

Химические аспекты карбонатного выщелачивания скандия из красных шламов

Сергей И. Степанов	¹	chao_step@mail.ru
Маунг Маунг Аунг	¹	polluxaung@gmail.com
Хтет Ёе Аунг	¹	htetyeaung61058@gmail.com
Александр В. Бояринцев	¹	boyarin_sanya@mail.ru

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия

Аннотация. Красные шламы (КШ) – отходы гидрохимической переработки бокситов по способу Байера, содержат целый ряд редких элементов, таких как галлий, титан, цирконий, редкоземельные элементы и скандий, содержание которого в КШ достигает 130 г/т. В решении проблемы извлечения скандия из КШ выделяют два направления: непосредственное извлечение скандия из КШ, как наиболее ценного и дорогостоящего его компонента, и попутное извлечение при комплексной переработке этого техногенного отхода. Предложенный в Институте химии твердого тела УрО РАН способ карбонатного выщелачивания скандия из КШ в процессе карбонизации щелочного раствора, образующегося при обработке КШ водой, позволяет извлекать не более 20% скандия, что недостаточно для разработки эффективной технологической схемы переработки этого сырья. В настоящей работе рассмотрены особенности химии карбонатного выщелачивания скандия из КШ в гетерогенных системах твердое – жидкость – углекислый газ для разработки условий, способствующих повышению извлечения скандия в растворы выщелачивания. Показано, что выщелачивание скандия из КШ водными растворами карбоната натрия в отсутствие углекислого газа протекает незначительно и сопровождается щелочным гидролизом скандия при высоких значениях pH в концентрированных растворах Na₂CO₃. При сатурации карбонатной пульпы КШ углекислым газом протекает гидролитическая полимеризация гидрокарбонатов скандия и алюминия в присутствии протона угольной кислоты. Оба процесса: щелочного гидролиза и гидролитической полимеризации сопровождаются образованием вторичных осадков и снижением выхода скандия в карбонатный раствор. Для повышения извлечения скандия необходимо проводить карбонатное выщелачивание в условиях, исключающих или минимизирующих образование вторичных осадков, особенно при сатурации пульпы углекислым газом.

Ключевые слова: красные шламы, скандий, извлечение, карбонатные растворы, гидролитическая полимеризация

Chemical Aspects of Scandium carbonate leaching from Red Muds

Sergei I. Stepanov	¹	chao_step@mail.ru
Maung Maung Aung	¹	polluxaung@gmail.com
Htet Ye Aung	¹	htetyeaung61058@gmail.com
Aleksander V. Boyarintsev	¹	boyarin_sanya@mail.ru

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russian, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia

Abstract. Red Muds (R.M.) – waste of bauxite reprocessing by the Bayer's method include many rare elements, such as Gallium, Titanium, Zirconium, Rare Earth Elements and Scandium, concentration of which in its reached 130 g/t. In the problem solving of Scandium extraction from R.M. get a two directions: immediate leaching of Scandium from R.M. and in passing Scandium recovery under complexing processing of R.M. The method of carbonate leaching of Scandium from R.M., which was work out in Institute of Solid State Chemistry Russian Academy of Sciences Urals Branch, include saturation by carbon dioxide of alkaline solutions, obtained after water process of R.M. and allow up to 20 % Scandium recovery in solutions. It is not effective for work out of technological scheme of R.M. processing. In recent paper, the chemical aspects of carbonate leaching of Scandium from R.M. in heterogeneous systems solid – liquid – gas carbon dioxide were investigated to determine of conditions for more Scandium recovery from R.M. It was shown, that Scandium leaching by aqueous sodium solutions without carbon dioxide gives small recovery yield and accompanied by alkaline hydrolysis under high pH in concentrated Na₂CO₃ solutions. Under saturation by carbon dioxide of carbonate R.M. pulp, the hydrolytic polymerization of hydroxocarbonates of Scandium and Aluminum in presence of carbonic acid proton take place. In the both process secondary precipitates are settle down and reduce of Scandium recovery yield. For increase of Scandium recovery from R.M. it is necessary to exclude the secondary precipitates under carbonate leaching with saturation by carbon dioxide.

