УДК 553.491.551.311.231

ПЛАТИНОМЕТАЛЛЬНАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ НИКЕЛЕНОСНЫХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ, РАЗВИТЫХ ПО УЛЬТРАОСНОВНЫМ МАССИВАМ УРАЛА

И.В.ТАЛОВИНА, *д-р геол.-минерал. наук*, *профессор*, *i.talovina@gmail.com*
Санкт-Петербургский горный университет, *Россия*

Представлены результаты изучения содержания и распределения элементов платиновой группы (ЭПГ), золота и серебра в Буруктальском, Уфалейском, Еловском и других никеленосных корах выветривания уральских гипергенных месторождений. Содержание и распределение благородных металлов в корах выветривания дано в сравнении с содержанием этих элементов в дунит-гарцбургитовом субстрате первичных офиолитовых массивов. Выявлено, что все ЭПГ накапливаются в процессе выветривания. Геохимическая специализация платинометалльного оруденения гипергенных никелевых месторождений определяется палладием и платиной, тогда как в дунит-гарцбургитовом субстрате первичных офиолитовых массивов главными платиноидами являются рутений, осмий и иридий. Значение Pt/Pd-отношения обычно ниже единицы, т.е. в никелевых рудах, за некоторым исключением, преобладает палладий.

Ключевые слова: элементы платиновой группы, золото, серебро, Буруктальское, Уфалейское, Еловское гипергенные никелевые месторождения, дунит-гарцбургитовый субстрат, офиолитовые массивы, Урал.

Введение. Никеленосные коры выветривания и связанные с ними месторождения гипергенного никеля, в том числе Буруктальское, Уфалейское и Еловское месторождения Урала, развиты на ультраосновных породах, главным образом гарцбургитах и дунитах, которые представлены в регионе большим количеством крупных, средних и мелких массивов, приуроченных к разломам глубинного заложения и образующих ряд меридиональных ультрамафитовых поясов [3]. Согласно исследованиям последних лет [1, 11, 16], никелевые руды перечисленных и других гипергенных никелевых месторождений России и мира содержат определенные количества платиновых металлов, золота и серебра. В настоящей статье приводится анализ геохимических данных, полученных в результате многолетних исследований уральских никеленосных кор выветривания на содержание благородных металлов. Для оценки уровня содержания элементов платиновой группы (ЭПГ), Au и Ag в никеленосных гипергенных горных породах представляет интерес знание количества этих элементов в первичных ультрамафитах массивов, которые послужили поставщиками благородных металлов в коры выветривания. Подавляющее большинство гипергенных никелевых месторождений Урала сформировались на крупных дунит-гарцбургитовых массивах Офиолитового пояса Урала (Серовское, Уфалейское, Кемпирсайское, Буруктальское, ряд других), из мировых месторождений это месторождения Новой Каледонии, Кубы, Индонезии, Бразилии и других стран.

Среднее содержание ЭПГ, Au и Ag в ультрамафитах офиолитовых массивов Урала. Данные о распределении ЭПГ, Au и Ag в ультрамафитах Уфалейского и Кольского (Серовского) массивов на сегодняшний день практически отсутствуют, но относительно недавно появились сведения о концентрации этих элементов в ультрамафитах Буруктальского, а также соседних и генетически родственных Кемпирсайского, Нуралинского, Миндякского и Восточно-Тагильского массивов Офиолитового пояса Урала (табл.1).

Таблица 1

Содержание элементов платиновой группы в ультрамафитах и хромититах Буруктальского, Кемпирсайского, Нуралинского и Миндякского массивов, мг/т

Номер анализа	*n*	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	ΣЭПГ	$\frac{Os + Ir + Ru}{Pt + Pd}$	Pt/Pd	Au
1		26	4	< 10	13	< 10	10	>63	2,8	>1	
2	9	102	12	14	131	124	17	400	12	1,2	140
3	1	н.о.	0,4	4	2,4	1,5	6	14,3	–	1,5	4,8
4	2	н.о.	0,8	9	5,8	4,1	6,4	26,1	–	0,7	11,4
5	2	н.о.	1,2	3,8	5	3,5	1	14,5	–	0,3	5,9
6	2	245	< 5	< 10	5	19	< 24	269	>6,4	–	–
7	1	8100	< 5	< 10	5900	800	< 5	14800	>740	–	–
8	3	271	49	516	118	363	3810	5127	0,17	7,4	–
9	2	10	70	36	7	7	295	425	0,07	8,2	–
10	1	н.о.	0,5	1,5	2,7	2,1	3,7	10,5	–	2,5	3,5
11	3	н.о.	1,7	12	7,5	5,8	14,7	41,7	–	1,2	42,2
12	2	9	< 5	6	9	11	20	55	1,1	3,3	–
13	9	21	< 5	17	18	< 10	11	67	1,4	0,6	–
14	2	12	4	6	15	9	9	55	2,4	1,5	–
15	3	21	< 5	7	14	< 10	22	64	1,2	3,1	–
16	5	15	< 5	11	16	22	13	77	2,2	1,2	–
17	2	45	< 5	7	122	44	10	228	12,4	1,4	–
18	3	45	6	3	168	88	7	317	30,1	2,3	–
19	5	152	12	6	289	157	12	628	17,2	2,0	–
20	1	19	< 5	90	70	10	14	206	1,0	0,2	–
21	–	8,26	2,6	5,0	3,2	4,8	8,7	33,5	1,1	1,7	–
22	–	162	13	11	87	115	51	439	5,9	4,6	–

Примечания: 1) 1-22 – анализы: 1 – гарцбургит Буруктальского массива, лаборатория «Механобр-Аналит»; 2 – хромитит Кемпирсайского массива [15]; 3-9 – породы Нуралинского массива [8] (3 – лерцолит, 4 – гарцбургит, 5 – дунит, 6 – ортопироксенит с хромититовой вкрапленностью, 7 – хромитит из метаморфизованных ультрамафитов, 8 – хромитит полосчатого комплекса, 9 – бронзитит с хромитовой вкрапленностью); 10, 11 – породы Миндякского массива (10 – лерцолит, 11 – гарцбургит); 12 – дунит Восточно-Тагильского массива; 13 – дунит Нуралинского массива; 14 – гарцбургит Восточно-Тагильского массива; 15-17 – породы Нуралинского массива (15 – гарцбургит, 16 – лерцолит, 17 – хромитит); 18 – хромитит Восточно-Тагильского массива; 19 – хромитит Кемпирсайского массива; 20 – хромитит Аккаргинского массива с вкрапленностью сульфидов [3]; 21, 22 – средние содержания в гарцбургитах (21) и хромититах (22) офиолитовых массивов [7];

2) здесь и далее *n* – число анализов; н.о. – элемент не определялся; «–» – нет данных.

