

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

УДК 549.5:54.055

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18>

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ШЛАКОВ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА

Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В.

Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): Уральский регион уже более 300 лет является металлургическим центром России, и за столь продолжительный временной период здесь накопилось большое количество техногенных отходов (шлаков). Изучение вещественного состава шлаков является актуальной задачей, т.к. прежде чем их утилизировать, надо понять, с каким минеральным составом мы имеем дело. Многие шлаки представляют собой потенциальную руду, которую можно дополнительно переработать, некоторые являются техногенными огнеупорами и т.д. При этом шлаки медеплавильных производств наносят тяжелый урон окружающей экологии, т.к. они всегда содержат сульфидную составляющую, которая под действием атмосферных вод достаточно легко разлагается на серную кислоту и тяжелые металлы. **Цель работы:** изучение вещественного (минерального) состава черных шлаков Карабашского медеплавильного завода, складированных еще в советское время. **Используемые методы:** химический состав порообразующих и рудных минералов установлен с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков черных шлаков. **Новизна:** изучение вещественного состава шлаков проводилось с точки зрения классической минералогии и с использованием современной обязательной номенклатуры Международной минералогической ассоциации. **Результат:** авторами вполне детально изучена минералогия черных шлаков Карабашского медеплавильного завода. Установлено, что они сложены пиконит-оливиновым агрегатом с присутствием значительного количества стекла и редкой вкрапленности хромита, вюститита и различных сульфидных фаз. Они являются продуктами медеплавильного производства из советского периода, т.е. получены в шахтной печи в результате полупиритной окислительной плавки колчеданной руды. Температура образования данных шлаков определена по эвтектической (одновременной) кристаллизации вюститита с фаялитом и примерно равна 1170°C. **Практическая значимость:** полученные данные показывают резкое отличие черных шлаков Карабашского завода советского периода от современных шлаков этого же завода. Изученные нами шлаки можно пускать в дополнительную переработку, т.к. они содержат сульфиды и хромит.

Ключевые слова: пиконит, оливин, хромит, сульфиды, минералогия, шлаки, Карабашский медеплавильный завод.

Введение

В Кыштымском районе, в том числе и в пределах будущего города Карабаш, постоянно проходила интенсивная добыча медно-колчеданных руд и золота. Так получилось, что в долине г. Карабаш в разное время существовало аж три медеплавильных заводов. Первый проработал всего 5 лет – с 1837 по 1842 гг., второй завод был построен в 1907 году Англо-Сибирской компанией во главе с Л.А. Урквартом, по всей видимости, как временный, т.к. совсем скоро, в 1910 году, у Золотой горы был запущен именно тот завод, кото-

рый мы все знаем. Летом 1909 года производительность Карабашского завода достигла пяти тысяч тонн меди в год [1]. К 1915 году завод уже был в числе ведущих в России по уровню технической оснащённости и объёмам производства. В годы Гражданской войны предприятие простаивало, и при Советской власти первую плавку меди провели в 1925 году. В 1989 г. завод из-за экологических проблем был остановлен и вновь запущен только в 1998 году. Ныне предприятие под названием АО «Карабашмедь» входит в крупный холдинг АО «Русская медная компания» и в настоящее время перерабатывает медный концентрат с колчеданных месторождений России и Ка-

© Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В., 2019

захстана. К сожалению, никаких данных по минеральному составу шлаков на сайте АО «Карабашмедь» не приведено, только упоминается, что они перерабатываются. По всей видимости, переработка заключается в дополнительном извлечении меди и последующем использовании полученного вторичного шлака в строительстве. По данным некоторых опубликованных источников [2–4], все шлаки Карабашского медеплавильного завода относятся к фаялитовым образованиям с небольшим количеством сульфидов (борнита, халькопирита), виллемита, вюстита, магнетита, ганита и меди, а также необычных соединений типа CaFe_2O_7 и $\text{CaFe}_7\text{O}_{11}$. Учитывая противоречивость приведенных данных, мы также решили изучить минералогию черных шлаков, производимых на Карабашском медеплавильном заводе.

