

**И.В.ТАЛОВИНА**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *i.talovina@gmail.com*

**В.Г.ЛАЗАРЕНКОВ**, д-р геол.-минерал. наук, профессор, *lazarenkov@mail.ru*

**Н.И.ВОРОНЦОВА**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *natvoron@yandex.ru*

**А.Г.ПИЛЮГИН**, аспирант, *andrew\_pilugin@mail.ru*

**А.М.ГАЙФУТДИНОВА**, аспирантка, *gayfutdinova@gmail.com*

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург*

**I.V.TALOVINA**, PhD in geol. & min. sc., associate professor, *i.talovina@gmail.com*

**V.G.LAZARENKOV**, Dr. in geol. & min. sc., professor, *lazarenkov@mail.ru*

**N.I.VORONTSOVA**, PhD in geol. & min. sc., associate professor, *natvoron@yandex.ru*

**A.G.PILUGIN**, post-graduate student, *andrew\_pilugin@mail.ru*

**A.M.GAYFUTDINOVA**, post-graduate student, *gayfutdinova@gmail.com*

*National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg*

## **ЭЛЕМЕНТЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ, ЗОЛОТО И СЕРЕБРО В ГИПЕРГЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НА ОФИОЛИТОВЫХ МАССИВАХ С ДУНИТ-ГАРЦБУРГИТОВЫМ СУБСТРАТОМ**

Проведено изучение содержания и распределения элементов платиновой группы, золота и серебра в Буруктальском, Уфалейском и Еловском гипергенных никелевых месторождениях по сравнению с содержанием этих элементов в дунит-гарцбургитовом субстрате первичных офиолитовых массивов.

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

## **PLATINUM GROUP ELEMENTS, GOLD AND SILVER IN SUPERGENE NICKEL DEPOSITS ON DUNITE-HARZBURGITE BEDROCK OF OPHIOLITIC MASSIFS**

Contents of platinum group elements (PGE), gold and silver in oxide-silicate nickel ores of the Buruktal, Ufalei and Elov supergene nickel deposits are determined in relation to their ophiolitic dunite-harzburgite bedrock.

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

**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 круп-

ных, 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 плати-

новых 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 количество 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).

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 подформных 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 ( $Os > Ir > Ru$ )  $\gg$  ( $Pt > Pd > Rh$ ). 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 ( $Ru > Os > Ir$ )  $\gg \gg$  ( $Pd > Pt, Rh$ ).

Таблица 1

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

№ п/п	n	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	∑ ЭПГ	$\frac{Os+Ir+Ru}{Pt+Pd}$	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	–

*Примечание.* 1 – гарцбургит Буруктальского массива, лаборатория «Механообр-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]; n – число анализов, н.о. – элемент не определялся, «–» – нет данных.

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 уровню содержания их в количественно преобладающих гарцбургитах ( $\sum \text{ЭПГ} = 33,5 \text{ мг/т}$ ), а в хромититах – высоким (439,0 мг/т), при характере распределения  $(Os + Ir + Ru) \gg (Pt + Pd + Rh)$ . В целом, для массивов этого формационного типа характерна рутений-иридий-осмиевая платинометаллическая специализация [Золоев и др., 2001; Lazarenkov, Talovina, 2001].

**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 [Lazarenkov a.o., 2005]. 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

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

№ п/п	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.* 1-3 – завод Никаро: 1 – лаборатория института Гипроникель; 2 – лаборатория Горного университета, 1994 г.; 3 – лаборатория института Механобр; 4 – завод Моа, лаборатория Горного университета, 1994 г.; n – число проб.

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.

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, 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

№ п/п	n	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Au	ΣЭПГ
1	3	0,085	0,165	2,790	0,008	0,025	0,520	0,700	3,593
2	–	–	–	0,080	–	–	0,190	–	0,270
3	10	0,051	0,015	0,531	0,138	0,090	0,235	0,153	1,060
4	–	–	–	–	–	–	1,000	–	1,000
5	16	–	–	0,616	–	0,248	–	–	0,864

*Примечание.* 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]; n - число анализов.

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 до 4,275 г/т в месторождении Шкляры. Особенно большой интерес представляет обнаружение Т.Оже и О.Лежандром [16] на участке Пирог массива Дю Сюд 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 в пробах с точно диагностированным минеральным составом и массовым содержанием свыше 0,9 % NiO.