Keywords: red muds, Scandium, leaching, carbonate solutions, hydrolytic polymerization

Введение

Известно [1], что красные шламы (КШ) – отходы гидрохимической переработки бокситов по способу Байера, содержат целый ряд редких элементов, таких, как галлий, титан, цирконий, редкоземельные элементы (РЗЭ) и в том числе скандий, содержание которого в КШ достигает 130 г/т. Такое высокое содержание скандия позволяет рассматривать КШ как техногенное

сырье для производства оксида скандия требуемой степени чистоты. С учетом значительного объема накопленных к настоящему времени КШ, порядка 1 млрд 200 млн тонн [2], и ежегодного прироста в ~ 45 млн т запасы скандия в этом сырье оцениваются в значительную величину.

Проблеме извлечения скандия из КШ посвящено большое число научных работ [3–7], патентов [8–9], обсуждений на конференциях

Для цитирования

Степанов С.И., Аунг Маунг Маунг, Аунг Хтет Ёе, Бояринцев А.В. Химические аспекты карбонатного выщелачивания скандия из красных шламов // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 349–355. doi:10.20914/2310-1202-2018-4-349-355

For citation

Stepanov S.I., Aung Maung Maung, Aung Htet Je, Boyarintsev A.V. Chemical Aspects of Scandium carbonate leaching from Red Muds. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 349–355. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-4-349-355

различного уровня [10–11]. Среди значительного потока литературы по этому вопросу необходимо выделить два направления, одно из которых ограничивается непосредственным извлечением скандия из КШ как наиболее ценного и дорогостоящего его компонента. Второе направление рассматривает попутное извлечение скандия из КШ при комплексной переработке этого техногенного отхода. С экономической точки зрения извлечение скандия из КШ может быть очень привлекательным, т. к. конечный продукт – оксид скандия высокой степени чистоты, является ликвидным и дорогостоящим товаром, способным окупить значительные затраты на его производство из КШ и принести прибыль. С экологической точки зрения извлечение (как правило, гидрометаллургическими способами) 100–130 г скандия из 1 т КШ с последующим размещением полученного «нового» отхода в виде КШ, не содержащих скандия, но увеличившихся в объеме до 1,1–1,2 т (за счет перевода компонентов шлама в другие анионные формы и обводнения при переработке) нецелесообразно, т. к. потребует расширения площадей шламовых прудов под эти «новые» КШ. Поэтому комплексная переработка КШ с вовлечением всего количества этих отходов для получения разнообразных ликвидных продуктов, в том числе и оксида скандия, является насущной необходимостью при разработке методов обращения с КШ.

При комплексной переработке КШ большое значение имеет использование для извлечения ценных компонентов тех составляющих шламов, которые остаются в них от основного производства. Речь, прежде всего, идет об остаточной щелочи (NaOH, KOH), содержание которой достигает 5% от исходной массы КШ и которая может быть вовлечена в процессы его переработки. Поэтому предложенный в ИХТТ УрО РАН [8] способ карбонатного выщелачивания скандия из КШ в процессе карбонизации щелочного раствора, образующегося при обработке КШ водой, является примером эффективного ресурсосбережения при переработке техногенных отходов. Дополнительным преимуществом такого карбонатного выщелачивания скандия является использование для карбонизации отходящих топочных газов, представленных преимущественно углекислым газом.

Попутно при карбонатном выщелачивании скандия из КШ удастся извлечь до 30% титана и до 50% циркония, которые могут быть выделены в отдельные концентраты и переработаны с получением своих ликвидных продуктов.

Таким образом, карбонатное выщелачивание скандия из КШ при карбонизации пульпы отходящими топочными газами представляет собой часть комплексной переработки этого отхода с получением различных товарных продуктов.

Химия карбонатного выщелачивания скандия из КШ обусловлена образованием водорастворимых карбонатных анионных комплексов общей формулы $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_n]^{(2n-3)-}$, среди которых в литературе описаны комплексы состава: $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_2]^-$, $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_3]^{3-}$ и $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_4]^{5-}$ [12]. Растворимость комплексных карбонатов скандия с щелочными металлами, натрием, калием, литием в карбонатных растворах достаточно высока [12], чтобы степень извлечения скандия из КШ в этом процессе достигала более 95%.

