

УДК 543.61

*И.В. Глинская, В.Б. Горбунов, Г.С. Подгородецкий, А.Э. Теселкина*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ КРАСНОГО ШЛАМА**

**Аннотация.** Проведены исследования с целью разработки комплекса методик количественного химического анализа красного шлама и продуктов его переработки: чугуна и шлака. Показана возможность одновременного определения большого числа макрокомпонентов и примесных элементов в широком диапазоне содержаний от  $n \cdot 10\%$  до  $n \cdot 10^{-4}\%$  с применением атомно-эмиссионного с индуктивно-связанной плазмой, инфракрасно-абсорбционного и гравиметрического методов анализа.

**Ключевые слова:** красный шлам, методы количественного химического анализа.

**ANALYTICAL CONTROL OF METALLURGICAL REFINING PROCESS OF RED MUD**

**Abstract.** Development research of a complex of methods of quantitative chemical analysis of red mud and its products (cast iron and slag) are achieved. The possibility of simultaneous determination a lot of macro-component count and trace elements in a wide content range (from  $n \cdot 10\%$  to  $n \cdot 10^{-4}\%$ ) is shown, using the atomic emission with inductively-coupled plasma, infrared-absorption and gravimetric methods of analysis.

**Keywords:** red mud, methods for quantitative chemical analysis.

В настоящее время в мире складировано приблизительно 2,7 млрд т красного шлама и эти запасы пополняются примерно на 120 млн т в год. Поэтому поиск технологии эффективной комплексной переработки отходов глиноземного производства – красных шламов с каждым годом становится все более актуальным. Наиболее близко к решению этой проблемы подошли исследования в области металлургических технологий жидкофазного восстановления нового поколения [1]. Технологическое решение данного способа невозможно без правильного установления химического состава красного шлама и продуктов его переработки (чугуна и шлака). Более того, знание коэффициентов перераспределения элементов между продуктами плавки позволит в дальнейшем повысить степень комплексности переработки красного шлама. Поскольку для оценки эффективности технологических процессов необходимо осуществлять одновременный контроль содержания большого ряда элементов, обладающих разными химико-аналитическими свойствами (Al, As, B, Ba, C, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, K, La и других РЗЭ, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, S, Sc, Si, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn и Zr), для анализа красного шлама, чугуна и шлака применен комплекс аналитических методов: атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) для определения большинства контролируемых элементов, инфракрасно-абсорбционный для определения S и C и гравиметрический для определения  $\text{SiO}_2$ .

Предварительно была проведена проверка образцов красного шлама на радиационную безопасность посредством измерения уровня мощности эквивалентной дозы (МЭД) в мкЗв/ч (или мощности экспозиционной

дозы в мкР/ч) с помощью индикатора внешнего гамма-излучения «Белла». Полученные значения МЭД не превышали мощности дозы естественного фона, которая составляет около 0,15 мкЗв/ч (15 мкР/ч), что позволило сделать вывод об отсутствии повышенной радиоактивности данного материала.

Атомно-эмиссионный анализ красного шлама, чугуна и шлака проводили на спектрометре iCAP 6300 фирмы Thermo Electron Corporation, США, с радиальным наблюдением плазмы. Оптимизированная конструкция спектрометра обеспечивает одновременное измерение любых аналитических линий в диапазоне от 166 до 847 нм с высоким разрешением. Прибор оснащен современным полупроводниковым твердотельным детектором и мощной высокоэффективной оптической системой (оптическая система Эшелле). Оптическая система Эшелле использует два оптических компонента, располагающихся перпендикулярно друг к другу. Одним из диспергирующих устройств является Эшелле решетка, которая груба по сравнению с обычной дифракционной решеткой. Эшелле решетка разделяет полихроматическое излучение на отдельные монохроматические пучки и создает множественные, перекрывающиеся спектральные порядки. Другое диспергирующее устройство разделяет или перекрестно разлагает перекрывающиеся порядки на двухмерные структуры – эшеллеграммы.

