

связаны, располагаются на рис 1 в поле производных окраинно-континентального магматизма, но отличаются от типичных окраинно-континентальных магматических серий существенно более высокими значениями  $\epsilon\text{Nd}$  (+6) и крайне низкими значениями первичных отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (около 0.7030 для Магнитогорского мест). Такие изотопно-геохимические аномалии связаны, по-видимому, с инъекциями рифтогенно-плюмовых магм в окраинно-континентальную надсубдукционную зону.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-05-96006-р-Урал-а, 08-05-00018-а) и программ Президиума РАН и Отделения наук о Земле РАН.

### Литература

*Русин А. И.* Геодинамический цикл С.Н. Иванова и проблема периодизации докембрия // Структурно-вещественные комплексы и проблемы геодинамики фанерозойских орогенов. Материалы международной научной конференции (III Чтения памяти С. Н. Иванова). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2008. С. 120–126.

***Е. С. Назимова***

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
г. Санкт-Петербург  
geny\_shen@mail.ru*

### **Характеристика платиноносности хромититового горизонта UG-2, Восточный Бушвельд, Ю. Африка (научный руководитель В. В. Гавриленко)**

Хромититовый горизонт UG-2 входит в состав Бушвельдского расслоенного массива (ЮАР) и является уникальным и крупнейшим в мире источником металлов платиновой группы. Запасы платиноидов горизонта UG-2 составляют около 30 тыс. т, ресурсы на порядок выше. Содержание элементов платиновой группы (ЭПГ) варьирует от 4.5 до 8 г/т, при среднем – около 5.5 г/т. Основными ЭПГ являются Pt и Pd, причем в Западном секторе Бушвельда преобладает Pd, а в Восточном – Pt.

Работа основана на фактическом материале, собранном во время прохождения производственной практики в 2006 г. в компании Англо Платинум (Anglo Platinum) в ЮАР. В пределах Восточного Бушвельда исследованы два участка: Driekor (скважины Dt43, Bf296, Tw571, Ov69, Wv30) на севере и Der Brochen (скважины Rm86, Rm44, Rm40, Db119, She1) на юге Восточного Бушвельда.

**Целью работы** являлось выявление закономерностей распределения платиноидов в хромититовом горизонте UG-2 Восточного Бушвельда.

В задачи исследования входило:

1. Изучение строения рудного горизонта UG-2 Восточного Бушвельда, его морфологических и петрографических особенностей, а также вмещающих пород.
2. Определение последовательности формирования рудных парагенезисов в хромититовом горизонте UG-2 Восточного Бушвельда.
3. Исследование изменчивости химического состава хромититового горизонта UG-2 в пределах Восточного Бушвельда.

#### **Основные методы исследования:**

1. Геологическая документация горизонта UG-2 в шахтах, обнажениях и буровых скважинах; проведение сопоставительной характеристики горизонта UG-2 в северном и южном секторе Восточного Бушвельда.

2. Изучение прозрачно-полированных шлифов и аншлифов (120 шт.).

3. Микронзондовый анализ рудных минералов (минералов платиновой группы, сульфидов и хромитов) – 53 шайбы. Данные исследования проведены автором на микроанализаторе JEOL JSM-5400 в лаборатории Mineralogical Research Department в Южной Африке.

4. Определение химического состава пород, элементов-примесей в них (Zn, Sr, Ni, Cu, S, Cr) и ЭПГ (125 проб). Образцы для анализов были взяты как из самого хромититового горизонта UG-2, так и из вмещающих его пород (до 2-х м от кровли и подошвы пласта). Размеры образцов, взятых из керна буровых скважин, составляли  $\frac{1}{4}$  керна  $\times$  10 см.

**Краткая геологическая характеристика объекта.** Хромититовый горизонт UG-2 приурочен к Критической зоне Бушвельда, которая делится на нижнюю серию – пироксенитовую, с преобладанием мафических пород, и верхнюю – анортозитовую, с широко развитыми полевошпатовыми разностями. Горизонт UG-2 находится в верхней части Критической зоны между хромитовым горизонтом UG-1, который залегает ниже, и рифом Меренского, находящимся выше. Он прослеживается по простиранию на десятки километров в западной и восточной частях Бушвельдского комплекса, в основании ритмической единицы, сложенной внизу порфиридовидными пироксенитами, бронзититами, меланократовыми габбро-норитами, переходящими кверху в нориты и далее в анортозиты [Налдретт, 2003]. Горизонт залегает ниже рифа Меренского на 30–50 м в северо-западном секторе массива, на 140–180 м в юго-западном секторе и более чем на 400 м – в северо-восточном. Его мощность варьирует от 0.15 до 2.55 м, при падении от 5 до 70° по направлению к центру Бушвельдского комплекса. UG-2 представлен единым горизонтом либо несколькими слоями, разделенными пироксенитовыми прослоями. В последнем случае мощность горизонта достигает 5–7 м.