Отбор образцов шлака и методы исследования

Шлаки Карабашского завода являются основным техногенным мусором в окрестностях города, практически вся северная окраина и центральная часть населенного пункта занята отвальными массами предприятия. Высота отвалов достигает 30–40 м, а площадь их отсыпки составляет несколько квадратных километров. Доступ к северным отвалам вполне открытый (они вплотную подступают к междугородней трассе Карабаш – Кыштым), т.к. их там складировали для заполнения подземных шахтных выработок, оставшихся после отработки медноколчеданной залежи. Этот северный отвал длинным языком тянется на 2 км вдоль шоссе, поэтому отбор проб для изучения не составил труда. Эти отвалы один из авторов статьи видел еще в 1995 году, поэтому очевидно, что они сформировались в советский период жизнедеятельности завода. Для исследования была собрана коллекция шлаков разной зернистости и стекловатости. Их окраска в основном черная до темно-серой с ксенолитами белой и серой породы, а также кусочков кварца. Образцы абсолютно немагнитные, что нас весьма удивило, т.к. фаялитовые шлаки СУМЗа [5] или Мариинского завода [6], наоборот, отличались сильной магнитностью. Размер изученных образцов не превышает 10 см, хотя мы и старались найти более крупные куски шлака; при этом сами отвалы сложены еще более мелкими фрагментами образцов. Данные образцы и были изучены на предмет минерального состава.

Химический состав породообразующих и рудных минералов определен с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой

INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик Л.В. Леонова). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков черных шлаков.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате исследований оказалось, что отобранные нами шлаки сложены преимущественно оливин-пироксеновым агрегатом с значительным содержанием стекла и постоянным присутствием хромита, вюстита и разных сульфидов систем Cu-Fe-S и Pb-Ni-S . Химический состав шлака следующий (в мас.%): SO_3 – 0,27; SiO_2 – 44,91; TiO_2 – 0,32; Cr_2O_3 – 0,40; Al_2O_3 – 8,15; $\text{FeO}_{\text{общ}}$ – 22,97; MgO – 12,89; MnO – 0,21; CuO – 0,36; ZnO – 0,25; BaO – 0,13; CaO – 8,05; K_2O – 0,77; Na_2O – 0,13. Σ 99,91. Он получен методом сканирования с поверхности всего полированного шлифа.

Пижонит является одним из главных породообразующих минералов зернистого черного шлака, и его содержание в зависимости от присутствия стекла и оливина варьирует от 20 до 40 об.% породы. Минерал образует короткопризматические и ромбовидные индивиды (рис. 1), размером до 0,1–0,2 мм. Минерал имеет переменный химический состав и определяется как пижонит (табл. 1). Пироксен содержит примеси Al_2O_3 (до 3,8 мас.%), Cr_2O_3 (до 0,7 мас.%), TiO_2 (до 0,4 мас.%), а также ZnO (до 0,9 мас.%). Содержание кальция в минерале варьирует очень значительно, от 5,5 до 11,3 мас.% CaO . Интересно, что наиболее кальциевый пижонит имеет состав $\text{En}_{48}\text{Wo}_{24}\text{Fs}_{27}$ и на диаграмме пироксенов располагается рядом с полем авгита. По данным кристаллохимического подсчета, пижонит является магниальным, хотя и достаточно высокожелезистым. В кристаллах пироксена достаточно четко проявлена химическая зональность, центральные и промежуточные зоны более магниальные, чем края индивидов. В природе пижонит – типичный минерал вулканических пород (особенно основного и ультраосновного состава), а также метеоритов [7].

Оливин в черном шлаке представлен как очень крупными игольчатыми кристаллами, размером до 1–2 мм, так и более мелкими, до 0,2–0,3 мм, короткопризматическими индивидами. Все кристаллы скелетные и зачастую футляровидные, крупные индивиды образуют структуру спинифекс, мелкие просто рассеяны по всей матрице породы. Содержание оливина в шлаке варьирует от 20–40 об.%. Кристаллы оливина ха-

рактируются резкой химической зональностью и сложены как форстеритом, так и фаялитом, что хорошо видно на BSE-снимках, где кайма индивидов более светлая (рис. 2–3).