Спектрометры с Эшелле решетками обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными спектрометрами. Во-первых, хорошее разрешение, так как используются более высокие спектральные порядки (улучшение разрешения проявляется с увеличением порядка). Во-вторых, даже при высоких спектральных порядках

достигается высокая светосила. В приборе использован улучшенный полупроводниковый твердотельный детектор с высокой чувствительностью и разрешением – устройство с инъекцией заряда (УИЗ – СИД).

Рабочие параметры спектрометра iCAP 6300 приведены ниже:

|                               |                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Мощность генератора, Вт       | 750 – 1600                          |
| Высота наблюдения спектра, мм | 8 – 25 над верхним витком индуктора |
| Разрешение, пм                | 7 на длине волны 200 нм             |
| Поток аргона, л/мин:          |                                     |
| распылительный                | 0,7                                 |
| вспомогательный               | 0,5                                 |
| охлаждающий                   | 12                                  |

Управление спектрометром осуществляется компьютерной программой ITEVA на русском языке.

При атомно-эмиссионном методе анализа с индуктивно-связанной плазмой пробы вводят в разряд в виде аэрозолей растворов. Состав растворов должен адекватно отражать химический состав анализируемых проб и не создавать затруднений при измерении интенсивности спектральных линий [2]. Поэтому особое внимание было уделено выбору способа разложения твердых проб с целью количественного перевода определяемых элементов из исходной пробы в анализируемый раствор, достижения минимальной кислотности и засоления раствора и предотвращения его загрязнения определяемыми элементами, для чего в работе использовали кислоты квалификации о.с.ч. и деионизированную воду.

Предварительные исследования проводили с тремя образцами красного шлама КШ1, КШ2 и КШ3, отобранными из разных точек шламохранилища. Для растворения применяли последовательную обработку навесок анализируемых проб азотной, хлороводородной и хлорной кислотами в присутствии и без фтороводородной кислоты. Опыты показали, что в отсутствии фтороводородной кислоты в раствор переходят все элементы за исключением кремния, который остается в виде нерастворимого оксида или силикатов и частично удерживает в осадке алюминий. Применение фтороводородной кислоты способствует более полному переводу алюминия в раствор.

Для последующего спектрального анализа растворенных проб были выбраны наиболее чувствительные линии определяемых элементов. Калибровку спектрометра проводили с использованием универсальных многокомпонентных смесей (США), содержащих определяемые элементы.

Таким образом были получены предварительные данные о химическом составе красного шлама (табл. 1), что позволило перейти к более детальной разработке методики определения Al, As, В, Ва, Са, Со, Сг, Сu, Fe, Ga, К, La и других РЗЭ, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn и Zr методом АЭС-ИСП.

Определение С и S в красных шламах проводили инфракрасно-абсорбционным методом на анализаторе CS-230IH фирмы LECO, США. Принцип действия анализатора основан на сжигании образцов материалов, помещаемых в специальные керамические тигли в индукционной печи и последующем измерении содержания С и S в виде газообразных CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> методом инфракрасной абсорбции. Основной проблемой при анализе красного шлама явилось отсутствие стандартных образцов состава данного материала. С учетом этого были подобраны условия сжигания анализируемых проб, которые позволили использовать для калибровки прибора стандартные образцы состава сталей. Для этого в керамические тигли помещали железные чипсы, навеску анализируемой пробы массой 0,1 г, в качестве плавня использовали Lecosel II (смесь вольфрама и олова). Результаты определения представлены в табл.1.

Содержание оксида кремния определяли гравиметрическим методом (см. табл. 1).

Предварительные исследования показали, что применение фтороводородной кислоты при растворении проб красного шлама для последующего спектрального анализа приводит к существенным потерям бора и мышьяка в результате образования летучих фторидов. Кроме того, в этом случае становится невозможным гравиметрическое определение кремния, так как происходит растворение осадка оксида кремния также с образованием летучего фторида. Последующие исследования проводили с представительной пробой исходного красного шлама, из которого в результате экспериментальной плавки были получены пробы чугуна и шлака. Для исключения потерь бора, мышьяка и кремния, а также количественного перевода алюминия в раствор (см. выше) вместо фтороводородной кислоты применили серную и фосфорную кислоты. Опыты показали, что наиболее полное извлечение всех определяемых элементов наблюдается при использовании смеси концентрированных серной и фосфорной кислот (2:1) с последующей обработкой полученного раствора концентрированной хлорной кислотой. При этом в осадке остается оксид кремния, что позволяет одновременно проводить его гравиметрическое определение. Для уточнения результатов определения бора и мышьяка был разработан упрощенный вариант вскрытия проб обработкой разбавленной (1:1) азотной кислотой при слабом нагревании, при котором достигается селективное количественное извлечение данных элементов в раствор.

