирит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{0.982}Fe_{1.005...})_{1.99} S_{2.01}$ ;
- 5 – халькопирит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{0.986}Fe_{1.004...})_{1.993} S_{2.007}$ ;
- 6 – халькопирит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{0.991}Fe_{1.005...})_{1.996} S_{2.004}$ ;
- 7 – халькопирит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{0.994}Fe_{1.004...})_{2.002} S_{1.998}$ ;
- 8 – борнит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{5.403}Fe_{0.272...})_{5.73} S_{4.32}$ ;
- 9 – борнит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{4.73}Fe_{0.87...})_{5.61} S_{4.39}$ ;
- 10 – борнит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{5.334}Fe_{0.694...})_{6.040} S_{3.96}$ ;
- 11 – борнит, содержащий благородные металлы, –  $(Cu_{5.009}Fe_{0.692...})_{5.774} S_{4.291}$ ;
- 12 – пентландит кобальтовый безникелевый, благородные металлы содержащий, –  $(Co_{8.222}Fe_{0.693}Cu_{0.248}Ni_{0.134})_{8.995} S_{8.005}$

Примечание. Анализы выполнены методами РСМА на приборе ЖХА-5 в ИГТ УрО РАН, аналитик Л.К. Воронина. В связи с сульфидной минерализацией в полированных образцах из kernовых проб 1ВКр, 4В-07 и 13В-07 выявлены включения зерен меренскиита в халькопирите размером 10, 20 и 30 мкм.

мом их формирования. Если для дунит-клинопироксенит-тылаитовых серий характерно магноферрихромитовое, хроммагнетитовое и самородное иридий-платиновое оруденение, то в ферроклинопироксенит-метагабброноритовых сериях присутствует безхромистое титаноммагнетитовое, медносульфидно-титаноммагнетитовое, сульфидное палладиевое, платино-палладиевое или золото-палладиевое оруденение. В первом случае выявленные типы оруденения характеризуют ряд рудных формаций, возникающий на ранних стадиях собственно геосинклинального процесса; во втором – мы имеем дело с рудными формациями, описанными в качестве типичных для габбровых ком-

плексов платформенного типа. Очевидно, что пространственное положение этих двух рядов рудных формаций в мафит-ультрамафитовых комплексах и определяет в целом региональную металлогеническую зональность Уральского подвижного пояса.

Проведенное рассмотрение рудно-петрографической зональности месторождений качканарского ферроклинопироксенитового комплекса, так же как и правильное понимание их геолого-структурной позиции и формационной принадлежности, является необходимой основой для корректной оценки их платиноносности.

Выделенный нами новый тип платинометаллической минерализации представлен рассеянной в ультра-

**Таблица 8.** Содержание благородных металлов (мг/т) в продуктах обогащения руд и горных пород Суоямского массива, а также в обогащенных фракциях сосуществующих минералов

№ п.п.	№ проб лаборат.	№ проб за-казчика	Наименование материала проб	Pt	Pd	Rh	Ir	Au
1	1ВКр-07	06-4	I концентрат (магнетитовый клинопироксенит)	30	40	<5	<10	30
2	1ВКр-07	06-4	II концентрат (магнетитовый клинопироксенит)	20	55	<5	<10	20
3	1ВКр-07	06-4	I промпродукт (клинопироксен, магнетит, примеси)	60	90	8	<10	50
4	1ВКр-07	06-4	II промпродукт (клинопироксен, магнетит, примеси)	20	45	<5	<10	20
5	1ВКр-07	06-4	шламы (клинопироксен, магнетит, примеси)	10	40	<5	<10	20
6	1ВКр-07	06-4	обогащенная фракция титаномагнетита	15	50	<5	<10	30
7	1ВКр-07	06-4	обогащенная фракция флогопита	10	10	<5	<10	10
8	13В-07	С. 44	обогащенная фракция клинопироксена	20	20	<5	<10	20
9	13В-07	С. 44	обогащенная фракция клинопироксена	10	10	<5	<10	10
10	13В-07	С. 44	обогащенная фракция апатита	10	15	<5	<10	10
11	13В-07	С. 44	обогащенная фракция хлорита	10	15	<5	<10	10
12	13В-07	С. 44	обогащенная фракция сульфидов (коллективный сульфидный к-т)	1700	4000	<5	<10	900

Примечание. Анализы выполнены в ИГТ УрО РАН химико-спектральным и комбинированным методами. В связи с сульфидной минерализацией в полированных образцах керновых проб 1ВКр, 4В-07 и 13В-07 выявлены платинометалльные фазы размером  $5 \times 10$ ,  $10 \times 20$  до  $30 \times 30$  мкм, представленные меренскиитом.

мафитах и различных разностях оруденелых клинопироксенитов вкрапленностью разнообразных палладиевых и платиновых сульфидов, арсенидов, теллуридов, антимонидов, а так же самородных сплавов палладия с платиной, медью, ртутью, никелем и железом, которые ассоциируют и срastaются с халькопиритом, пиритом, пентландитом, борнитом, кобальтином, титаномагнетитом и другими минералами (табл. 3). Выделения палладиевых и платиновых минералов чаще монофазны, реже сложены 2–4 кристаллическими зернами различного состава. Размеры их изменяются от 1–5 до 100 мкм и более, но наиболее обычны выделения размером 30–70 мкм. В количественном отношении резко преобладают соединения, относящиеся к минеральным разновидностям высококита. Для выявленных минералов характерна переменность состава и наличие сквозного набора элементов-примесей (железо, медь, никель, ртуть), но геохимическое своеобразие нового типа минерализации во многом определяется ртутью, повышенные концентрации которой выявлены почти во всех минеральных видах (табл. 3).