Форстерит составляет основную массу скелетных кристаллов оливина, где занимает центральную и промежуточную часть индивидов. Форстерит относится к железистой разновидности (табл. 2, ан. 1–4). Минерал содержит примеси CaO (до 1,0 мас.%) и ZnO (до 1,8 мас.%). По данным пересчета, оливин изменяется от хризолита до гиалосидерита, т.к. содержит минал фаялита в пределах 26–43%. В природе железистый форстерит является типичным минералом вулканических пород [8 и др.].

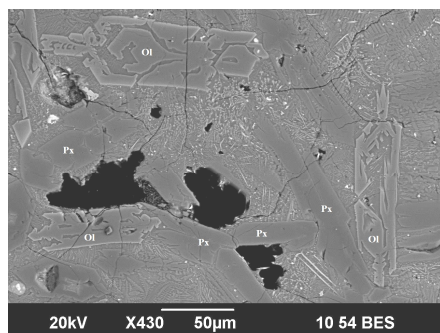


Рис. 1. Общий вид шлака Карабашского завода с кристаллами пиконита (Px) и оливина (Ol). BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

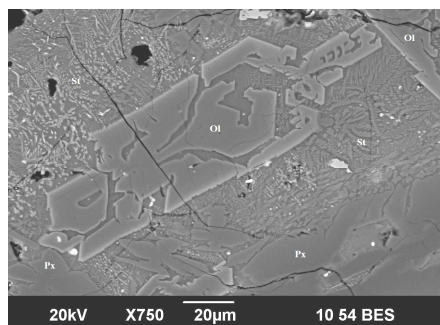


Рис. 2. Стекло (St) в интерстициях кристаллов пиконита (Px) и оливина (Ol) в матрице черного шлака. BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Фаялит в скелетных кристаллах оливина образует тонкие каймы мощностью до 10–20 мкм.

Никаких минеральных включений фаялит не содержит. Минерал достаточно уверенно относится к магнезиальному фаялиту (см. табл. 2, ан. 5–8). Он содержит примеси кальция (CaO до 1,3 мас.%), ZnO (до 2,6 мас.%), Al_2O_3 (до 2,2 мас.%) и K_2O (до 0,3 мас.%). По данным пересчета, оливин изменяется от гортонолита до феррогортонолита, т.к. содержит минал форстерита от 21 до 46%, т.е. в фаялите рассчитываются миналы форстерита (до 46%), виллемита (до 3%) и кирштейнита (до 2%). Интересно, что в медеплавильных шлаках СУМЗа фаялит содержит до 4% ZnO [5], а в никелевых шлаках Режевского завода имеет повышенный кальций, до 3% CaO [9].

Таблица 1

Химический состав пиконита из шлака Карабашского завода, % (масс)

№	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	ZnO	MgO	CaO	Сумма
1	54,22	–	0,66	1,37	15,05	0,82	22,43	5,45	100
2	53,56	–	0,67	1,77	15,77	0,67	21,63	5,92	100
3	53,55	–	–	2,35	18,72	0,72	18,32	6,33	100
4	52,69	–	0,55	2,01	17,24	0,94	19,56	7,02	100
5	53,37	–	0,75	2,15	15,36	0,56	20,36	7,46	100
6	50,57	0,36	0,53	3,76	16,20	0,66	16,60	11,32	100

Примечание. Здесь и далее анализы сделаны на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV с ЭДС-приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 (ИГТ УрО РАН, аналитик Л.В. Леонова).

Таблица 2

Химический состав оливина в шлаках Карабашского завода, % (масс)

№	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	ZnO	MgO	CaO	K ₂ O	Сумма
форстерит								
1	39,33	–	23,79	1,03	35,22	0,63	–	100
2	38,61	–	26,36	1,14	33,47	0,42	–	100
3	38,32	–	30,10	1,19	29,44	0,95	–	100
4	37,30	–	35,94	1,77	24,28	0,69	–	100
фаялит								
5	37,16	–	38,84	1,49	21,32	0,96	0,23	100
6	35,54	–	44,68	1,76	17,16	0,86	–	100
7	34,60	–	47,30	1,97	15,35	0,77	–	100
8	33,05	2,20	51,58	2,58	9,00	1,26	0,33	100

В целом химический состав природных оливинов достаточно хорошо изучен, и они обычно содержат не более 1–2% CaO [10], хотя в одном из хондритов был установлен необычный оливин с повышенным CaO и Al_2O_3 [11]. Таким образом, оливин из Карабашских шлаков имеет свой характерный типоморфный признак в виде постоянной обогащенности кальцием и цинком.