Анализ ЭПГ гарцбургита Буруктальского массива приведен в табл.1. По характеру распределения ЭПГ он весьма близок к среднему гарцбургиту офиолитовых массивов, что позволяет использовать последний в качестве эталона для определения коэффициентов накопления ЭПГ в никелевых рудах Буруктальского месторождения. Распределение ЭПГ в гарцбургите Буруктальского массива близко к распределению ЭПГ в преобладающей группе офиолитовых массивов Полярного Урала, Нью-Фундленда, Кипра, Монголии и Канады. Некоторое представление о хромитите Буруктальского массива можно составить из анализа 20 (табл.1) Аккаргинского массива, являющегося частью Буруктальского массива. Высокое содержание в нем палладия связано с вкрапленностью сульфидов. Вместе с тем следует отметить, что исключительно важной особенностью петрографического состава пород Буруктальского массива является практически полное отсутствие в них хромититов и сульфидной минерализации. А.С.Варлаков [2] считает, что Буруктальский массив может служить эталоном массивов, в которых практически не проявилось хромитовое оруденение, что, конечно, выделяет его на фоне соседних офиолитовых массивов Урала.

Как видно из табл.1, в гарцбургитах, лерцолитах и дунитах Нуралинского, Миндякского и Восточно-Тагильского массивов уровень концентрации ЭПГ низкий при более или менее равномерном характере их распределения. Схема платинометалльной специализации имеет вид Pd > Pt > Os > Ir > Rh в гарцбургитах Нуралинского, Pt > Pd > Os > Ir > Rh – Миндякского и Os > Ru > Pt, Ir > Pd > Rh Восточно-Тагильского массивов. Подобные содержания ЭПГ в нуралинских, миндякских и восточно-тагильских гарцбургитах позволяют с большой долей уверенности предполагать, что и буруктальские, уфалейские и серовские гарцбургиты обладают близкими концентрациями ЭПГ со сходным характером распределения.

Кемпирсайский массив, благодаря своим крупным размерам, является прототипом офиолитовых массивов не только для Урала, но и для всего мира, а его хромитовые месторождения – уникальными по запасам месторождениями подиформных хромититов. Средний хромитит довольно близок к хромититу офиолитовых массивов. Он весьма обогащен ЭПГ (400 мг/т) и характеризуется значительным преобладанием суммы Os, Ir, Ru над суммой Pd, Pt. Самыми низкими концентрациями среди ЭПГ обладают Rh и Pd (Os > Ir > Ru) >> >> (Pt > Pd > Rh). Единственный анализ хромитита Нуралинского массива демонстрирует очень высокое содержание ЭПГ (14,8 г/т), также при резком преобладании редких платиноидов Os, Ir, Ru над Pd и Pt. Количества последних элементов низки (Ru > Os > Ir) >>> >>> (Pd > Pt, Rh). А вот анализ хромитита из полосчатого комплекса Нуралинского массива выпадает из общей закономерности распределения ЭПГ в хромититах офиолитовых массивов и показывает большое количество Pt и Pd и преобладание их суммы (4,326 г/т) над суммой редких платиноидов (0,807 г/т).

Таким образом, содержание ЭПГ в ультрамафитах Буруктальского, Уфалейского и Восточно-Тагильского массивов было низким и близким к среднему содержанию их в количественно преобладающих гарцбургитах (ΣЭПГ = 33,5 мг/т), а в хромититах – высоким (439,0 мг/т), при характере распределения (Os + Ir + Ru) >> (Pt + Pd + Rh). В целом для массивов этого формационного типа характерна рутений-иридий-осмиевая платинометалльная специализация [7].

Среднее содержание ЭПГ, Au и Ag в гипергенных никелевых месторождениях офиолитовых массивов. Первая информация об обогащенности гипергенных никелевых руд платиновыми металлами, по-видимому, была получена советскими геологами и металлургами (И.Н.Тихомиров, А.Я.Жидков, Г.Н.Доброхотов) при исследовании содержания этих элементов в продуктах переработки никелевых руд Кубы на заводах Моа и Никаро [7]. Реальным примером значительной концентрации платиновых металлов в продуктах переработки кубинских никелевых руд являются сульфидные концентраты, получаемые на заводах Никаро и Моа. Здесь в процессе сернокислого выщелачивания образуется полисульфидная пульпа или сульфидный концентрат NiS с высоким содержанием платиноидов. О количестве платиновых металлов и золота в сульфидных концентратах заводов Моа и Никаро можно судить по данным табл.2.

Таблица 2

Содержание платиновых металлов и золота в сульфидном концентрате заводов Никаро и Моа, г/т

Номер анализа	*n*	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	ΣЭПГ	Au	Pd/Pt	ΣЭПГ + Au
1	8	0,210	0,090	1,26	0,11	0,78	2,45	0,35	1,6	2,80
2	8	–	–	1,94	–	3,93	5,87	–	0,5	–
3	1	–		4,5	–	1,7	6,2	1,0	2,6	7,20
4	3	–	–	3,36	–	2,87	6,23	0,56	1,2	6,76

Примечание. 1-4 – анализы: 1-3 – завод Никаро (1 – лаборатория института «Гипроникель»; 2 - лаборатория Ленинградского горного института (ЛГИ); 3 – лаборатория института «Механобр)»; 4 – завод Моа, лаборатория ЛГИ.

В обширной литературе по корам выветривания встречались лишь отрывочные сведения о содержании и распределении в них элементов платиновой группы [5, 6]. Наши данные по золото-никелевым рудам месторождения Шкляры в Польше [13], данные А.Мартина с соавторами по платинометалльному месторождению Файфилд в Австралии [18], данные Д.Бандейера с соавторами по никеленосным латеритам массива Мусонгати (Бурунди) свидетельствуют о том, что никеленосные коры выветривания на ультрамафитовых массивах содержат определенные концентрации ЭПГ (табл.3).