В подошве хромитита обычно залегает грубозернистый полевошпатовый пироксенит. Порода, образующая хромититовый слой, состоит из 60–90 мод. % хромшпинелидов с интерстиционными плагиоклазом и ортопироксеном. Хромитит перекрывается гарцбургитом или плагиоклазовым пироксенитом, внутри которого представлены 2–4 слойка хромитита мощностью 0.1–12 см [Cawthorn et al., 2002].

**Сравнительная характеристика северного и южного участков Восточного Бушвельда.** По данным полевых наблюдений для юга Восточного Бушвельда характерно наличие пегматоидного полевошпатового пироксенита в подошве хромититового горизонта UG-2, нередко в пределах которого встречаются отдельные хромититовые прослои неправильной формы. Внутри горизонта UG-2, имеющего мощность от 1 до 1.5 м, наблюдаются линзообразные тела более лейкократовых пород (от анортозитов до норитов). Кровлю UG-2 слагает полевошпатовый пироксенит различной степени зернистости, разделённый обычно тремя дополнительными хромититовыми прослоями мощностью от 15 см до 5 мм (рис. 1).

Для севера Восточного Бушвельда характерны следующие взаимоотношения: в подошве хромититового горизонта мощностью 40–70 см обычно залегает пегматоидный полевошпатовый пироксенит, содержащий от 2 до 5 мелких хромитовых прослоев

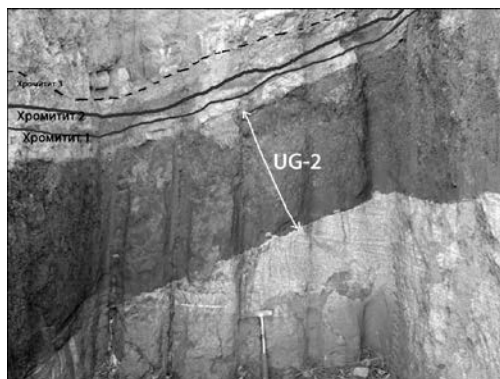


Рис. 1. Геологическое строение хромититового горизонта UG-2 Восточного Бушвельда на примере горной выработки на юге Восточного Бушвельда.

В подошве горизонта UG-2 – пегматоидный полевошпатовый пироксенит, в кровле – чередования мелко-среднезернистого и пегматоидного полевошпатового пироксенита, разделенного тремя дополнительными хромититовыми прослоями (хромитит-1, хромитит-2, хромитит-3).

мощностью 1–10 мм, находящихся на расстоянии до 30 см от основного горизонта UG-2. Кровлю горизонта представляет либо мелкозернистый полевошпатовый пироксенит, либо его чередование с анортзитовыми прослоями мощностью 1–4 см. Здесь же наблюдаются от 1 до 3 более мелких хромитовых прослоев мощностью 1–4 мм.

Основными платиноидами обеих частей Восточного Бушвельда явились сульфиды платины и палладия: куперит (PtS) и бреггит ((Pt,Pd)S). Также встречены отдельные зерна лаурита (RuS<sub>2</sub>), тетраферроплатины (PtFe), сперрилита (PtAs<sub>2</sub>), мончеита (Pt,Pd)(Te,Bi)<sub>2</sub>, винцентита (Pd,Pt)<sub>3</sub>(As,Sb,Te), ирарсита (Ir,Ru,Rh,Pt)AsS, плюмбопалладинита (Pd<sub>3</sub>Pb<sub>2</sub>). В южных частях Восточного Бушвельда встречена самородная платина. Размеры зерен минералов платиновой группы не превышают 10 мкм. Платиноидная минерализация тесно связана с сульфидной, при этом четкой взаимосвязи минеральных составов платиноидов и сульфидов не наблюдается. Платиноиды находятся внутри сульфидных агрегатов, занимающих пространство между зернами хромита.