Чтобы исключить загрязнение анализируемой пробы натрием, содержащимся в стеклянной химической посуде, навеску пробы массой 0,1 г помещали в тигель из стеклоуглерода, обрабатывали ее при нагревании 10 мл смеси серной и фосфорной кислот (2:1) и 2 мл хлорной кислоты. Полученный раствор доводили дистиллированной водой до объема ~60 мл и фильтровали через плотный фильтр в полипропиленовую колбу

Таблица 1

## Химический состав красного шлама

| Определяемый компонент         | Содержание определяемых компонентов в красном шламе, % (по массе) |         |         |
|--------------------------------|---|---------|---------|
|                                | КШ 1  | КШ 2    | КШ 3    |
| Ag                             | < 0,001   | < 0,001 | < 0,001 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10,6  | 10,2    | 11,0    |
| As                             | 0,019   | 0,023   | 0,020   |
| Au                             | < 0,001   | < 0,001 | < 0,001 |
| B                              | < 0,005   | < 0,005 | < 0,005 |
| Ba                             | 0,018   | 0,012   | 0,014   |
| Be                             | < 0,001   | < 0,001 | < 0,001 |
| C                              | 0,80  | 0,99    | 0,71    |
| CaO                            | 9,80  | 10,90   | 7,60    |
| Co                             | 0,018   | 0,019   | 0,018   |
| Cr                             | 0,025   | 0,021   | 0,024   |
| CuO                            | 0,021   | 0,029   | 0,015   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 45,30   | 43,50   | 46,50   |
| K <sub>2</sub> O               | 0,073   | 0,073   | 0,117   |
| La                             | 0,030   | 0,030   | 0,030   |
| MgO                            | 0,63  | 0,75    | 0,60    |
| MnO                            | 0,49  | 0,43    | 0,55    |
| Mo                             | < 0,05  | < 0,05  | < 0,05  |
| Na <sub>2</sub> O              | 1,90  | 1,80    | 2,70    |
| Nb                             | 0,013   | 0,013   | 0,013   |
| NiO                            | 0,028   | 0,029   | 0,027   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,55  | 0,71    | 0,44    |
| Pb                             | 0,022   | 0,030   | 0,023   |
| S                              | 1,13  | 1,41    | 0,86    |
| Sc                             | 0,010   | 0,010   | 0,010   |
| SiO <sub>2</sub>               | 8,60  | 10,50   | 10,60   |
| TiO <sub>2</sub>               | 3,80  | 3,70    | 3,80    |
| V                              | 0,053   | 0,052   | 0,043   |
| Y                              | 0,027   | 0,031   | 0,024   |
| Zn                             | 0,016   | 0,020   | 0,018   |
| Zr                             | 0,083   | 0,078   | 0,087   |

вместимостью 100 мл. Объем фильтрата довели до метки водой, полученный раствор разбавляли в 10 раз азотной кислотой (1:20) и анализировали на спектрометре iCAP 6300. Бумажный фильтр с осадком сжигали в муфельной печи при 900 °С в течение 1 ч, измеряли массу осадка на аналитических весах и рассчитывали содержание оксида кремния в анализируемых пробах.

При атомно-эмиссионном анализе растворов проб таких сложных объектов, как красный шлак, существенную роль играет правильный выбор спектральных линий определяемых элементов. Во-первых, определение низких содержаний элементов возможно только при ис-

пользовании наиболее чувствительных аналитических линий. Кроме того, эти линии должны быть свободны от возможного спектрального наложения других элементов, обладающих собственным сложным эмиссионным спектром, так как это может привести к существенному завышению результатов определения [3]. Предварительные исследования позволили выбрать наиболее чувствительные спектральные линии определяемых элементов, отвечающие указанным требованиям (табл. 2).