Однако приведенные значения степени извлечения скандия из КШ в процессе, предложенном в ИХТТ УрО РАН, невысоки и не превышают 20%, что, конечно, недостаточно для разработки эффективной технологической схемы переработки этого сырья. Очевидно, что причины такого поведения скандия в карбонатных растворах при сатурации пульпы углекислым газом обусловлены особенностями протекания химических реакций в многокомпонентных карбонатных гетерогенных системах жидкость – твердое – углекислый газ.

Цель работы – изучение химических особенностей процесса карбонатного выщелачивания скандия из КШ в гетерогенных системах с углекислым газом для разработки условий, способствующих повышению извлечения скандия в растворы выщелачивания.

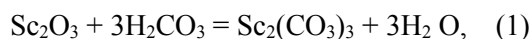
Материалы и методы

В качестве исходных КШ использовали шламы «Богословского алюминиевого завода» филиала ОАО «Сибирско-Уральской алюминиевой компании» («БАЗ» филиал ОАО «СУАЛ») следующего состава, в % масс.: Al_2O_3 – 14,21, Fe_2O_3 – 41,5, CaO – 12,14, MgO – 1,6, SiO_2 – 9,75, Na_2O – 4,52, K_2O – 0,19, TiO_2 – 3,78, P_2O_5 – 0,76, S – 1,45, CO_2 – 11,1, Sc – 0,012, $\sum \text{Ln}$ – 0,122. Фракционный состав КШ следующий, в % масс.: >180 мкм – 36,6; 125–180 мкм – 29,2; 90–125 мкм – 17,0; 63–90 мкм – 14,5; 45–63 мкм – 2,6; <45 мкм – 0,2. В работе использовали Na_2CO_3 и NaOH и баллонный углекислый газ квалификации «ч». Выщелачивание скандия из КШ водными растворами Na_2CO_3 проводили следующим образом. Навеску КШ помещали в термостатируемую ячейку, температура которой была задана условиями эксперимента.

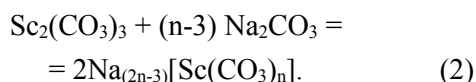
Затем в ячейку приливали определенное количество раствора Na_2CO_3 , в зависимости от условий эксперимента помещали в ультразвуковой излучатель и барботер CO_2 . Для определения содержания скандия в растворе при заданном времени выщелачивания проводили отбор пульпы, ее фильтрование и анализировали методом эмиссионной спектроскопии с индукционно связанной плазмой на приборе JobniYvon Emission-JY 38 (Франция) в аналитической лаборатории «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ». Для интенсификации процессов выщелачивания использовали ультразвуковой проточный аппарат, Булава-П модель УЗАП-3/22-ОП производства ОАО «Центр ультразвуковых технологий» г. Бийск.

Результаты и обсуждение

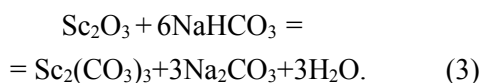
Данные РФА указывают на нахождение скандия в КШ в форме оксида Sc_2O_3 . Для его перевода в водорастворимые анионные карбонатные комплексы необходимо сначала провести реакцию образования карбоната скандия, которая может быть записана следующим образом:



например, с Na_2CO_3 :



Результатом протекания этих двух реакций и будет образование растворимых в карбонатных растворах комплексов скандия. Прямая реакция между оксидом скандия и карбонатом натрия в карбонатно-щелочных растворах не протекает. Для проведения реакции (1) необходим небольшой избыток угольной кислоты в системе, который может быть обеспечен при сатурации пульпы CO_2 или при растворении CO_2 в карбонатно-щелочном растворе под давлением. Очевидно, что в обоих случаях введения CO_2 в систему будет протекать реакция нейтрализации избытка щелочи с образованием карбоната и далее бикарбоната щелочного металла. При проведении процесса с КШ, в которых избыток щелочи обусловлен в основном гидроксидом натрия, сатурация приводит к образованию карбоната и бикарбоната натрия. В такой системе образование карбоната скандия может быть записано следующим образом:



Рассмотренные реакции указывают на отсутствие термодинамических запретов на выщелачивание скандия в карбонатные растворы при сатурации пульпы.

В таблице 1 представлены результаты по извлечению скандия из КШ в растворы карбоната натрия различной концентрации без корректировки растворов углекислым газом.