Лейкократовые прослои, находящиеся в пределах хромититового горизонта UG-2, могут содержать в себе значительное количество сульфидов, но при этом для них не характерны проявления платиновой минерализации (табл.).

Хромшпинелиды северной части Восточного сектора Бушвельда отличаются повышенными содержаниями элементов Mg, Al и пониженными содержаниями Fe<sup>2+</sup>, Ti, Fe<sup>3+</sup>, Cr. Для северной части сектора по данным химического анализа пород наблюдается преобладание Pd над Pt, причем доля палладиевой составляющей увеличивается с увеличением доли сульфидов.

На диаграмме значений факторов, построенной по результатам микрозондового анализа хромитов, выделяются следующие закономерности: хромиты северной части Восточного сектора Бушвельда отличаются повышенными содержаниями элементов Mg, Al и пониженными содержаниями Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Ti. Для северной части сектора по данным химического анализа пород наблюдается преобладание Pd над Pt, причем доля палладиевой составляющей увеличивается с увеличением доли сульфидов. Для южной же части, напротив, характерно наличие хромитов с пониженными содержаниями Mg, Al и повышенными Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Ti. Здесь преобладающим ЭПГ является Pt. Таким образом, можно сделать вывод о том, что проявления платиновой

Т а б л и ц а

**Данные химического анализа хромшпинелидов, сульфидов и минералов содержащих ЭПГ для юга (Rm86, Rm40)  
и севера (Dt43, Wv30) Восточного Бушвельда**

№ скв.	п	Типы пород	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu	Ni	S	Ir	Os	Pd	Pt	Rh	Ru
			мас. %									г/т			мг/т			
Rm86	1	1	15.31	16.77	14.21	8.52	0.25	7.90	30.80	2.3	587.5	199.8	493.0	253.0	2056.0	7143.0	1652.0	1755.0
	3	2	53.12	9.51	1.08	8.73	0.19	20.03	0.79	24.0	754.7	362.4	5.2	3.5	32.7	40.0	10.7	28.3
	9	3	15.05	16.31	13.52	8.11	0.25	8.93	32.16	223.8	1352.2	1552.5	234.9	138.4	2785.4	3205.2	633.2	1019.2
	21	5	53.45	5.50	1.27	10.29	0.23	22.55	1.12	33.8	604.0	348.3	2.8	2.0	17.3	43.3	7.7	19.4
	1	6	17.03	13.03	15.56	9.33	0.31	10.34	30.18	11.7	946.3	230.8	110.0	70.0	417.0	1131.0	268.0	556.0
	2	7	15.84	16.27	8.21	13.86	0.27	9.24	30.26	55.4	1027.7	276.8	159.0	91.5	572.5	1888.0	363.0	711.0
	1	8	54.03	3.92	1.36	10.99	0.24	24.62	0.47	80.4	861.0	314.0	3.0	0.5	543.0	230.0	19.0	14.0
	4	9	53.75	5.54	1.29	10.42	0.23	22.00	0.64	47.3	648.5	711.8	27.3	11.5	230.5	813.3	53.0	82.8
Rm40	1	1	51.62	4.13	1.31	10.58	0.22	26.16	0.89	9.3	1024.6	73.7	7.0	3.0	116.0	54.0	19.0	21.0
	2	2	44.91	7.43	1.49	12.03	0.17	29.09	0.55	6.5	2035.7	61.7	8.0	3.0	21.0	68.5	27.0	24.5
	9	3	18.57	17.09	12.77	7.66	0.24	9.10	28.41	45.0	965.2	228.9	212.1	120.2	1279.8	2609.4	482.0	922.3
	1	4	51.90	16.06	0.73	5.92	0.14	14.89	0.27	35.2	450.5	157.2	0.1	0.1	125.0	40.0	3.0	7.0
	2	5	52.01	8.29	1.14	9.24	0.21	20.68	1.39	19.2	541.6	109.5	6.0	3.5	26.0	120.5	21.0	28.5
	2	7	14.43	15.27	13.69	8.21	0.27	9.18	32.64	57.0	1007.6	320.2	162.5	88.0	397.0	1988.0	385.5	723.0
	1	8	54.44	4.92	1.31	10.58	0.24	23.61	0.49	94.5	856.0	1239.1	4.0	3.0	220.0	396.0	20.0	13.0
	2	9	53.44	5.10	1.36	10.96	0.25	22.58	0.55	66.2	673.0	546.3	25.5	10.5	210.5	803.5	52.5	75.0
Dt43	3	2	50.87	3.76	1.47	11.89	0.25	25.82	0.77	117.6	1480.4	1576.9	6.5	2.5	805.7	140.7	29.3	19.3
	3	3	8.38	14.79	16.13	9.68	0.31	9.21	37.68	892.0	2117.9	2944.7	246.3	145.7	3558.0	3180.0	660.0	1090.7
	4	5	52.59	11.21	1.01	8.18	0.18	18.42	0.54	33.3	532.7	567.6	1.6	1.4	42.5	40.5	6.5	10.3
Wv30	1	2	48.59	5.95	1.36	10.98	0.19	22.03	4.66	105.3	851.9	761.4	85.0	38.0	383.0	935.0	242.0	270.0
	4	3	6.41	15.40	15.33	9.20	0.29	8.67	40.32	204.8	1467.5	1566.6	321.5	204.0	2929.3	3897.8	818.0	1381.5
	4	5	53.18	9.95	1.00	8.06	0.19	19.91	0.28	141.6	737.2	760.8	0.5	0.5	5.3	8.8	0.9	2.4