Было проведено изучение влияния содержания макрокомпонентов (Al, Ca, Fe, Na, Ti) на интенсивности спектральных линий определяемых элементов. Показано, что матричный эффект начинает проявляться при содержании макрокомпонентов в растворе более 100 мкг/мл, что необходимо учитывать при разбавлении растворов проб. Относительное содержание элементов в пробе было учтено при приготовлении калибровочных смесей для проведения атомно-эмиссионного анализа.

Были выбраны рабочие параметры спектрометра, позволяющие оптимизировать условия измерения интенсивности спектральных линий. Мощность высокочастотного генератора составляла 1200 Вт, высота наблюдения спектра – 12 мм над верхним витком индуктора, время интегрирования аналитического эмис-

Таблица 2

## Спектральные линии определяемых элементов

| Определяемый элемент | Длина волны, нм | Определяемый элемент | Длина волны, нм |
|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| Al                   | 394,4; 396,1    | Na                   | 588,9; 589,5    |
| As                   | 189,0; 193,7    | Nb                   | 309,4           |
| B                    | 208,8; 208,9    | Nd                   | 406,1           |
| Ba                   | 455,4           | Ni                   | 221,6; 231,6    |
| Ca                   | 315,8; 393,3    | P                    | 213,6; 214,9    |
| Ce                   | 404,0; 456,2    | Pb                   | 220,3           |
| Co                   | 228,6; 237,8    | Pr                   | 422,5           |
| Cr                   | 267,7; 283,5    | Sc                   | 361,3; 424,6    |
| Cu                   | 324,7; 327,3    | Sm                   | 359,2           |
| Dy                   | 353,1; 400,0    | Sn                   | 189,9           |
| Er                   | 323,0; 326,4    | Sr                   | 407,8           |
| Eu                   | 381,9; 412,9    | Tb                   | 332,4; 350,9    |
| Fe                   | 238,2; 259,9    | Th                   | 283,2; 283,7    |
| Ga                   | 294,3           | Ti                   | 313,1           |
| Gd                   | 342,2           | Tm                   | 346,2           |
| Ho                   | 345,6           | U                    | 263,5           |
| K                    | 766,6           | V                    | 292,4; 309,3    |
| La                   | 333,7; 412,3    | W                    | 239,7           |
| Lu                   | 261,5           | Y                    | 324,2; 371,0    |
| Mg                   | 279,5           | Yb                   | 289,1; 328,9    |
| Mn                   | 257,6           | Zn                   | 206,2; 213,8    |
| Mo                   | 202,0           | Zr                   | 339,1; 343,8    |

Таблица 3

Результаты анализа красного шлама

| Определяемый компонент         | Содержание определяемых компонентов в красном шламе, % (по массе) |         |               |
|--------------------------------|---|---------|---------------|
|                                | МИСиС   | ВИМС    | «Термо Техно» |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11,5  | 12,3    | 15,9          |
| As                             | 0,012   | 0,0095  | 0,0067        |
| B                              | 0,0066  | –       | –             |
| Ba                             | 0,017   | 0,023   | –             |
| C                              | 0,69  | –       | –             |
| CaO                            | 9,7   | 9,5     | 9,2           |
| Ce                             | 0,048   | 0,093   | 0,024         |
| Co                             | 0,013   | 0,0072  | 0,012         |
| Cr                             | 0,024   | 0,011   | 0,024         |
| CuO                            | 0,016   | 0,016   | 0,015         |
| Dy                             | 0,006   | –       | –             |
| Er                             | < 0,005   | –       | –             |
| Eu                             | 0,001   | –       | –             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 46,5  | 50,3    | 45,5          |
| Ga                             | < 0,05  | 0,0021  | 0,0014        |
| Gd                             | 0,005   | –       | –             |
| Ho                             | < 0,01  | –       | –             |
| K <sub>2</sub> O               | 0,24  | 0,23    | 0,28          |
| La                             | 0,031   | 0,047   | –             |
| Lu                             | 0,0004  | –       | –             |
| MgO                            | 0,78  | 0,79    | 1,12          |
| MnO                            | 0,74  | 0,87    | 0,79          |
| Mo                             | < 0,001   | 0,0002  | –             |
| Na <sub>2</sub> O              | 4,7   | 5,2     | 7,7           |
| Nb                             | 0,010   | 0,0076  | 0,0050        |
| Nd                             | 0,028   | 0,044   | 0,016         |
| NiO                            | 0,037   | 0,041   | 0,036         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,76  | 0,22    | 0,66          |
| Pb                             | 0,024   | 0,018   | 0,014         |
| Pr                             | < 0,01  | 0,0087  | –             |
| S                              | 0,83  | 1,14    | 0,51          |
| Sc                             | 0,010   | 0,0003  | 0,0082        |
| SiO <sub>2</sub>               | 13,5  | 12,4    | 12,3          |
| Sm                             | 0,005   | 0,0075  | –             |
| Sn                             | < 0,05  | 0,0013  | –             |
| Sr                             | 0,15  | 0,15    | 0,14          |
| Tb                             | < 0,001   | –       | –             |
| Th                             | < 0,10  | 0,0065  | < 0,001       |
| TiO <sub>2</sub>               | 4,3   | 4,7     | 4,6           |
| Tm                             | < 0,001   | –       | –             |
| U                              | < 0,10  | 0,0022  | < 0,001       |
| V                              | 0,047   | 0,088   | 0,055         |
| W                              | < 0,01  | < 0,001 | –             |
| Y                              | 0,023   | 0,021   | 0,023         |
| Yb                             | 0,002   | 0,0007  | –             |
| Zn                             | < 0,05  | 0,024   | 0,014         |
| Zr                             | 0,081   | 0,099   | 0,094         |