С ростом концентрации Na_2CO_3 степень извлечения скандия в выщелачивающий раствор проходит через максимум при концентрации $\text{Na}_2\text{CO}_3 \sim 1$ моль/л. Наличие максимума может быть объяснено повышением растворимости карбонатных комплексов скандия с ростом карбонатности раствора и вторичным осадкообразованием скандия в виде его оксикарбонатов с ростом pH исходного карбонатного раствора, обусловленного повышением концентрации карбоната натрия. В то же время степень извлечения скандия в растворы карбоната натрия не превышает 6–6,5%, что обусловлено, по-видимому, низким содержанием HCO_3^- групп, необходимых для протекания реакций (1) или (3).

При введении углекислого газа в процесс выщелачивания путем его барботажа через пульпу степень извлечения скандия в карбонатно-бикарбонатный раствор закономерно возрастает до 17,5% за 10 мин, что почти в 3 раза выше, чем при выщелачивании без барботажа CO_2 (таблица 2).

В отобранных для анализа пробах при стоянии наблюдали образование вторичного осадка, что отражено в примечании в таблице 2. Как показали дальнейшие исследования, содержание скандия в образующихся осадках не превышало 0,2%, а сам осадок по преимуществу содержал соединения алюминия.

Таблица 1.
Зависимость P_{Sc} от концентрации Na_2CO_3 при карбонатном выщелачивании КШ: время – 4 ч,
 $T : Ж = 1:5$; $T = 50 \pm 5^\circ \text{C}$; исходная
концентрация Sc в КШ – 100 г/т

Table 1.
The dependence of the P_{Sc} vs Na_2CO_3
concentration under carbonate leaching from the
R.M.: time – 4 hour, S : L = 1:5, $T = 50 \pm 5^\circ \text{C}$,
initial Sc concentration – 100 g/t

№ п/п	m(KШ), г, g	V(Na_2CO_3), мл, ml	C(Na_2CO_3), М	C_{Sc} , мг/л mg/l	P_{Sc} , %
1	20,05	100	0,25	0,14	0,77
2	20,07	100	0,40	0,34	2,04
3	20,02	100	0,75	0,62	3,41
4	20,03	100	1,10	0,97	6,06
5	20,0	100	1,50	0,96	6,05
6	100,0	500	2,10	0,081	0,04

Таблица 2.

Зависимость P_{Sc} от времени при выщелачивании из КШ водным 1,0 М раствором Na_2CO_3 и барботаже CO_2 1,5 л/мин: $T : Ж = 1 : 5$, $T = 70 \pm 5$ °C, $C_{Sc \text{ исх.}} = 100$ г/т

Table 2.

The dependence of the P_{Al} vs time under leaching from the R.M. by 1,0 M aqueous solution of Na_2CO_3 , and CO_2 bubbling 1,5 l/min: $S : L = 1 : 5$, $T = 70 \pm 5$ °C, $C_{Sc \text{ init.}} = 100$ g/t

Время, мин Time, min	C_{Sc} , мг/л C_{Sc} , mg/l	P_{Sc} , %	Примечание Comment
1	0,76	3,8	Нет осадка No sediment
2	0,76	3,8	Мало осадка Small sediment
3	0,76	3,8	Увеличение объема осадка Rise of sediment's volume
4	1,10	5,5	
5	1,40	7,0	Снижение объема осадка Reduction of sediment's volume
7	1,90	9,5	
10	3,50	17,5	Мало осадка Small sediment

Условия малого времени выщелачивания скандия из КШ при одновременной сатурации пульпы CO_2 были исследованы более подробно. Выщелачивание проводили в течение более длительного периода времени, а одну и ту же порцию шлама после промежуточной отмывки на фильтре от маточного раствора двумя порциями дистиллированной воды при $T : Ж = 1 : 1$ и комнатной температуре выщелачивали

дважды. В таблице 3 представлены полученные результаты, которые, с одной стороны, подтверждают данные таблицы 2 по повышению извлечения скандия в карбонатные растворы при сатурации пульпы, а с другой стороны, показывают наличие максимумов на кинетических кривых в области 20–35 мин проведения процесса на каждой ступени.

Таблица 3.

Зависимость P_{Sc} от времени при выщелачивании из КШ водным 1,2 М раствором Na_2CO_3 и барботаже CO_2 . Условия выщелачивания: $T : Ж = 1 : 5$, расход CO_2 -1,5 л/мин, $T = 70 \pm 5$ °C, исходная концентрация скандия в КШ – 100 г/т

Table 3.