Таблица 3

Средние содержания ЭПГ в кобальт-никелевых рудах разных месторождений кор выветривания, г/т

Номер анализа	Месторождение, массив	*n*	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Au	ΣЭПГ
1	Шклярское	3	0,085	0,165	2,790	0,008	0,025	0,520	0,700	3,593
2	Дю Сюд	–	–	–	0,080	–	–	0,190	–	0,270
3	Мусонгати	10	0,051	0,015	0,531	0,138	0,090	0,235	0,153	1,060
4	Файфилд	–	–	–	–	–	–	1,000	–	1,000
5	Йилгарнское	16	–	–	0,616	–	0,248	–	–	0,864

Примечание. 1-5 – анализы: 1 – Шклярское месторождение, Польша [13]; 2 - массив Дю Сюд, Новая Каледония [16]; 3 - массив Мусонгати, Бурунди [1]; 4 - массив Файфилд, Австралия [18]; 5 - Йилгарнское месторождение, Западная Австралия [19].

Как видно из табл.3, средние содержания платиноидов в пробах кобальт-никелевых руд разных месторождений по сумме ЭПГ существенно варьируют: от 0,270 г/т в массиве Дю Сюд (Новая Каледония) до 4,275 г/т в месторождении Шкляры (Польша). Особенно большой интерес представляет обнаружение Т.Оже и О.Лежандром [16] на участке Пирог массива Дю Сюд (Новая Каледония) обогащенного платиной (до 2 г/т) протяженного оксидно-железного горизонта мощностью 1 м со средним содержанием платины 0,5 г/т.

Буруктальское месторождение. Геохимические особенности платиновых металлов в коре выветривания Буруктальского месторождения обсуждались нами ранее в нескольких публикациях [11, 14]. Общая картина содержания и распределения ЭПГ в никеленосных породах Буруктальского месторождения представлена в табл.4. Следует отметить, что здесь и далее в таблицах приведены средние содержания благородных металлов (БМ) в пробах с точно диагностированным минеральным составом и содержанием NiO свыше 0,9 % по массе.

Таблица 4

Среднее содержание элементов платиновой группы, золота и серебра в никеленосных горных породах Буруктальского месторождения, г/т

Тип горных пород	*n*	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	ΣЭПГ	Au	Ag	ΣБМ	$\frac{Os + Ir + Ru}{Pt + Pd}$	Pt/Pd
Кварц-гетитовые	40	0,031	0,033	0,005	0,014	0,014	0,033	0,130	0,064	0,065	0,260	0,88	0,93
Асболан-гетитовые	15	0,037	0,037	0,005	0,014	0,018	0,060	0,170	0,088	0,100	0,359	1,16	1,00
Нонтронитовые	7	0,031	0,029	0,003	0,010	0,020	0,002	0,095	0,020	0,060	0,175	0,51	1,07
Лизардитовые	30	0,016	0,023	0,004	0,013	–	0,026	0,082	0,036	–	0,118	0,91	0,69

В табл.5 приведены значения коэффициентов накопления ($K_н$) ЭПГ в разных типах руд Буруктальского массива. Для их расчета в работе используются средние содержания элементов платиновой группы в офиолитовых гарцбургитах [7]. Для расчета величин $K_н$ по золоту и серебру здесь и далее нами использовались содержания этих элементов в примитивных шпинелевых лерцолитах мантии по [17]: золото – 0,65 мг/т, серебро – 6,8 мг/т.

Таблица 5

Коэффициенты накопления элементов платиновой группы, золота и серебра в никеленосных горных породах Буруктальского месторождения

Тип горных пород	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	ΣЭПГ	Au	Ag
Кварц-гетитовые	4,8	5,4	5,6	3,0	4,1	4,0	4,4	98,5	9,6
Асболан-гетитовые	5,8	6,1	5,6	3,0	5,3	7,3	5,7	135,4	14,7
Нонтронитовые	4,8	4,8	3,3	2,1	5,9	0,2	3,2	30,8	8,8
Лизардитовые	2,5	3,8	4,4	2,8	–	3,1	2,8	55,4	–

Помимо содержания и распределения нами изучалась также взаимосвязь ЭПГ, золота, серебра с элементами группы железа в никеленосных породах месторождения. Задачами исследования являлось выделение ассоциирующих и антагонистических линейных парагенезисов благородных металлов и элементов группы железа (ЭГЖ) на основе анализа множественных (парных) корреляционных связей между платиноидами и никелем, кобальтом, марганцем и др. Оценки парных коэффициентов корреляции между основными химическими компонентами коры выветривания Буруктальского массива приведены в табл.6 и 7.

Таблица 6

Матрица коэффициентов корреляции Pt, Pd, Au, Ni, Co и Mn в гетитовых никеленосных горных породах Буруктальского месторождения

	Pt, г/т	Pd, г/т	Au, г/т	Ni, %	Co, %	Mn, %
Pt, г/т	1,00					
Pd, г/т	0,98	1,00				
Au, г/т	0,12	−0,07	1,00			
Ni, %	−0,98	−0,92	−0,32	1,00		
Co, %	1,00	0,99	0,09	−0,97	1,00	
Mn, %	0,80	0,90	−0,49	−0,67	0,83	1,00

Таблица 7

Матрица коэффициентов корреляции Pt, Pd, Au, Ni, Co и Fe в никеленосных серпентинитах Буруктальского месторождения

	Pt, г/т	Pd, г/т	Au, г/т	Ni, %	Co, %	Fe, %
Pt, г/т	1,00					
Pd, г/т	-0,64	1,00				
Au, г/т	0,87	-0,94	1,00			
Ni, %	0,68	-1,00	0,95	1,00		
Co, %	0,64	-1,00	0,94	1,00	1,00	
Fe, %	0,63	-1,00	0,93	1,00	1,00	1,00

Рассмотрим подробнее содержание элементов платиновой группы в никеленосных горных породах Буруктальского месторождения. Из полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Все ЭПГ накапливаются в никеленосных горных породах Буруктальского месторождения, но имеют разные значения коэффициента $K_н$ (см. табл.5), что свидетельствует об их дифференцированной способности к накоплению по отношению друг к другу и разным горным породам месторождения.