В целом масштабы проявления платиноидной минерализации и ее относительная ценность нарастают от фронтальных к тыловым зонам и габбро с медносульфидно-палладиевым оруденением. Наличие комплексных геохимических аномалий по меди, кобальту, ртути, сере, теллуру, мышьяку, как и присутствие рассеянной или концентрированной пирротин-пирит-борнит-халькопиритовой минерализации в отдельных зонах ферроклинопироксенитового комплекса служит указанием на нахождение здесь концентрированного платинометалльного оруденения качканарского типа. Фактором, определяющим образование зональных ферроклинопироксенит-метагабброноритовых серий, является внедрение огромных масс реоморфи-

ческих габбро, интродуцировавших на субплатформенной стадии окончательного становления платиноносных комплексов.

Ведущая сквозная золото-платино-палладиевая специализация, медистый характер продуктивной на платиноиды сульфидной минерализации, преобладающий высококитовый тип – все это сближает платиноносность характеризуемых серий с габбровыми комплексами платформенных областей. Специфика, однако, заключается в более широком развитии сульфидов, теллуридов, арсенидов и антимонидов палладия (часто ртутьсодержащих), наличие ртутных интерметаллидов, присутствие парагенезиса атенеита с палладистым золотом. Метаморфогенная природа всей этой платиноидной минерализации определяется как метаморфогенно-метасоматическим генезисом всей породно-рудной ассоциации, так и экспериментальными данными по синтезу высококита, атенеита и других платинометаллических Hg-содержащих минералов [5].

Исследование платиноносности горных пород и апатит-титаномагнетитовых руд Суоямского комплекса выполнено нами на основе большой коллекции керновых проб, собранных нами совместно со старшим геологом Миасской ГРП В.В. Карагановым в 1986 г. и значительно позднее совместно с В.Н. Пучковым в 2007 г. Вся коллекция составляет 28 проб, в том числе 2 крупнообъемные керновые пробы весом 14–15 кг, послужившие основой для выделения концентратов и мономинеральных фракций сосуществующих минералов. Вещественный состав исследованных проб горных пород и руд Суоямского комплекса приведен в табл. 4. Содержание и распределение благородных металлов в керновых пробах, отобранных нами в 1986 и 2007 гг., приведено в табл. 5 и 6. Содержание палладия варьирует от 10–20 мг/т до 50–200 мг/т, со-

держания платины – от 10–30 до 100 мг/т, содержание золота – от 15–20 до 100 мг/т и более; из других ЭПГ в заметных количествах присутствует рутений (до 40–120 мг/т) и осмий (до 10–20 мг/т). В целом, ряд убывания благородных металлов выглядит следующим образом: Pd-Pt-Au-Ru-Os-Ir-Rh.

Таким образом, установлено, что золото-палладиевая специализация титаномагнетитовых руд Суоярмского комплекса аналогична специализации титаномагнетитовых руд Качканарского ферроклинопироксенитового комплекса. При этом максимальные концентрации ведущих благородных металлов (палладия и золота) связаны с локальными зонами низкотемпературного водного метаморфизма и интенсивной сульфидизации. В этих участках, где концентрации сульфидов меди, кобальта и железа (халькопирита, пирита, кобальтина, борнита и др.) увеличиваются до 0.1–1.0 мас. %, содержания благородных металлов возрастают в сумме до 1–2–5 г/т (табл. 8). Именно здесь нами впервые выявлена вкрапленность сульфидных минералов, с примесными количествами благородных металлов (табл. 7), а так же включения собственных минералов палладия, представленных меренскиитами, аналогичными установленным в 80-х годах XX в. нами в титаномагнетитовых рудах Качканара (табл. 3) [5].

Выполненные исследования и сопоставления платиноносности ферроклинопироксенитовых ассоциаций Качканарского и Суоярмского комплексов приводят к выводу о принадлежности их к разным фрагментам одного и того же Палладиеносного пояса Урала, выделенного и обоснованного нами в период 1998, 2006, 2007, 2008 гг. [1–4].

*Исследования проводятся при поддержке гранта РФФИ 09–05–12035-офи\_м и Проекта “Освоение недр Земли: инновационное научно-технологическое развитие горно-металлургического комплекса Урала”.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волченко Ю.А., Золоев К.К., Коротеев В.А., и др. Новые и перспективные типы платинометального оруждения Урала // Геология и металлогения Урала. Кн. 1. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. С. 238–255.
2. Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Иванов К.С. и др. Палладиеносный пояс Урала // Минералогия Урала-2007. Миасс: ИМин УрО РАН, 2007. С. 9–14.
3. Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Иванов К.С. Платиноносный и Палладиеносный пояса Урала: общие перспективы платиноносности Севера Урала // Уральская минералогическая школа-2008. Екатеринбург: УГГУ, 2008. С. 11–20.
4. Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Неустроева и др. Новые золото-платино-палладиевые проявления Палладиеносного пояса Урала // Ежегодник-2006. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 214–220.
5. Волченко Ю.А., Нечехин В.М., Радыгин А.И. и др. Новый тип платиноидной минерализации в гипербазитах складчатых поясов // Докл. АН СССР. 1975. Т. 224. № 1. С. 182–185.
6. Волченко Ю.А., Фоминых В.Г., Нечехин В.М. Титаномагнетитовые системы // Главные рудные геолого-геохимические системы Урала. Глава 5. М.: Наука, 1990. С. 79–96.
7. Фоминых В.Г., Самойлов П.И., Максимов Г.С. и др. Пироксениты Качканара. Свердловск, 1967. Тр. УФАН. 84 с.