The dependence of the P_{Sc} vs the time under leaching from R.M. by aqueous 1,2 M solution of Na_2CO_3 and CO_2 bubbling. Conditions of leaching: $S : L = 1 : 5$, CO_2 flow rate – 1,5 l/min, $T = 70 \pm 5$ °C, initial Sc concentration in R.M. – 100 g/t

№ п/п.	1-я ступень			2-я ступень		
	Время, мин Time, min	C_{Sc} , мг/л C_{Sc} , mg/l	P_{Sc} , %	Время, мин Time, min	C_{Sc} , мг/л C_{Sc} , mg/l	P_{Sc} , %
1	3	0,56	2,8	3	1,20	6,0
2	5	0,74	3,7	5	0,72	3,6
3	15	2,40	12,0	10	0,92	4,6
4	20	2,70	13,5	15	1,40	7,0
5	25	3,30	16,5	20	1,30	6,5
6	30	3,40	17,0	25	1,20	6,0
7	35	3,40	17,0	30	0,90	4,5
8	50	2,00	10,0	45	1,10	5,5
9	65	0,75	3,75	60	1,40	7,0

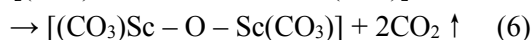
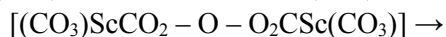
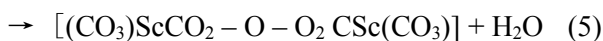
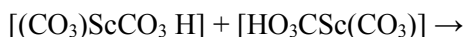
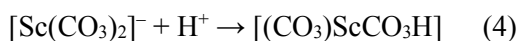
Снижение концентрации скандия в растворе в процессе выщелачивания при сатурации пульпы обусловлено, по-видимому, вторичным осадкообразованием, которое уже не может быть причиной щелочного гидролиза, как это наблюдается в случае с концентрированными растворами карбоната натрия.

Для объяснения наблюдаемого эффекта было высказано предположение о протекании процесса гидролитической полимеризации соединений скандия в карбонатных растворах в присутствии протона угольной кислоты. Учитывая низкую концентрацию скандия в растворах при выщелачивании из КШ в описанных

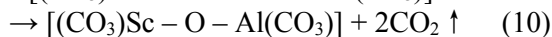
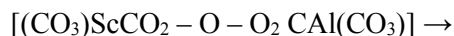
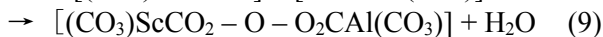
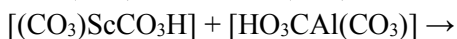
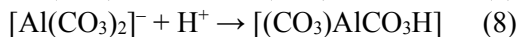
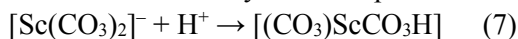
выше условиях, трудно предполагать гомополимеризацию только скандия.

Однако данные таблицы 2, указывающие на переход в растворы наряду со скандием алюминия в значительно больших количествах, позволяют предположить образование смешанных гидролитических полимеров между алюминием и скандием в процессе более длительного выщелачивания при сатурации пульпы КШ.

Реакцию гидролитической полимеризации скандия в карбонатных растворах в присутствии протона угольной кислоты можно представить следующей упрощенной схемой:



а реакцию образования смешанных полимеров скандия и алюминия следующим образом:



Необходимо отметить, что это одна из возможных схем полимеризационных превращений, в которой в ходе поликонденсации выделяются как молекулы воды, так и молекулы углекислого газа. В пользу такой схемы свидетельствует описанное в литературе [13, с. 80] соединение основного карбоната скандия состава $\text{Sc}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2$. Однако эта схема достаточно наглядно демонстрирует, как может осуществляться в карбонатных растворах переход от растворимого карбонатного комплекса к нерастворимому полиядерному соединению в присутствии CO_2 или, если быть точнее, в присутствии протона угольной кислоты H_2CO_3 .

Для подтверждения высказанных предположений были проведены исследования по устойчивости щелочного раствора алюминия, полученного при выщелачивании КШ 4,0 М водным раствором NaOH , содержащим 0,61 г/л Al , при барботаже через него CO_2 (рисунок 1).