2. По значениям $K_н$ можно выстроить следующий ряд: для гетитовых пород Ir (8,9) → → Pd (5,5) → Os (4,4) → Ru (4,0) → Pt (3,6) → Rh (1,9), для лизардитовых серпентинитов Os (4,1) → Pd (3,8) → Ru (3,2) → Pt (1,8) → Rh (1,5), а в среднем по месторождению Pd (5,0) → Ru (4,6) → Os (4,3) → Ir (3,1) → Pt (2,9) → Rh (1,8).

3. Геохимическая специализация платинометалльного оруденения определяется рутением, палладием и платиной и соответствует схеме Ru > Pd > Pt > Ir > Os > Rh.

4. Содержание всех ЭПГ в гетитовых породах выше, чем в серпентинитовых. Более всего эта разница отмечается, по-видимому, для платины и золота, в меньшей степени – для палладия и рутения, в наименьшей – для родия и осмия.

5. Сравнение значений $K_н$ элементов платиновой группы и элементов группы железа Буруктальского месторождения указывает на их сходство: для палладия – с никелем и кобальтом, для платины – с хромом и марганцем.

6. Отношение Pt/Pd показывает, что кварц-гетитовые породы и лизардитовые серпентиниты относительно обогащены палладием, а асболан-гетитовые и нонтронитовые породы – платиной.

7. Отношение редких платиноидов к платине и палладию дает возможность утверждать, что асболан-гетитовые горные породы относительно обогащены осмием, иридием, рутением, в отличие от других типов пород, где доминируют платина и палладий.

8. При анализе матриц оценок парных коэффициентов корреляции устанавливается, что в гетитовых породах Буруктальского месторождения проявляется прямая положительная зависимость содержаний платины, палладия, редких платиноидов и серебра от содержания в породах марганца и кобальта. Золото в этой зоне носит независимый характер распределения. Для серпентинитовой зоны месторождения характерны отрицательные корреляционные связи палладия с другими элементами, что также указывает на его независимый характер распределения в этой зоне.

Уфалейское месторождение. Общая картина содержания и распределения элементов платиновой группы и золота в никелевых рудах Уфалейского месторождения представлена в табл.8.

Таблица 8

Среднее содержание элементов платиновой группы и золота в никелевых рудах Уфалейского месторождения, г/т

Типы руд	*n*	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	ΣЭПГ	Au	ΣБМ	Pt/Pd
Клинохлор-гетитовые	20	0,030	0,050	0,004	–	0,015	0,018	0,117	0,466	0,583	0,60
Асболан-гетитовые	10	0,050	0,021	–	–	–	–	0,071	0,025	0,092	2,38
Лизардитовые	30	0,035	0,016	0,021	0,006	0,011	0,004	0,093	0,170	0,263	2,19
Пекораит-хризотил-кварцевые	5	0,040	0,068	0,020	–	–	–	0,127	0,095	0,222	0,59
Гарцбургиты субстрата	–	0,0064	0,0061	0,0009	0,0047	0,0034	0,0083	0,0298	0,0136	0,043	1,05

По данным табл.8 среднее содержание суммы ЭПГ в рудах Уфалейского месторождения составляет в клинохлор-гетитовых горных породах 0,117 г/т, в асболан-гетитовых 0,071 г/т, в лизардитовых – 0,093 г/т и в пекораит-хризотил-кварцевых – 0,127 г/т. Среднее содержание платины колеблется от 0,035 г/т в лизардитовых серпентинитах до 0,050 г/т в асболан-гетитовых породах; максимальное содержание платины зафиксировано нашими анализами в клинохлор-гетитовых рудах месторождения (0,436 г/т), а в рудах лизардитовых серпентинитов оно не превышает 0,049 г/т, т.е. остается стабильно более низким по отношению к гетитовым породам. Среднее содержание палладия меняется от 0,016 г/т в лизардитовых серпентинитах до 0,050 г/т в клинохлор-гетитовых породах при максималь-

ном значении содержаний 2,100 г/т в клинохлор-гетитовых рудах и 0,535 г/т в рудах лизардитовых серпентинитов. В клинохлор-гетитовых и пекораит-хризотил-кварцевых минеральных разновидностях горных пород палладий преобладает над платиной.

Все типы никеленосных горных пород содержат относительно высокие концентрации золота: максимальные в клинохлор-гетитовых горных породах (0,466 г/т), более низкие в лизардитовых серпентинитах (0,170 г/т) и пекораит-хризотил-кварцевых породах (0,095 г/т) и еще более низкие в асболан-гетитовых породах (0,025 г/т). При этом максимальное содержание золота в клинохлор-гетитовых породах равно 2,188 г/т, а в лизардитовых серпентинитах 1,521 г/т.

Кроме собственных данных в нашем распоряжении имелись результаты систематических анализов платиновых металлов в уфалейских рудах, выполненные в разные годы в Аналитическом испытательном центре ОАО «Уральская центральная лаборатория» в архивных и современных пробах. В соответствии с этими данными, среднее содержание благородных металлов в никелевых рудах Черемшанского месторождения составляет, г/т: Pt 0,033-0,046, Pd 0,037-0,069, Au 0,023-0,031, Ag 0,250-0,300, Pt + Pd 0,070-0,115.

Были также рассчитаны коэффициенты накопления ЭПГ и золота в никеленосных горных породах Уфалейского месторождения. Как показывают данные табл.9, все благородные металлы накапливаются в никелевых рудах Уфалейских месторождений: платина с $K_н$ = 4,7÷7,8 при максимальном $K_н$ в асболан-гетитовых породах; палладий с $K_н$ = 2,6÷11,1 при максимальном $K_н$ в пекораит-хризотил-кварцевых породах; родий с $K_н$ = 4,4÷23,3 при максимальном $K_н$ в лизардитовых серпентинитах; осмий с $K_н$ = 1,3 в лизардитовых серпентинитах, иридий с $K_н$ = 3,2÷4,4, рутений с $K_н$ = 0,5÷2,2 при максимальном $K_н$ в клинохлор-гетитовых породах, а золото с $K_н$ = 1,5÷34,2 при максимальном $K_н$ в клинохлор-гетитовых породах.