Далее были определены значения коэффициентов накопления (Кн) ЭПГ в разных типах руд Буруктальского массива (табл.5). Для расчета этих значений использовались средние содержания элементов платиновой группы в офиолитовых гарцбургитах [7], а для расчета Кн по золоту и серебру здесь и далее нами – содержания этих элементов в примитивных шпинелевых лерцолитах мантии по В.Мак Донугу [17]: золото – 0,65 мг/т, серебро – 6,8 мг/т.

Помимо содержания и распределения, нами изучалась также взаимосвязь ЭПГ, золота, серебра с элементами группы железа (ЭГЖ) в никеленосных породах месторождения. Задачами исследования являлись выделение ассоциирующих и антагонистических линейных парагенезисов благородных

Таблица 4

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

Типы горных пород	<i>n</i>	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	Σ ЭПГ	Au	Ag	Σ БМ	$\frac{Os+Ir+Ru}{Pt+Pd}$	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

Примечание. *n* – число проб; «–» – не определялось; БМ – благородные металлы.

Таблица 5

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

Типы горных пород	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	Σ ЭПГ	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	–

металлов и 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**

Элемент	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**

Элемент	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, и процесс протекает с разными значениями *K<sub>n</sub>* (см. табл. 5), что свидетельствует об их дифференцированной способности к накоплению по отношению друг к другу и к разным горным породам месторождения.

2. По значениям *K<sub>n</sub>* можно выстроить 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  $K_n$  элементов платиновой группы и элементов группы железа Буруктальского месторождения показывает их сходство: для Pd – с Ni и Co, для Pt – с Cr и Mn.

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

7. Отношение редких платиноидов к платине и палладию показывает, что асболян-гетитовые горные породы относительно обогащены Os, Ir, Ru, в отличие от других типов пород, где доминируют Pt и Pd.

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. Распределение золота в этой зоне носит независимый характер. Для серпентинитовой зоны месторождения характерны отрицательные корреляционные связи Pd с другими элементами, что также указывает на независимый характер его 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.

По данным табл.8, среднее содержание суммы ЭПГ в рудах Уфалейского месторождения составляет в клинохлор-гетитовых горных породах 0,117 г/т, в асболян-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 асболян-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 максимальном 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 асболян-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 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.

Как показывают коэффициенты накопления ЭПГ и золота в никеленосных горных породах Уфалейского месторождения (табл.9), все благородные металлы накапливаются в никелевых рудах Уфалейских месторождений: платина с  $K_n = 4,7 \div 7,8$  и максимальным значением в асболян-гетитовых породах, палладий с  $K_n = 2,6 \div 11,1$  и максимальным значением в пекораит-хризотил-кварцевых породах, родий с  $K_n = 4,4 \div 23,3$  и максимальным значением в лизардитовых серпентинитах, осмий с  $K_n = 1,3$  в лизардитовых серпентинитах, иридий с  $K_n = 3,2 \div 4,4$ , рутений с  $K_n = 0,5 \div 2,2$  и максимальным значением в клинохлор-гетитовых породах, а золото с  $K_n = 1,5 \div 34,2$  и максимальным значением в клинохлор-гетитовых породах.

Таблица 8

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

Типы горных пород	n	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	Σ ЭПГ	Au	Σ БМ	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

Примечание. n – число проб, «–» – не определялось.

Таблица 9

**Коэффициенты накопления ЭПГ и золота в никеленосных горных породах Уфалейского месторождения**

Типы горных пород	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	Σ ЭПГ	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

Таблица 10

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

Типы горных пород	n	Pt	Pd	Rh	Os*	Ir*	Ru*	Σ ЭПГ	Au	Σ БМ	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

Примечание. n – число анализов, н/о – не обнаружено, «–» – не определялось, «\*» – данные Ю.А.Волченко и др. (1997).

Таким образом, на Уфалейском месторождении элементы платиновой группы и золото следуют общей тенденции транзитных элементов, прослеженной нами на примере элементов группы железа, накапливаться с низкими и средними значениями Кн, которые даже несколько выше, чем у никеля, кобальта и марганца. Платина, палладий, золото, рутений и иридий обладают более высокими содержаниями в окисно-железной зоне месторождения (платина в асболан-гетитовых, а палладий, золото, рутений и иридий – в клинохлор-гетитовых

породах), а для родия характерны высокие Кн в лизардитовых серпентинитах. Следует отметить, что специфическая минеральная разновидность горных пород Уфалейского месторождения – пекораит-хризотил-кварцевые метасоматиты – характеризуется относительно высокими значениями Кн благородных металлов, особенно для палладия и родия (табл.9).