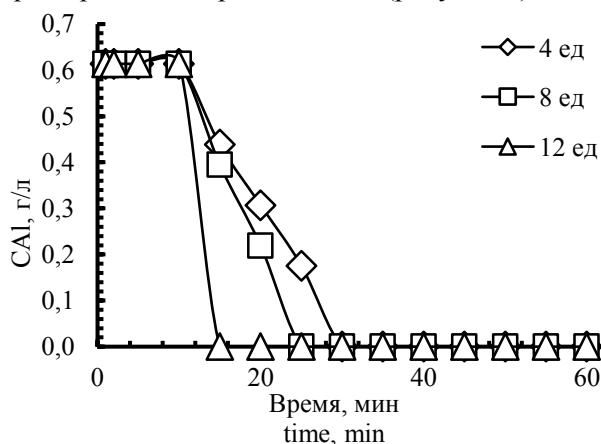


Рисунок 1. Кинетика осадкообразования Al при барботаже CO_2 через раствор выщелачивания КШ 4,0 М водным раствором NaOH , содержащим 0,61 г/л Al , при расходе CO_2 , л/мин: 0,5 – 4 ед.; 1,0 – 8 ед.; 1,5 – 12 ед.

Figure 1. Kinetic of Aluminum precipitation under CO_2 bubbling through 4,0 M NaOH aqueous solution, containing 0,61 g/l Al . Flow rate CO_2 , l/min: 0,5 – 4 unit; 1,0 – 8 unit; 1,5 – 12 unit

При расходе CO_2 1,5 л/мин уже через 10 мин алюминий в равновесном водном растворе не обнаружен. На всех представленных кинетических зависимостях выделяется начальный участок, на котором в течение 10 мин не наблюдается никакого изменения концентрации Al в растворе. Этот период связан с нейтрализацией избытка щелочи угольной кислотой. В таблице 4 представлены данные по изменению концентрации гидроксида, карбоната и бикарбоната натрия во времени для кривой 12 ед. на рисунке 1.

Таблица 4.

Изменение концентрации NaOH , Na_2CO_3 и NaHCO_3 при барботаже 1,5 л/мин CO_2 через алюминатный раствор выщелачивания КШ

Table 4.

The variation of NaOH , Na_2CO_3 and NaHCO_3 concentrations under 1,5 l/min CO_2 bubbling through aluminate solution of R.M. leaching

Время, мин Time, min	Концентрация, М Concentration, M		
	NaOH	Na_2CO_3	NaHCO_3
0	2,6	0,5	0,0
1	1,4	1,1	0,0
2	1,2	1,2	0,0
5	0,8	1,2	0,4
10	0,0	1,4	0,8
15	0,0	1,2	1,2
20	0,0	1,0	1,6

После нейтрализации щелочи и появления избытка протонов угольной кислоты начинает протекать процесс гидролитической полимеризации с выделением осадка алюминия. Для определения химической формы нахождения алюминия в осадках был получен спектр РФА, представленный на рисунке 2.

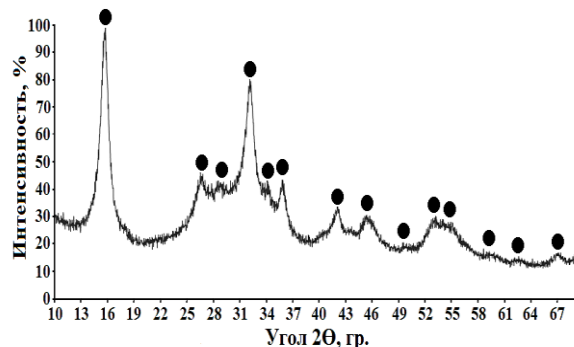


Рисунок 2. Спектр РФА осадка, полученного при осаждении Al из 4,0 М водного раствора NaOH при барботаже 1,5 л/мин CO_2 : ● – Давсонит $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$, карта JCPDS № 45-1359

Figure 2. RFA-spectra of sediment, obtaining during Al precipitation from 4,0 M aqueous solution of NaOH under 1,5 l/min CO_2 bubbling: ● – Dawsonite $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$, card JCPDS № 45-1359