Стекло в черных шлаках Карабашского завода имеет разную окраску – от серого и коричневого до черного цвета и состоит на 100% стекловатые разновидности шлаков, а в раскристаллизованных участках породы его содержание сильно варьирует – от 30 до 50 об.%. При этом стекло в интерстициях между кристаллами породообразующих минералов частично раскристаллизовано и содержит мелкие дендритовидные или скелетные индивиды, размером от 1 до 10 мкм, пижонита и фаялита (см. рис. 2). Причем местами преобладают микрокристаллы либо пироксена, либо оливина. Интересно, что между микрокристаллами двух минералов стекло не чистое, а содержит еще более мелкие скелетные наноиндивиды, размером менее 1 мкм, какого-то минерала. Стекло отличается переменчивым химическим составом и характеризуется присутствием заметных количеств K, Ba, Zn и S (табл. 3). Стекло содержит включения кварца (ксеногенного), хромита, вюстита и шарика сульфидов.

Хромит составляет слабую аксессуарную вкрапленность в черных шлаках, содержанием до 1–2 об.%. Образует скопления относительно крупных ксеноморфных зерен (см. рис. 3) размером до 0,2 мм и хорошо образованных кристаллов размером до 10 мкм. Идиоморфные индивиды тяготеют к сульфидным шарикам. Минерал отличается разнородностью состава и относится к хромиту (табл. 4). Крупные ксеноморфные зерна хромшпинелида (табл. 4, ан. 1–3) имеют состав – хромит (42%), магнезиохромит (35%), цинкохромит (13%) и магнетит (10%). Идиоморфные кри-

сталлики (табл. 4, ан. 4–5) имеют другой состав – хромит (52%), магнезиоферрит (23%), магнезиохромит (10%), ганит (10%) и шпинель (5%). В хромшпинелиде постоянно присутствуют примеси ванадия и кальция. В целом хромит является обычным минералом ультраосновных пород и связанных с ними хромититах [12]. В магматической среде хромшпинелид встречается в базальтоидах, а также является обычным минералом метеоритов [13]. В шлаках уральских заводов хромит был установлен в отходах Марининского передельного завода [6] и Режевского никелевого завода [9].

Вюстит достаточно редок в изученном шлаке, до 0,5 об.%, и встречается внутри сульфидных шариков или на их периферии. Размер индивидов не превышает 20–25 мкм, и они имеют изометричный облик. Оксид железа не содержит примесей. Вюстит является редким природным минералом, но в техногенных образованиях он встречается достаточно часто. Например, он отмечался в отвалах Челябинского угольного бассейна [14]. Включения вюстита находили в шлаках древних железоделательных производств на территории Европы [15] и Казахстана [16], а мы его описывали в шлаках Марининского завода [6]. Исходя из общедоступных энциклопедических литературных источников, эвтектическая (одновременная) кристаллизация вюстита с фаялитом, который также встречается в данном шлаке, происходит при 1170°C и, по всей видимости, именно при этой температуре и формировались изученные нами черные шлаки.

Таблица 3

Химический состав стекла в шлаках
Карабашского завода, % (масс)

№	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	CuO	ZnO	BaO	CaO	K ₂ O	Сумма
1	0,55	50,41	-	8,37	9,11	16,21	-	1,05	1,21	12,04	1,05	100
2	0,67	51,19	0,30	7,88	9,58	16,03	-	1,07	0,93	11,31	1,04	100
3	-	51,39	-	8,32	5,56	18,11	0,46	2,18	1,27	11,62	1,10	100
4	1,47	48,64	0,59	15,84	-	19,77	-	2,31	2,31	5,91	3,15	100
5	1,61	48,15	-	12,15	-	23,56	-	2,48	2,55	7,16	2,34	100