*Еловское месторождение.* Учитывая большие запасы кобальт-никелевых руд и значительную перспективность 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 и др. (1997) и нами [10]. Уточненные данные по результатам исследований 2005-2010 гг. приведены в табл.10.

Из табл.10 следует, что содержание суммы ЭПГ в никеленосных горных породах Еловского месторождения составляет около 0,077 г/т в гетитовых горных породах, а в шамозитовых породах и лизардитовых серпентинитах оно в 3 раза выше (0,263 и 0,253 г/т соответственно). 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.

Как показывают коэффициенты накопления ЭПГ и золота в никеленосных горных породах Уфалейского месторождения (табл.11), все благородные металлы накапливаются в горных породах Еловского месторождения: платина имеет  $K_n = 2,3 \div 14,1$  с максимальными значениями  $K_n = 12,2 \div 14,1$  в лизардитовых серпентинитах, а минимальными  $K_n = 2,3 \div 7,8$  в гетитовых породах. Палладий накапливается с  $K_n = 3,1 \div 9,0$  в гетитовых породах, максимальные его значения характерны для шамозитовых пород ( $K_n = 18,0 \div 57,4$ ), а в лизардитовых серпентинитах они средние ( $K_n = 18,0 \div 41,0$ ). Коэффициенты накопления родия несколько выше в лизардитовых серпентинитах (до 22,2 г/т), чем в гетитовых породах

( $K_n = 2,2 \div 11,1$ ), хотя для более полного анализа степени накопления этого элемента данных недостаточно. Редкие платиноиды обладают самыми низкими  $K_n = 0,5 \div 2,9$  и рассчитаны по данным Ю.А.Волченко (1997). Золото имеет самые высокие значения  $K_n$  в шамозитовых породах ( $K_n = 67,6 \div 72,1$ ), значительно более низкие  $K_n$  в лизардитовых серпентинитах ( $K_n = 3,3 \div 7,0$ ), за исключением жильной непуит-кварц-лизардитовой разновидности серпентинитов, где  $K_n = 61,0$ . В гетитовых породах  $K_n$  золота еще ниже (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  $K_n$ , 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 Pt + Pd. 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, а золото – в непуит-кварц-лизардитовых серпентинитах.

**Выводы.** Подведем некоторые итоги, касающиеся уровня концентрации платиновых металлов, золота и серебра в никеле-

Таблица 11

Коэффициенты накопления ЭПГ и золота в никеленосных горных породах Еловского месторождения

Типы горных пород	n	Pt	Pd	Rh	Os	Ir	Ru	Au	Σ ЭПГ
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

носных 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 (от  $n \cdot 10^{-1}$  до  $n \cdot 10^{-2}$  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  $K_n$ , что свидетельствует об их дифференцированной способности к накоплению по отношению друг к другу и к разным горным породам 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 Pt + Pd в них преобладает над суммой средних содержаний Ru + Os + Ir. В оксидно-железных рудах Уфалейского, Рокгемптонского (Австралия), Гринвейлского (Австралия) массивов отношение Pt/Pd > 1, в рудах Буруктальского и Еловского массивов оно меньше единицы, а в месторождении Никаро (Куба) вообще падает до 0,15. В серпентинитовых рудах отношение Pt/Pd обычно ниже единицы, 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. Повы-

шенные 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 неупит- 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, относятся 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 10 тыс.т никеля в год через его цеха за этот период проходит несколько сотен килограммов благородных металлов: 100 кг Au, 50-100 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 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 // Тез. докладов VII Международ. 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. М.: Геоинформмарк, 1995. Т.2. Кн.1. 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. Платинометальная минерализация Нуралинского гипербазит-габбрового массива / В.П.Молошаг, С.В.Смирнов // Зап. Всерос. минерал. о-ва. 1996. 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 // Мат. Урал. летней минер. школы. Екатеринбург: Изд-во УГГА, 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. № 9. 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 // Тез. докладов VII Международ. 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 полез. 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 // Зап. Всерос. минералог. о-ва. 1996. 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 // Econ.Geol. 1994. V.89. P.1454-1468.

17. Mc Donough W.F. Constrains of the composition of continental lithospheric mantle // Earth and Planet. Sci. Lett. 1990. V.101. № 1. P.1-18.