сионного сигнала – 10 с. Измерения на спектрометре проводили не ранее, чем после 30 мин горения плазмы. Стабильность градуировки прибора и отсутствие дрейфа аналитического сигнала проверяли через каждые 30 мин работы на приборе посредством измерения калибровочных растворов. Дрейф прибора в течение трех часов работы составлял не более 1 – 2 %, в случае превышения этой величины проводилась перекалибровка спектрометра.

Поскольку в красных шлаках присутствуют такие ценные элементы, как скандий, иттрий, лантан и другие РЗЭ на уровне 10<sup>-2</sup> – 10<sup>-4</sup> %, авторами была разработана специальная методика, включающая предварительное концентрирование данных элементов с целью повышения чувствительности их определения. Методика включает растворение 0,1 г анализируемой пробы путем последовательной обработки азотной, хлороводородной и хлорной кислотами, осаждение гидроксида железа раствором аммиака и фильтрование раствора с осадком через плотный фильтр в колбу вместимостью 50 мл. Отделение макрокомпонента – железа позволило уменьшить конечный объем анализируемого раствора пробы и, следовательно, повысить концентрацию скандия, иттрия, лантана и других РЗЭ в анализируемых растворах в 20 раз, что способствует существенному снижению нижних границ определяемых содержаний данных элементов. Полученные растворы анализировали на спектрометре iCAP 6300.

Разработанные методики были также применены для анализа образцов чугуна и шлака.

Результаты атомно-эмиссионного анализа красного шлама, чугуна и шлака, а также результаты гравиметрического определения Si представлены в табл. 3 – 5. Правильность полученных результатов проверяли методом варьирования навесок, введения добавок и сопоставлением с результатами, полученными методом рентгенофлуоресцентного анализа, проведенного в аналитических лабораториях Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья (ВИМС) и «Термо Техно». Из табл. 3, 4 видно, что большинство результатов, полученных разными методами, имеют удовлетворительное совпадение. Однако в ряде случаев наблюдаются существенные расхождения результатов рентгенофлуоресцентного анализа как между собой, так и с результатами АЭС-ИСП, например результаты определения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ce, Co, Cr, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Это можно объяснить отсутствием адекватных стандартных образцов красного шлама и шлака, которые требуются для получения точных результатов при использовании рентгенофлуоресцентного метода анализа. В то же время, АЭС-ИСП не требует наличия адекватных стандартных образцов, так как калибровка спектрометра проводится по растворам сравнения, имитирующим химический состав растворов анализируемых проб. Таким образом, исследования показали преимущества применения АЭС-ИСП при анализе та-