Таблица 4

Химический состав хромшпинелида в шлаках Карабашского завода, % (масс)

№	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	ZnO	MgO	CaO	Сумма
1	1,20	0,71	0,86	64,22	-	5,01	18,18	4,82	5,60	0,57	101,17
2	1,18	0,74	0,94	63,85	-	5,21	17,45	4,82	6,03	0,48	100,70
3	0,95	0,74	1,03	62,32	-	7,15	15,94	4,86	6,63	0,49	100,11
4	-	0,49	-	46,13	8,04	18,41	15,93	3,88	7,69	0,29	100,85
5	-	0,48	-	45,89	7,79	18,03	16,17	3,86	7,35	0,21	99,78

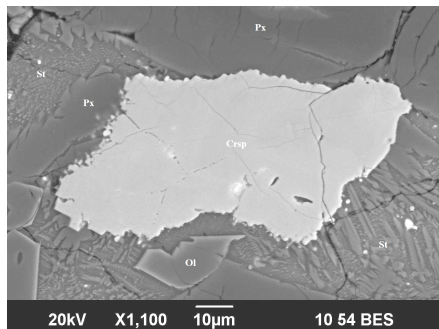


Рис. 3. Зерно хромшпинелида (Crsp) в агрегате стекла (St) в окружении кристаллов пикжонита (Px) и оливины (Ol) в матрице черного шлака BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

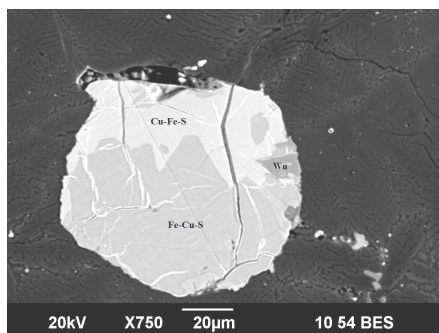


Рис. 4. Сульфидный шарик, состоящий из двух сульфидов и включения вюститита (Wu), в агрегате стекла в матрице черного шлака. BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Сульфиды в шлаке в основном сконцентрированы в стекловатой массе, где слагают округлые, по всей видимости, расплавленные включения, размером до 100-150 мкм, не более 5 об.%. Они обычно сложены двумя минеральными фазами (см. рис. 4), хотя иногда бывают и более сложные срастания из трех и более фаз сульфидов. Все сульфидные шарики сложены сульфидами из системы Cu-Fe-S, причем преобладают две фазы с составами (в мас.%): S – 43; Fe – 13,5; Cu – 43,5 и S – 50,5; Fe – 29,5; Cu – 19. Это наглядно видно на рис. 5, где верхняя часть шарика сложена более светлой медистой фазой, а нижняя часть – более железистым сульфидом (темное). Природных соединений с таким составом пока не обнаружено, а

вот «расплавные твердые растворы» системы $\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_{2+y}\text{S}_{2-z}$ в экспериментальных исследованиях освещены достаточно широко в диапазоне температур от 1012 до 325°C [17 и др.]. Есть сульфидные шарики, сложенные одной медистой фазой (в мас.%), – от S – 35,5; Fe – 5; Cu – 59,5 до S – 33,5; Fe – 1,5; Cu – 65, последняя фаза соответствует ковеллину, низкотемпературному сульфиду. Вероятно, это высокотемпературный аналог ковеллина, который в природе пока не обнаружен.

В некоторых сульфидных шариках отмечается тонкая вкрапленность или мелкие кубические кристаллики, размером до 3–5 мкм. Эта фаза резко выделяется своей яркой окраской на BSE-снимках и характеризуется другим химизмом (в мас.%): S – 22; Fe – 4,5; Pb – 47; Ni – 25; Zn – 1,5. Природных соединений с таким составом пока не обнаружено. В целом, сульфидная минерализация шлаков Карабашского завода отличается необычным минеральным составом и требует пристального изучения, а сами шлаки можно пускать в дополнительную переработку с извлечением сульфидов.