Таблица 9

Коэффициенты накопления ЭПГ и золота в никеленосных горных породах Уфалейского месторождения

Типы руд	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	ΣЭПГ	Au
Клинохлор-гетитовые	4,7	8,2	4,4	–	4,4	2,2	3,9	34,2
Асболан-гетитовые	7,8	3,4	–	–	–	–	2,4	1,5
Лизардитовые	5,5	2,6	23,3	1,3	3,2	0,5	3,1	12,5
Пекораит-хризотил-кварцевые	6,2	11,1	22,2	–	–	–	4,3	7,0

Таким образом, в Уфалейском месторождении элементы платиновой группы и золото следуют общей тенденции транзитных элементов, прослеженной нами на примере элементов группы железа. Они накапливаются с низкими и средними значениями $K_н$, которые даже несколько выше, чем у никеля, кобальта и марганца. Платина, палладий, золото, рутений и иридий обладают более высокими содержаниями в оксидно-железной зоне месторождения (платина – в асболан-гетитовых, а палладий, золото, рутений и иридий – в клинохлор-гетитовых породах), а для родия характерны высокие значения $K_н$ в лизардитовых серпентинитах. Следует отметить, что специфическая минеральная разновидность горных пород Уфалейского месторождения – пекораит-хризотил-кварцевые метасоматиты – характеризуется относительно высокими значениями $K_н$ благородных металлов, особенно для палладия и родия (табл.9).

Еловское месторождение. С учетом больших запасов кобальт-никелевых руд и значительной перспективности отработки группы Серовских месторождений (20-40 лет) информация о распределении в них платиновых металлов представляет практический интерес. Ранее данные о содержании платиновых металлов в рудах Еловского месторождения были опубликованы Ю.А.Волченко с авторами [3], М.И.Новгородовой [9] и нами [10]. Уточненные данные по результатам исследований 2005-2010 годов приведены в табл.10.

Таблица 10

Содержание ЭПГ и золота в кобальт-никелевых рудах Еловского месторождения, г/т

Горные породы	*n*	Pt	Pd	Rh	Os*	Ir*	Ru*	ΣЭПГ	Au	ΣБМ	Pt/Pd
Гетитовые	5	0,015	0,019	0,002	0,007	0,010	0,004	0,057	0,060	0,117	0,8
Шамозит-гетитовые	10	0,040	0,055	–	–	–	–	0,095	0,025	0,120	0,7
Асболан-гетит-шамозитовые	10	0,050	0,020	0,010	–	–	–	0,080	0,030	0,110	2,5
Среднее по гетитовым породам		0,035	0,031	0,006	0,007	0,010	0,004	0,077	0,038	0,116	1,1
Тальк-клинохлор-шамозитовые	10	0,025	0,350	н/о	–	–	–	0,375	0,980	1,355	0,1
Миллерит-бриндлейит-шамозитовые	10	0,040	0,110	н/о	–	–	–	0,150	0,920	1,070	0,4
Среднее по шамозитовым породам		0,033	0,230	–	–	–	–	0,263	0,950	1,213	0,2
Шамозит-лизардитовые	10	0,080	0,250	0,020	–	–	–	0,350	0,095	0,445	0,3
Клинохлор-тальк-шамозит-лизардитовые	10	0,090	0,110	0,020	–	–	–	0,220	0,045	0,265	0,8
Непуит-кварц-лизардитовые	10	0,078	0,110	н/о	–	–	–	0,188	0,830	1,018	0,7
Среднее по лизардитовым серпентинитам		0,083	0,157	0,013	–	–	–	0,253	0,323	0,576	0,5

* Данные Ю.А.Волченко и др. [3].

Из табл.10 следует, что содержание суммы ЭПГ в никеленосных отложениях Еловского месторождения составляет около 0,077 г/т в гетитовых горных породах, а в шамозитовых породах и лизардитовых серпентинитах оно в 3 раза выше (соответственно 0,263 и 0,253 г/т). Общая сумма благородных металлов (табл.10) максимальна в шамозитовых горных породах – 1,213 г/т, в 2 раза ниже в лизардитовых серпентинитах – 0,576 г/т и самая низкая в гетитовых горных породах – 0,116 г/т.

Были также рассчитаны коэффициенты накопления ЭПГ и золота в никеленосных горных породах Еловского месторождения. Как показывают данные табл.11, в горных породах Еловского месторождения накапливаются все благородные металлы: платина имеет $K_н$ = 2,3÷14,1 при максимальных значениях $K_н$ = 12,2÷14,1 в лизардитовых серпентинитах и минимальных $K_н$ = 2,3÷7,8 в гетитовых породах. Палладий накапливается с $K_н$ = 3,1÷9,0 в гетитовых породах, максимальные значения $K_н$ характерны для шамозитовых пород ($K_н$ = 18,0÷57,4), а в лизардитовых серпентинитах значения средние ($K_н$ = 18,0÷41,0). Коэффициенты накопления родия несколько выше в лизардитовых серпетинитах (до 22,2 г/т), чем в гетитовых породах ($K_н$ = 2,2÷11,1), хотя для более полного анализа степени накопления этого элемента данных недостаточно. Редкие платиноиды обладают самыми низкими значениями $K_н$ (0,5-2,9) и рассчитаны по данным Ю.А.Волченко [3]. Золото имеет самые высокие значения $K_н$ в шамозитовых породах ($K_н$ = 67,6÷72,1), значительно более низкие значения в лизардитовых серпентинитах ($K_н$ = 3,3÷7,0), за исключением жильной непуит-кварц-лизардитовой разновидности серпентинитов, где $K_н$ этого элемента равен 61,0. В гетитовых породах $K_н$ золота еще ниже и равен 1,8-4,4.

Таким образом, на Еловском месторождении элементы платиновой группы и золото следуют общей тенденции транзитных элементов, прослеженной нами на примере Буруктальского и Уфалейского месторождений, накапливаться с низкими и средними $K_н$, значения которых даже выше, чем у никеля, кобальта и марганца. Преобладающим платиноидом является палладий. Сумма редких платиноидов в гетитовых породах Еловского месторождения, по-видимому, заметно уступает сумме платины и палладия. Платина и родий обладают более высокими содержаниями в серпентинитовой зоне, рутений – в оксидно-железной зоне, а палладий и золото – в шамозитовой зоне месторождения, особенно в тальк-клинохлор-шамозитовых породах. Палладий, кроме того, обладает высокими содержаниями в шамозит-лизардитовых серпентинитах, а золото – в непуит-кварц-лизардитовых.