18. Styles of Pt mineralizations in Alaskan-type intrusives in the Fifield region, New South Wales, Australia: Abstracts / A.R.Martin, A.R.Keays, S.I.Elliott, B.A.Brill // 6 th Intern. Platinum Symp., 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 // Econ.Geol. 1976. V.71. № 7. P.1229-1243.

#### REFERENCES

1. Bandeira D., Barns S.A. and Higgins M.D. Geochemistry of PGE in Nickel-Bearing Laterites of the Musongati Complex (Burundi) // Abstracts of Papers VII Int. Platinum Symp., 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. 239 p.
3. Volchenko Yu.A., Koroteev V.A., Neustroeva I.N. Platinum metals in ultramafites and chromite ores of alpinotype massifs in the Main Ophiolitic Belt in Urals // Geology of Mineral Deposits. 2009. V.51. № 2. P.182-200.
4. Krupenko I.N. and Astaf'ev V.F. Extraction of Noble Metals as Byproducts during the Processing of Oxidized Nickel Ores // Tsvetn. Metall. 1993. N.7. P.21-23.
5. Lazarenkov V.G., Abramov V.Yu. and Talovina I.V. Nickel-Bearing Weathering Crusts As a Potential Commercial Source of Platinum Group Metals // Platina Rossii (Platinum of Russia), Moscow: Geoinformmark, 1995. V.2, book 1. P.121-125.
6. Lazarenkov V.G., Talovina I.V. Commercial perspective of platinum group elements in supergene nickel ores // Mining magazine. 1997. № 11. P.32-34.
7. Lazarenkov V.G. and Talovina I.V. Geokhimiya elementov platinovoi gruppy (Geochemistry of Platinum Group Elements). Saint Petersburg: Galart, 2001. 266 p.

8. *Maloshag V.P. and Smirnov S.V.* Platinoid Mineralization of the Nuralin Ultramafic Rock–Gabbro Massif (Southern Urals) // Proceedings of the All-Russia Mineral Society. 1996. Part.125. N.1. P.48-54.
9. *Novgorodova M.I.* Noble metals in hydrothermal ores. Moscow: Nauka, 1983. 287 p.
10. *Petrova I.V., Lazarenkov V.G.* Platinum group element and gold content in cobalt-nickel ores of the Serov deposit, Northern Urals // Mat. Ural. Letney miner. shkoly. Yekaterinburg: Izd UGGGA, 1999. P.192-193.
11. *Lazarenkov V.G., Talovina I.V., Beloglazov I.N., Volodin V.I.* Platinum metals in the supergene nickel deposits and prospects for industrial extraction. Saint Petersburg: Nedra, 2006. 188 p.
12. *Greiver T.N., Popkov E.V., Chernov A.I. et al.* Behavior of Noble Metals and Rhenium during the Treatment of Oxidized Nickel Ores and Techniques for Their Commercial Recovery // Tsvetn. Metally. 1994. N.9. P.30-33.
13. *Sakhanbinskii M.N., Lazarenkov V.G. and Kronenberg M.* Distribution of Platinum Group Elements and Gold in the Nickel-Bearing Weathering Crust of the Shklary Chrysoprase Deposit (Poland): Abstracts of Papers // VII Int. Platinum Symp., Moscow: Moskovskii kontakt, 1994. P.98.
14. *Talovina I.V., Lazarenkov V.G., Vorontsova N.I.* Platinum and gold in oxide-silicate nickel ores of the Buruktal and Ufaley deposits, Urals // Lithology and helpful. resources. 2003. № 5. P.474-487.
15. *Talkhammer T.V.* Association of Platinum Group Minerals in Massive Chromite Ores of the Kempirsai Ophiolitic Complex (Southern Urals) as a Manifestation of Mantle Metasomatism // Proceedings of the All-Russia Mineral Society. 1996. N.1. P.25-36.
16. *Augé T., Legendre O.* Platinum-Group Elements Oxides from the Pirogues Ophiolitic Mineralization, New Caledonia: Origin and Significance // Econ.Geol. 1994. V.89. P.1454-1468.
17. *Mc Donough W.F.* Constrains of the composition of continental lithospheric mantle // Earth and Planet. Sci. Lett. 1990. V.101. N.1. P.1-18.
18. *Martin A.R., Keay 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 // 6 th Intern. Platinum Symp. 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 // Econ.Geol. 1976. V.71. N.7. P.1229-1243.