П р и м е ч а н и е : указан средний химический состав пород по п количеству образцов.

Типы пород: 1 – хромититовый прослой в подошве горизонта UG-2; 2 – пегматоидный полевошпатовый пироксенит; 3 – хромититовый горизонт UG-2; 4 – прослой лейкократовых пород (от анортзитов до норитов) внутри горизонта UG-2; породы кровли: 5 – мелкозернистый полевошпатовый пироксенит, 6 – 1-й хромититовый прослой, 7 – 2-й хромититовый прослой, 8 – пегматоидный полевошпатовый пироксенит, 9 – крупнозернистый полевошпатовый пироксенит.

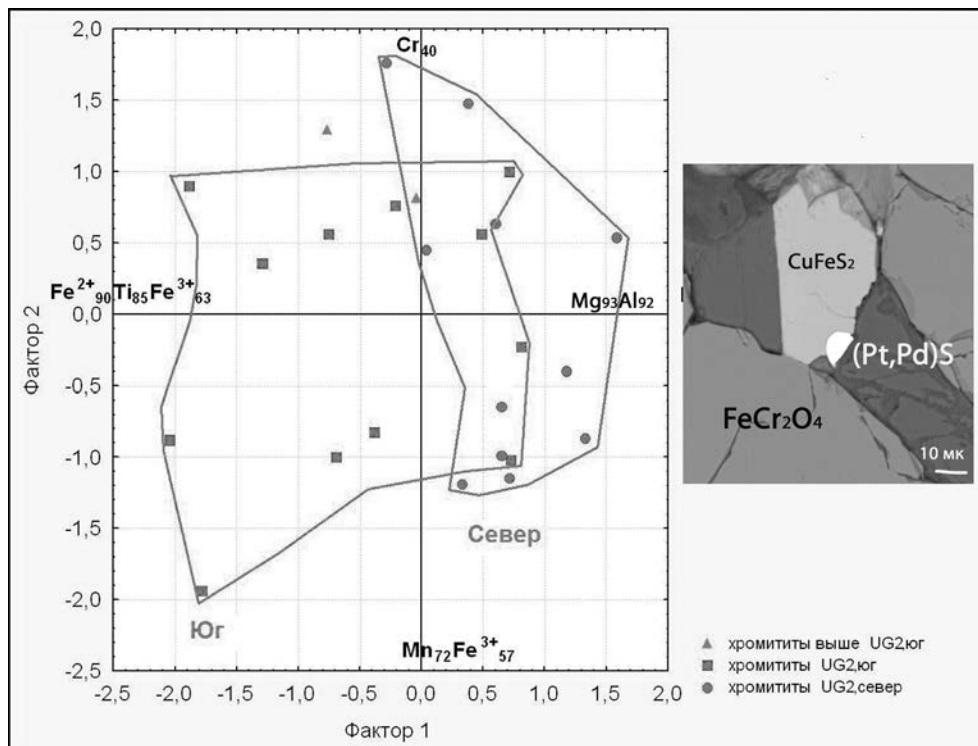


Рис. 2. Диаграмма значений 1-го и 2-го факторов для химических составов хромитов (по данным микрондового анализа хромитов, при  $n = 25$ ,  $r_{0,95} = 0.38$ ).