Таблица 11

Коэффициенты накопления ЭПГ и золота в никеленосных горных породах Еловского месторождения

Горные породы	*n*	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	Au	ΣЭПГ
Гетитовые	5	2,3	3,1	2,2	1,5	2,9	0,5	4,4	1,9
Шамозит-гетитовые	10	6,3	9,0	–	–	–	–	1,8	3,2
Асболан-гетит-шамозитовые	10	7,8	3,3	11,1	–	–	–	2,2	2,7
Среднее по гетитовым породам		5,5	5,1	6,7	1,5	2,9	0,5	2,8	2,6
Тальк-клинохлор-шамозитовые	10	3,9	57,4	–	–	–	–	72,1	12,6
Миллерит-бриндлейит-шамозитовые	10	6,3	18,0	–	–	–	–	67,6	5,0
Среднее по шамозитовым породам		5,1	37,7	–	–	–	–	69,9	8,8
Шамозит-лизардитовые	10	12,5	41,0	22,2	–	–	–	7,0	11,7
Клинохлор-тальк-шамозит-лизардитовые	10	14,1	18,0	22,2	–	–	–	3,3	7,4
Непуит-кварц-лизардитовые	10	12,2	18,0	–	–	–	–	61,0	6,3
Среднее по лизардитовым серпентинитам		12,9	25,7	–	–	–	–	23,8	8,5

Выводы. Подведем некоторые итоги, касающиеся уровня концентрации платиновых металлов, золота и серебра в никеленосных горных породах гипергенных месторождений, а также возможностей их извлечения.

1. Никеленосные горные породы гипергенных никелевых месторождений Урала являются нетрадиционным источником платино-палладиевого сырья, а также золота и серебра, так как содержат повышенные концентрации благородных металлов ($n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^{-2}$ г/т). Средний уровень концентрации платиновых металлов в гипергенных никелевых месторождениях варьирует от 0,2 до 0,7 г/т.

2. Все ЭПГ накапливаются в гипергенных никелевых месторождениях с разными значениями $K_н$, что свидетельствует об их дифференцированной способности к накоплению по отношению друг к другу и в разных горных породах месторождения.

3. Геохимическая специализация платинометалльного оруденения гипергенных никелевых месторождений определяется палладием и платиной, тогда как в дунит-гарцбургитовом субстрате первичных офиолитовых массивов главными платиноидами являются рутений, осмий и иридий.

4. Платина и палладий являются главными платиноидами гипергенных никелевых месторождений, сумма средних содержаний платины и палладия в них преобладает над суммой средних содержаний рутения, осмия и иридия. В оксидно-железных рудах Уфалейского, Рокгемптонского (Австралия), Гринвейлского (Австралия) массивов отношение Pt / Pd > 1, в рудах Буруктальского и Еловского массивов Pt / Pd < 1, а в месторождении Никаро (Куба) вообще падает до 0,15. В серпентинитовых рудах обычно отношение Pt / Pd < 1, т.е. в них, за некоторым исключением, преобладает палладий.

5. Средние содержания ЭПГ в оксидно-железных рудах выше средних содержаний в гипергенных серпентинитах.

6. Внутри отдельных типов горных пород также наблюдаются положительные и отрицательные аномалии в содержании платиновых металлов. Они определяются, в первую очередь, минералогическим фактором, иногда гранулометрическим и, возможно, литологическим факторами. Повышенные количества платиновых металлов в оксидно-железных породах явно тяготеют к «марганцевому горизонту» на нижней границе оксидно-железной зоны. В серпентинитовых породах положительные аномалии платиновых металлов, по-видимому, связаны с зонами развития жильных непуит- и пекораитсодержащих образований.

7. Концентрация золота и серебра в рудах и метасоматитах гипергенных никелевых месторождений, по нашим данным, обычно колеблется в пределах десятков миллиграммов

на тонну. В некоторых же месторождениях – например, в Уфалейском для золота и в месторождениях Гринвейл и Рокгемптон (Австралия) для серебра, она достигает аномальных значений и требует дополнительных генетических разъяснений.

8. Работами российских металлургов [4, 12] на примере гипергенных никелевых руд Урала и Кубы показано, что попутное извлечение платиновых металлов, золота и серебра из гипергенных никелевых руд возможно в ходе металлургического передела этих руд. На разных стадиях этого процесса из никелевых руд, первично бедных благородными металлами, получают промежуточные промпродукты, обогащенные этими металлами, с высокими коэффициентами накопления. К подобным продуктам, в частности, принадлежат сульфидные концентраты заводов Моа и Никаро с содержанием платиновых металлов 2-6 г/т или кеки автоклавного выщелачивания комбината «Южуралникель», содержащие 200-500 г/т серебра и 200 г/т платиновых металлов и золота. Использование дешевых реагентов позволяет рентабельно извлекать из этих промпродуктов платиновые металлы, золото и серебро. Предварительные экономические подсчеты показывают, что при производительности никелевого комбината в 10 тыс.т никеля в год через его цеха за этот период проходит несколько сотен килограммов благородных металлов: 100 кг Au, 100 кг Pt, 80-100 кг Pd, 70 кг Ru, 20 кг Ir. Эти количества явно заслуживают извлечения и по этой причине дальнейшие научно-экспериментальные исследования по усовершенствованию и удешевлению способов извлечения благородных металлов в металлургическом процессе необходимо интенсифицировать.

Появление современных технологий делает актуальным также вопрос о подсчете ресурсов элементов платиновой группы, золота и серебра в рудах никелевых кор. Это обстоятельство дает основание уральским территориальным органам управления природными ресурсами при выдаче лицензий на недропользование требовать от комбинатов, эксплуатирующих руды этих месторождений, оценки запасов (ресурсов) не только основных полезных компонентов – никеля и кобальта, но и платиновых металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бандейера Д.* Геохимия элементов платиновой группы (ЭПГ) в никеленосных латеритах комплекса Мусонгати (Бурунди) / Д.Бандейера, С.А.Барнс, М.Д.Хиггинс // Тезисы докладов VII Международного платинового симпозиума. М.: Московский контакт, 1994. С.9.