Заключение

При изучении черных шлаков Карабашского медеплавильного завода мы установили, что описанная нами техногенная минералогия совсем не соотносится с опубликованными данными других исследователей [2–4]. Такое противоречие, на наш взгляд, возникло в результате изучения разных шлаковых отвалов. Мы отбирали пробы в еще советском отвале, который расположен на северной окраине города и на большом расстоянии от завода. Где отбирали пробы наши коллеги из их статей – не совсем понятно, и хотя результаты их исследований достаточно сильно различаются между собой, в одном они сходятся, что изученные ими шлаки являются фаялитовыми образованиями. Судя по недавним годам публикаций, можно предположить, что наши коллеги отбирали шлаковый материал в современных вывалах в непосредственной близости от самого завода.

Таким образом, авторами изучена минералогия черных шлаков Карабашского завода. Установлено, что они сложены пикжонит-оливиновым агрегатом с присутствием стекла и редкой вкрапленности хромита, вюститита и различных сульфидных фаз. Они являются продуктами медеплавильного производства из советского периода, т.е. получены в шахтной печи в результате полупиритной окислительной плавки. Температура образования данных шлаков определена по эвтектической (одновременной) кристаллизации вюститита с фаялитом и примерно равна 1170°C.

Список литературы

1. Немцев М.С. Риддерская концессия Лесли Уркварта. Риддер: Терра, 2008. 170 с.
2. Глубокая переработка отходов металлургического производства / Башлыкова Т.В., Пахомова Г.А., Живаева А.Б., Калинин Л.С. // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: материалы 5-й междунар. науч.-техн. конференции. Красноярск: ИЦМиЗ СФУ, 2007. Вып. 5. С. 163–166.
3. Фазовые превращения при окислительном обжиге шлака сульфидной медной плавки / А.А. Лыкасов, А.Н. Матонин, И.Г. Вертий и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2012. Вып. 18. № 15. С. 97–99.
4. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков / И.В. Шадрюнова, Е.Г. Ожогина, Е.В. Колодежная и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 180–190.
5. Ерохин Ю.В., Козлов П.С. Фаялит из шлаков Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда) // Минералогия техногенеза – 2010. Миасс: ИМин УрО РАН, 2010. С. 32–40.
6. Козлов П.С., Ерохин Ю.В., Козлова И.В. Фаялитовые шлаки Маринского передельного завода // Минералогия техногенеза – 2011. Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. С. 39–50.
7. Rubin A.E. An American on Paris: Extent of aqueous alteration of a CM chondrite and the petrography of its refractory and amoeboid olivine inclusions // Meteoritics & Planetary Science. 2015. V. 50. P. 1595–1612. doi:10.1111/maps.12482
8. Wen D.-P., Wang Y.-F., Zhang J.-F., Jin Z.-M. Anisotropic growth of olivine during crystallization in basalts from Hawaii: Implications for olivine fabric development // American Mineralogist. 2018. V. 103. P. 735–741. doi:10.2138/am-2018-6174
9. Ерохин Ю.В. Минералогия шлаков Режевского никелевого завода // Минералогия техногенеза – 2012. Миасс: ИМин УрО РАН, 2012. С. 50–64.
10. Simkin T., Smith J.V. Minor-element distribution in olivine // Journal of Geology. 1970. V. 78. P. 304–325.
11. Dodd R.T. Calc-aluminous inlets in olivine of the Sharps chondrite // Mineralogical Magazine. 1971. V. 38. P. 451–458.
12. Castro A.I.L., Proenza J.A., Zaccarini F., Garuti G., Sarlabous M.S.C.P. Al- and Cr-rich chromitites from the Eastern Havana-Matanzas ophiolites (Western Cuba) // Episodes. 2015. V. 38. P. 334–343. doi:10.18814/epiugs/2015/v38i4/82429
13. Erokhin Yu.V., Koroteev V.A., Khiller V.V., Ivanov K.S., Kleimenov D.A. The Severny Kolchik meteorite: new data on mineralogy // Doklady Earth Sciences. 2018. Vol. 482. Part 1. P. 1189–1192. doi:10.1134/S1028334X18090118
14. Чесноков Б.В., Щербакова Е.П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 152 с.
15. Buchwald V.F. Iron and steel in ancient times. Copenhagen: Royal Danish academy of sciences and letters. 2005. 372 p.
16. Artemyev D.A., Ankushev M.N., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. Mineralogy and origin of slags from the 6th kurgan of the Taksay 1 Burial complex, Western Kazakhstan // Canadian Mineralogist. 2018. V. 56. № 6. P. 883–904. doi:10.3749/canmin.1800025
17. Kosyakov V.I., Sinyakova E.F. Melt crystallization of CuFe₂S₃ in the Cu-Fe-S system // Journal Thermal Analysis Calorimetry. 2014. V. 115. P. 511–516. doi:10.1007/s10973-013-3206-0