специализации ассоциируют с хромшпинелидами, обогащенными хромитовым миналом, а проявления палладиевой специализации связаны с хромшпинелидами, обогащенными шпинелевым миналом (рис. 2).

По результатам петрографических исследований можно сделать предположение о следующем порядке кристаллизации минералов: хромшпинелид  $\rightarrow$  оливин  $\rightarrow$  (оливин + хромшпинелид)  $\rightarrow$  ортопироксен  $\rightarrow$  клинопироксен  $\rightarrow$  биотит  $\rightarrow$  плагиоклаз. В лейкократовых прослоях внутри хромититового горизонта характерно наличие кумулюсного плагиоклаза относительно ортопироксена, тогда как в самом горизонте UG-2 плагиоклаз чаще заполняет интерстиции между зернами ортопироксена. Во всех хромититовых прослоях встречены значительные количества магматической слюды, в основном, биотита.

**Основные выводы.** Таким образом, в результате проведенных исследований выявлены различия в строении рудного горизонта UG-2 и составе вмещающих его пород в северных и южных частях Восточного Бушвельда.

Платиноиды приурочены к местам развития хромититовых прослоев и находятся внутри сульфидных агрегатов, занимающих пространство между зернами хромшпинелидов. Сульфиды представлены пентландитом, халькопиритом, пиритом и проявлены как внутри горизонта UG-2, так и во вмещающих его породах. Выявлено 10 минеральных разновидностей, содержащих ЭПГ, главными из которых являются куперит (PtS) и бреггит (Pt,Pd)S.

Установлена различная геохимическая специализация ЭПГ хромитов в северной и южной частях Восточного Бушвельда. Для севера характерна палладиевая составляющая в хромититах, причем ее доля возрастает с увеличением доли сульфидов. Для юга характерна платиновая специализация, и она непосредственно связана с наиболее хромитовой составляющей хромшпинелидов.

### Литература

*Надретт А. Дж.* Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых платинометалльных руд. СПб.: СПбГУ, 2003. 487 с.

*Cawthorn R. G.* The role of magma mixing in the genesis of PGE mineralisation in the Bushveld Complex. Thermodynamic calculations and new interpretations – a discussion // *Economic Geology*, 2002. Vol. 97. P. 663–666.

*Д. Е. Савельев, Е. А. Бажин, В. И. Сначев*  
*Институт геологии УНЦ РАН, г.Уфа*  
*savl71@mail.ru*

### Петрографические признаки тектонического течения при образовании хромитовых руд

В пределах Уральского складчатого пояса чрезвычайно широким распространением пользуются ультрабазиты офиолитовой ассоциации. В отечественной литературе они также часто называются «альпинотипными гипербазитами» (Б. В. Перевозчиков, Д. С. Штейнберг, К. К. Золоев, И. С. Чашухин и др.), ранее их выделяли в «гипербазитовую» (Ю. А. Кузнецов) и «дунит-гарцбургитовую» формации (С. В. Москалева, Н. В. Павлов, Г. А. Соколов, И. И. Эдельштейн и др.).

Происхождение хромитовых месторождений, связанных с альпинотипными гипербазитами, до настоящего времени является предметом дискуссии. Неполный перечень существующих гипотез включает магматическую (А. Г. Бетехтин, Г. А. Соколов, Н. В. Павлов, А. А. Маракушев и др.), метасоматическую (С. В. Москалева, А. Б. Макеев и др.), реакционно-магматическую (F. Melcher, M.-F. Zhou, P. T. Robinson и др.), метаморфическую (W. P. Roever, F. Rost, В. И. Маегов и др.), реститовую (Б. В. Перевозчиков). Ряд исследователей предполагает полигенность различных типов месторождений (И. С. Чашухин, И. Е. Кузнецов, И. А. Малахов, А. В. Алексеев и др.).

Проведенный анализ состояния проблемы генезиса хромитов альпинотипной ассоциации показал, что, несмотря на высокую степень изученности вопроса и огромное количество фактического материала, исследователи так и не пришли к единому мнению относительно главного механизма, приводящего к образованию рассматриваемых месторождений. Более того, число альтернативных точек зрения не уменьшилось, а с увеличением фактического материала, даже возросло.

Разнообразие точек зрения по данной проблеме не случайно. Объект исследования чрезвычайно сложен хотя бы по той причине, что прежде выведения на современный эрозионный срез, массивы альпинотипных гипербазитов прошли многоэтапную эволюцию на уровне верхней мантии и различных уровнях коры. В одном случае