2. *Варлаков А.С.* Петрография, петрохимия и геохимия гипербазитов Оренбургского Урала. М.: Наука, 1978. 239 с.

3. *Волченко Ю.А.* Платиноносность ультрамафитов и хромовых руд альпинотипных массивов Главного офиолитового пояса Урала / Ю.А.Волченко, В.А.Коротеев, И.И.Неустроева // Геология рудных месторождений. 2009. Т.51. № 2. С.182-200.

4. *Крупенко И.Н.* Попутное производство благородных металлов при переработке окисленных никелевых руд / И.Н.Крупенко, В.Ф.Астафьев // Цветные металлы. 1993. № 7. С.21-23.

5. *Лазаренков В.Г.* Никелевые коры выветривания как потенциальный промышленный источник металлов платиновой группы / В.Г.Лазаренков, В.Ю.Абрамов, И.В.Таловина // Платина России. Т.2. Кн.1. М.: Геоинформмарк, 1995. С.121-125.

6. *Лазаренков В.Г.* Промышленные перспективы никелевых коровых руд на элементы платиновой группы / В.Г.Лазаренков, И.В.Таловина // Горный журнал. 1997. № 11. С.32-34.

7. *Лазаренков В.Г.* Геохимия элементов платиновой группы / В.Г.Лазаренков, И.В.Таловина. СПб: Галарт, 2001. 266 с.

8. *Молошаг В.П.* Платинометалльная минерализация Нуралинского гипербазит-габбрового массива / В.П.Молошаг, С.В.Смирнов // Записки Всероссийского минералогического общества. 1996. Ч.125. № 1. С.48-54.

9. *Новгородова М.И.* Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, 1983. 287 с.

10. *Петрова И.В.* Содержание элементов платиновой группы и золота в кобальт-никелевых рудах Серовского месторождения, Северный Урал / И.В.Петрова, В.Г.Лазаренков // Материалы Уральской летней минералогической школы / Уральская гос. горно-геол. академия. Екатеринбург, 1999. С.192-193.

11. Платиновые металлы в гипергенных никелевых месторождениях и перспективы их промышленного извлечения / В.Г.Лазаренков, И.В.Таловина, И.Н.Белоглазов, В.И.Володин. СПб: Недра, 2006. 188 с.

12. Поведение благородных металлов и рения при переработке окисленных никелевых руд и пути их извлечения / Т.Н.Грейвер, Е.В.Попков, А.И.Чернов и др. // Цветные металлы. 1994. № 94. С.30-33.

13. *Саханбинский М.Н.* Распределение элементов платиновой группы и золота в никелевой коре выветривания хризопразового месторождения Шкляры (Польша) / М.Н.Саханбинский, В.Г.Лазаренков, М.Кроненберг // Тезисы докладов VII Международного платинового симпозиума. М.: Московский контакт, 1994. С.98.

14. *Таловина И.В.* Платиноиды и золото в оксидно-силикатных никелевых рудах Буруктальского и Уфалейского месторождений, Урал / И.В.Таловина, В.Г.Лазаренков, Н.И.Воронцова // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 5. С.474-487.

15. *Талхаммер Т.В.* Ассоциация минералов платиновой группы в массивных хромитовых рудах Кемпирсайского офиолитового комплекса (Южный Урал), как проявление мантийного метасоматоза // Записки Всероссийского минералогического общества. 1996. Ч.125. № 1. С.25-36.

16. *Augé T.* Platinum-Group Elements Oxides from the Pirogues Ophiolitic Mineralization, New Caledonia: Origin and Significance / T.Augé, O.Legendre // Economic Geology. 1994. Vol.89. P.1454-1468.

17. *Mc Donough W.F.* Constrains of the composition of continental lithospheric mantle // Earth and Planet. Sci. Lett. 1990. Vol.101. N 1. P.1-18.

18. Styles of Pt mineralizations in Alaskan-type intrusives in the Fifield region, New South Wales, Australia / A.R.Martin, A.R.Keays, S.I.Elliott, B.A.Brill // Abstracts of 6-th International Platinum Symposium. 1991. Perth, Australia. P.35-36.

19. *Travis G.A.* Palladium and iridium in the evolution of nickel gossans in Western Australia / G.A.Travis, R.R.Keays, R.M.Davidson // Economic Geology. 1976. Vol.71. N 7. P.1229-1243.

REFERENCES

1. *Bandeiera D.*, *Barns S.A.*, *Khiggins M.D.* Geokhimiya elementov platinovoi gruppy (EPG) v nikelenosnykh lateritakh kompleksa Musongati (Burundi) (*Geochemistry of PGE in Nickel-Bearing Laterites of the Musongati Complex* (*Burundi*)). Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnogo platinovogo simpoziuma. Moscow: Moskovskii kontakt, 1994, p.9.

2. *Varlakov A.S.* Petrografiya, petrokhimiya i geokhimiya giperbazitov Orenburgskogo Urala (*Petrography*, *Petrochemistry, and Geochemistry of Ultramafic Rocks*), Moscow: Nauka, 1978, p.239.

3. *Volchenko Yu.A.*, *Koroteev V.A.*, *Neustroeva I.N.* Platinonosnost' ul'tramafitov i khromovykh rud al'pinotipnykh massivov Glavnogo ofiolitovogo poyasa Urala (*Platinum metals in ultramafites and chromite ores of alpinotype massifs in the Main Ophiolitic Belt in Urals*). Geologiya rudnykh mestorozhdenii. 2009. Vol.51. N 2, p.182-200.

4. *Krupenko I.N.*, *Astaf'ev V.F.* Poputnoe proizvodstvo blagorodnykh metallov pri pererabotke okislennykh nikelevykh rud (*Extraction of Noble Metals as Byproducts during the Processing of Oxidized Nickel Ores*). Tsvetnye metally. 1993. N 7, p.21-23.