Поступила 16.05.19

Принята в печать 24.06.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18>

MATERIAL COMPOSITION OF KARABASH COPPER SMELTER SLAGS

Yury V. Erokhin – Cand.Sci. (Geology & Mineralogy), Lead Researcher

Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: erokhin-yu@yandex.ru

Anatoly V. Zakharov – Research Fellow

Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: zakharov-zav@yandex.ru

Lyubov V. Leonova – Cand.Sci. (Geology & Mineralogy), Senior Researcher

Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia. E-mail: lvleonoa@yandex.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): For over 300 years, the Ural region has been the metallurgical center of Russia, and over such a long period has accumulated a lot of man-made waste (i.e. slag). Understanding the material composition of slag poses an important problem, because before slags can be disposed of it is necessary to know their mineral composition. Many slags can potentially be used as ores suitable for further processing; some slags are man-made refractories, etc. At the same time, slags produced by copper smelters heavily affect the environment because they always contain sulphides, which, being exposed atmospheric waters, can easily decompose into sulfuric acid and heavy metals. **Objectives:** To understand the material (mineral) composition of the black slags of Karabash Copper Smelter that were produced and stored back in the Soviet period. **Methods Applied:** The chemical composition of the rock-forming and ore minerals was analysed with the help of a JSM-6390LV Scanning Electron Microscope by Jeol equipped with an INCA Energy 450 X-Max 80 system by Oxford Instruments (Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg). Polished petrographic thin sections cut from the black slag were used for analysis. **Originality:** The study of the material composition of the slags was carried out from the point of view of classical mineralogy on the

derstand the material (mineral) composition of the black slags of Karabash Copper Smelter that were produced and stored back in the Soviet period. **Methods Applied:** The chemical composition of the rock-forming and ore minerals was analysed with the help of a JSM-6390LV Scanning Electron Microscope by Jeol equipped with an INCA Energy 450 X-Max 80 system by Oxford Instruments (Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg). Polished petrographic thin sections cut from the black slag were used for analysis. **Originality:** The study of the material composition of the slags was carried out from the point of view of classical mineralogy on the

basis of the modern compulsory nomenclature of the International Mineralogical Association. **Findings:** The authors have undertaken quite a detailed study of the mineralogy of the Karabash Copper Smelter black slags. It has been established that the slags are composed of a pigeonite-olivine aggregate, a significant amount of glass and rarely impregnated chromites, wustites and various sulphide phases. They are the products of the Soviet copper smelting industry, i.e. they were produced in a shaft furnace as a result of partial pyritic process. The temperature at which these slags had formed was determined by the eutectic (simultaneous) crystallization of wustite and fayalite and it was around 1,170°C. **Practical Relevance:** The obtained data indicate a drastic difference between the black slags of Karabash Copper Smelter from the Soviet period versus the slags produced by the plant today. As the studied slags contain sulphides and chromites, they are acceptable for further processing.

Keywords: Pigeonite, olivine, chromite, sulphides, mineralogy, slags, Karabash Copper Smelter.