Таблица 4

## Результаты анализа шлака

| Определяемый компонент         | Содержание определяемых компонентов в шлаке, % ( по массе) |               |
|--------------------------------|--|---------------|
|                                | МИСиС  | «Термо Техно» |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 27,4   | 31,1          |
| As                             | < 0,01   | < 0,01        |
| B                              | 0,027  | –             |
| Ba                             | 0,045  | –             |
| C                              | 0,21   | –             |
| CaO                            | 16,0   | 20,4          |
| Co                             | < 0,005  | < 0,005       |
| Cr                             | 0,020  | 0,0073        |
| CuO                            | 0,0071   | 0,0025        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,0  | 1,3           |
| K <sub>2</sub> O               | 0,42   | –             |
| La                             | 0,070  | –             |
| MgO                            | 1,6  | 2,2           |
| MnO                            | 1,4  | 1,3           |
| Na <sub>2</sub> O              | 8,4  | 8,8           |
| Nb                             | 0,017  | 0,0093        |
| NiO                            | < 0,01   | 0,0037        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | < 0,01   | < 0,01        |
| Pb                             | < 0,01   | < 0,01        |
| S                              | 1,62   | 0,98          |
| Sc                             | 0,022  | 0,018         |
| SiO <sub>2</sub>               | 24,1   | 23,5          |
| TiO <sub>2</sub>               | 8,1  | 9,1           |
| Th                             | < 0,1  | 0,015         |
| U                              | < 0,1  | 0,0036        |
| V                              | 0,050  | 0,053         |
| W                              | < 0,01   | < 0,005       |
| Y                              | 0,055  | 0,043         |
| Zn                             | < 0,05   | < 0,05        |
| Zr                             | 0,23   | 0,17          |

ких сложных аналитических объектов, какими являются красные шламы и шлаки. Погрешность результатов анализа составляет 2 – 3 % отн. для макрокомпонентов и 10 – 30 % отн. для примесных элементов.

Определение С и S в красном шламе и шлаке проводили инфракрасно-абсорбционным методом в указанных выше условиях. Погрешность результатов анализа составляет 5 – 10 % отн. Анализ чугуна на содержание С и S проводили по ГОСТ 22536.1-88 и ГОСТ 22536.2-87. Результаты определения С и S представлены в табл. 3 – 5.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан комплекс методик количественного химического анализа красного шлама, чугуна и шлака,

Таблица 5

## Результаты анализа чугуна

| Определяемый компонент | Содержание определяемых компонентов в чугуне, % ( по массе) |
|------------------------|---|
| Al                     | 0,049   |
| As                     | 0,033   |
| B                      | 0,0011  |
| Ba                     | 0,0071  |
| C                      | 4,23  |
| Ca                     | 0,11  |
| Co                     | 0,032   |
| Cr                     | 0,038   |
| Cu                     | 0,046   |
| Fe                     | основа  |
| K                      | < 0,01  |
| La                     | < 0,005   |
| Mg                     | 0,015   |
| Mn                     | 0,22  |
| Na                     | 0,032   |
| Nb                     | < 0,005   |
| Ni                     | 0,10  |
| P                      | 0,58  |
| Pb                     | < 0,01  |
| S                      | 0,42  |
| Sc                     | < 0,001   |
| Si                     | 0,094   |
| Ti                     | 0,031   |
| V                      | 0,042   |
| Y                      | < 0,001   |
| Zn                     | < 0,01  |
| Zr                     | < 0,001   |

позволяющий контролировать технологический процесс переработки красного шлама, что способствует более эффективному использованию отходов производства глинозема.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Panov A., Klimentenok G., Podgorodetskiy G., Gorbunov V. // The minerals, metals & materials society, 2012. P. 93 – 98.
2. Пупышев А.А., Данилова Д.А.// Аналитика и контроль. 2007. Т. 11. № 2 – 3. С. 131 – 181.
3. Томпсон М., Уолш Д.Н. Руководство по спектрометрическому анализу с индуктивно-связанной плазмой. – М.: Недра, 1988. – 288с.

© 2013 г. И.В. Глинская, В.Б. Горбунов,  
Г.С. Подгородецкий, А.Э. Теселкина  
Поступила 25 июня 2013 г.