5. *Lazarenkov V.G.*, *Abramov V.Yu.*, *Talovina I.V.* Nikelevye kory vyvetrivaniya kak potentsial'nyi promyshlennyi istochnik metallov platinovoi gruppy (*Nickel-Bearing Weathering Crusts As a Potential Commercial Source of Platinum Group Metals*). Platina Rossii. Moscow: Geoinformmark, 1995. Vol.2. Book 1, p.121-125.

6. *Lazarenkov V.G.*, *Talovina I.*V. Promyshlennye perspektivy nikelevykh korovykh rud na elementy platinovoi gruppy (*Commercial perspective of platinum group elements in supergene nickel ores*). Gornyi zhurnal. 1997. N 11, p.32-34.

7. *Lazarenkov V.G.*, *Talovina I.V.* Geokhimiya elementov platinovoi gruppy (*Geochemistry of Platinum Group Elements*). St Petersburg: Galart, 2001, p.266.

8. *Maloshag V.P.*, *Smirnov S.V.* Platinometall'naya mineralizatsiya Nuralinskogo giperbazit-gabbrovogo massiva (*Platinoid Mineralization of the Nuralin Ultramafic Rock-Gabbro Massif* (*Southern Urals*)). Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 1996. Part 125. N 1, p.48-54.

9. *Novgorodova M.I.* Samorodnye metally v gidrotermal'nykh rudakh (*Noble metals in hydrothermal ores*). Moscow: Nauka, 1983, p.287

10. *Petrova I.V.*, *Lazarenkov V.G.* Soderzhanie elementov platinovoi gruppy i zolota v kobal't-nikelevykh rudakh Serovskogo mestorozhdeniya, Severnyi Ural (*Platinum group element and gold content in cobalt-nickel ores of the Serov deposit*, *Northern Urals*). Materialy Ural'skoi letnei mineralogicheskoi shkoly. Ural'skaya gos. gorno-geol. akademiya. Ekaterinburg, 1999, p.192-193.

11. *Lazarenkov V.G.*, *Talovina I.V.*, *Beloglazov I.N.*, *Volodin V.I.* Platinovye metally v gipergennykh nikelevykh mestorozhdeniyakh i perspektivy ikh promyshlennogo izvlecheniya (*Platinum metals in the supergene nickel deposits and prospects for industrial extraction*). St Petersburg: Nedra, 2006, p.188

12. *Greiver T.N.*, *Popkov E.V.*, *Chernov A.I.* et al. Povedenie blagorodnykh metallov i reniya pri pererabotke okislennykh nikelevykh rud i puti ikh izvlecheniya (*Behavior of Noble Metals and Rhenium during the Treatment of Oxidized Nickel Ores and Techniques for Their Commercial Recovery*). Tsvetnye metally. 1994. N 94, p.30-33.

13. *Sakhanbinskii M.N.*, *Lazarenkov V.G.*, *Kronenberg M.* Raspredelenie elementov platinovoi gruppy i zolota v nikelevoi kore vyvetrivaniya khrizoprazovogo mestorozhdeniya Shklyary (Pol'sha) (*Distribution of Platinum Group Elements and Gold in the Nickel-Bearing Weathering Crust of the Shklary Chrysoprase Deposit* (*Poland*)). Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnogo platinovogo simpoziuma. Moscow: Moskovskii kontakt, 1994, p.98.

14. *Talovina I.V.*, *Lazarenkov V.G.*, *Vorontsova N.I.* Platinoidy i zoloto v oksidno-silikatnykh nikelevykh rudakh Buruktal'skogo i Ufaleiskogo mestorozhdenii, Ural (*Platinum and gold in oxide-silicate nickel ores of the Buruktal and Ufaley deposits*, *Urals*). Litologiya i poleznye iskopaemye. 2003. N 5, p.474-487.

15. *Talkhammer T.V.* Assotsiatsiya mineralov platinovoi gruppy v massivnykh khromitovykh rudakh Kempirsaiskogo ofiolitovogo kompleksa (Yuzhnyi Ural), kak proyavlenie mantiinogo metasomatoza (*Association of Platinum Group Minerals in Massive Chromite Ores of the Kempirsai Ophiolitic Complex* (*Southern Urals*) *as a Manifestation of Mantle Metasomatism*). Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 1996. Part 125. N 1, p.25-36.

16. *Augé T.*, *Legendre O.* Platinum-Group Elements Oxides from the Pirogues Ophiolitic Mineralization, New Caledonia: Origin and Significance. Economic Geology. 1994. Vol.89, p.1454-1468.

17. *Mc Donough W.F.* Constrains of the composition of continental lithospheric mantle. Earth and Planet. Sci. Lett. 1990. Vol.101. N 1, p.1-18.

18. *Martin A.R.*, *Keays A.R.*, *Elliott S.I.*, *Brill B.A.* Styles of Pt mineralizations in Alaskan-type intrusives in the Fifield region, New South Wales, Australia. Abstracts of 6-th International Platinum Symposium. 1991. Perth, Australia, p.35-36.

19. *Travis G.A.*, *Keays R.R.*, *Davidson R.M.* Palladium and iridium in the evolution of nickel gossans in Western Australia. Economic Geology. 1976. Vol.71. N 7, p.1229-1243.

PLATINUM SPECIALIZATION OF SUPERGENE NICKEL DEPOSITS ON ULTRAMAFIC MASSIFS OF THE URALS

I.V.TALOVINA, *Dr. of Geological & Mineral Sciences*, *Professor*, *i.talovina@gmail.com*
Saint-Petersburg Mining University, *Russia*

This paper presents an analysis of geochemical data obtained as a result of persistent research of the Buruktal, Ufalei, Elov and others supergene nickel deposits of the Urals on the content of precious metals. Content and distribution of platinum group elements, gold and silver in oxide–silicate nickel ores are compared with their content in initial dunite-harzburgite bedrock. It was revealed that all the PGE accumulate in supergene nickel deposits. Geochemical specialization of PGE mineralization of supergene nickel deposits is determined by palladium and platinum, while in dunite-harzburgite substrate of primary ophiolitic massifs major platinoids are ruthenium, osmium and iridium. Pt/Pd ratio is generally less than 1, i.e. palladium is dominating in them with some exceptions.

***Key words*:** platinum group elements, gold, silver, the Buruktal, Ufalei, Elov supergene nickel deposit, dunite-harzburgite bedrock, ophiolitic massif, the Urals.