References

1. Nemtsev M.S. *Ridderskaya kontsessiya Lesli Urkvarta: monografiya* [Leslie Urquhart's Ridder Concession]. Ridder: Terra, 2008, 170 p. (In Russ.)
2. Bashlykova T.V., Pakhomova G.A., Zhivaeva A.B., Kalinichenko L.S. Deep processing of metallurgical wastes. *Sovremennyye tekhnologii osvoyeniya mineralnykh resursov. Materialy 5-oy Mezhdun. nauch.-tekhn. konferentsii* [Modern mineral resources development technology: Proceedings of the 5th International Conference]. Krasnoyarsk: ITsMIZ SFU, 2007, vol. 5, pp. 163–166. (In Russ.)
3. Lykasov A.A., Matonin A.N., Vertiy I.G., Kimyashev A.A. Phase transformations during oxidizing roasting of copper sulfide smelter slag. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy], 2012, vol. 18, no. 15, pp. 97–99. (In Russ.)
4. Shadrinova I.V., Ozhogina E.G., Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E. Analysing the selectivity of smelter slag decomposition. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and technical problems in the development of mineral resources], 2013, no. 5, pp. 180–190. (In Russ.)
5. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S. Fayalite from the Sredneuralsk Copper Smelter slags. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2010* [Mineralogy of technogenesis – 2010]. Miass: IMin UrBr RAS, 2010, pp. 32–40. (In Russ.)
6. Kozlov P.S., Erokhin Yu.V., Kozlova I.V. Fayalite slags of Mariinsk Steel Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2011* [Mineralogy of technogenesis – 2011]. Miass: IMin UrBr RAS, 2011, pp. 39–50. (In Russ.)
7. Rubin A.E. An American on Paris: Extent of aqueous alteration of a CM chondrite and the petrography of its refractory and amoeboid olivine inclusions. *Meteoritics & Planetary Science*, 50, 1595–1612 (2015). doi:10.1111/maps.12482
8. Wen D.-P., Wang Y.-F., Zhang J.-F., Jin Z.-M. Anisotropic growth of olivine during crystallization in basalts from Hawaii: Implications for olivine fabric development. *American Mineralogist*, 2018, V. 103, P. 735–741. doi:10.2138/am-2018-6174
9. Erokhin Yu.V. Mineralogy of slags from the Rezh Nickel Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza – 2012* [Mineralogy of technogenesis – 2012]. Miass: IMin UrBr RAS, 2012, pp. 50–64. (In Russ.)
10. Simkin T., Smiht J.V. Minor-element distribution in olivine. *Journal of Geology*, 78, 304–325 (1970).
11. Dodd R.T. Calc-aluminous inlets in olivine of the Sharps chondrite. *Mineralogical Magazine*, 38, 451–458 (1971).
12. Castro A.I., Proenza J.A., Zaccarini F., Garuti G., Sarlabous M.S. Al- and Cr-rich chromitites from the Eastern Havana-Matanzas ophiolites (Western Cuba). *Episodes*, 38, 334–343 (2015). doi:10.18814/epiugs/2015/v38i4/82429
13. Erokhin Yu.V., Koroteev V.A., Khiller V.V., Ivanov K.S., Kleimenov D.A. The Severny Kolchim meteorite: new data on mineralogy. *Doklady Earth Sciences*, 482, 1, 1189–1192 (2018). doi:10.1134/S1028334X18090118
14. Chesnokov B.V., Shcherbakova E.P. *Mineralogiya gorelykh otvalov Chelyabinskogo ugolnogo basseyna (opyt mineralogi tekhnogeneza): monografiya* [Mineralogy of the burned coal dumps of the Chelyabinsk coal basin (mineralogy of technogenesis): Monograph]. Moscow: Nauka, 1991, 152 p. (In Russ.)
15. Buchwald V.F. Iron and steel in ancient times. Copenhagen: Royal Danish academy of sciences and letters. 2005. 372 p.
16. Artemyev D.A., Ankushev M.N., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. Mineralogy and origin of slags from the 6th kurgan of the Taksay 1 Burial complex, Western Kazakhstan. *Canadian Mineralogist*, 56, 6, 883–904 (2018). doi:10.3749/canmin.1800025
17. Kosyakov V.I., Sinyakova E.F. Melt crystallization of CuFe₂S₃ in the Cu-Fe-S system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115, 511–516 (2014). doi:10.1007/s10973-013-3206-0

Received 16/05/19

Accepted 24/06/19

Образец для цитирования

Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. Вещественный состав шлаков Карабашского медеплавильного завода // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 12–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18>

For citation

Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V. Material Composition of Karabash Copper Smelter Slags. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 12–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18>