Значительное уширение всех сигналов спектра свидетельствует о высокой доле аморфных частиц осадка. Результаты РФА указывают на наличие только одной рентгено-аморфной фазы в составе осадка, соответствующей согласно данным кристаллографической базы JCPDS № 45-1359 гидроалюмокарбонату натрия – $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$. В то же время фазы, относящиеся к $\text{Al}(\text{OH})_3$ и $\text{Al}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2$, не обнаружены. В литературе [14] приводится несколько иной механизм осаждения гидроалюмокарбоната натрия, заключающийся во взаимодействии гидроксида алюминия с бикарбонатом натрия с образованием $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$ при pH водной фазы ниже 10 и увеличении в ней концентрации ионов HCO_3^- . При гидролитическом разложении $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$ получается псевдобемит ($\text{AlOOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) и аморфный $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Однако в отсутствие второго компонента соединений скандия для полимеризационных превращений, описанных уравнениями (7)–(10) не наблюдается образования смешанного полимера алюминия и скандия. В то же время наличие

двух гидроксильных групп в составе $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$ делает потенциально возможным образование смешанного сополимера со скандием.

Заключение

Выщелачивание скандия из КШ водными растворами карбоната натрия в отсутствие углекислого газа протекает незначительно и сопровождается щелочным гидролизом скандия при высоких значениях pH в концентрированных растворах Na_2CO_3 . При сатурации карбонатной пульпы КШ углекислым газом протекает гидролитическая полимеризация гидрокарбонатов скандия и алюминия в присутствии протона угольной кислоты. Оба процесса (щелочного гидролиза и гидролитической полимеризации) сопровождаются образованием вторичных осадков и снижением выхода скандия в карбонатный раствор. Для повышения извлечения скандия необходимо проводить карбонатное выщелачивание в условиях, исключающих или минимизирующих образование вторичных осадков, особенно при сатурации пульпы углекислым газом.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сабирзянов Н.А., Яценко С.П. Гидрохимические способы комплексной переработки боксита. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 385 с.
- 2 Трушко В.Л., Утков В.А., Бажин В.Ю. Актуальность и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 547–553.
- 3 Пягай И.Н., Кожевников В.Л., Пасечник Л.А., Скачков В.М. Переработка отвального шлама глиноземного производства с извлечением скандиевого концентрата // Записки горного института. 2016. Т. 218. С. 225–232.
- 4 Deelwal K. Evaluation of characteristic properties of red mud for possible use as a geotechnical material in civil construction // International Journal of Advances in Engineering & Technology. 2014. V. 7. № 3. P. 1053–1059.
- 5 Raghavan P.K.N. Recovery of metal values from red mud // Light metals. 2011. P. 23–26.
- 6 Кожевников В.Л., Водопьянов А.Г., Паньков В.А., Кузьмин Б.П. Совместная комплексная переработка бокситов и красных шламов // Цветные металлы. 2013. № 12. С. 36–38.
- 7 Иванов А.И., Кожевников Г.Н., Ситдилов Ф.Г., Иванова Л.П. Комплексная переработка бокситов. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 180 с.
- 8 Пат. № 2483131, RU, C22B 59/00, 3/04, 3/20, C01F 17/00. Способ получения оксида скандия из красного шлама / Пягай И.Н., Яценко С.П., Пасечник Л.А. и др. № 2011153456/02; Заявл. 2011153456; Оpubл. 27.05.2013, Бюлл. № 15.
- 9 Пат. № 2245371, RU, C21B 3/04, 13/00, 34/12, 59/00. Способ переработки красного шлама глиноземного производства / Е.А. Коршунов, С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов, и др. № 2003103262/02; Заявл. 2003103262; Оpubл. 12.04.2005, Бюлл. № 32.

- 10 Анашкин В.С., Фомин Э.С., Яценко С.П. Разработка технологических схем безотходной и комплексной переработки низкокачественных бокситов и красных шламов // Металлургия легких металлов, проблемы и перспективы: тезисы докладов II Международной Научно-практической Конференции, Москва, 22–23 ноября 2006 г. М., 2006. С. 41–45.

- 11 Степанов С.И., Маунг Маунг Аунг, Бояринцев А.В., Гозиян А.В. и др. О комплексной переработке красных шламов // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ и РМ-2017: сборник материалов международной научно-практической конференции 21–22 июня 2017 г. М.: ОАО «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ», 2017. С. 278–281.

- 12 Комиссарова Л.Н., Шацкий В.М., Пушкина Г.Я. и др. Соединения редкоземельных элементов. Карбонаты, оксалаты, нитраты, титанаты. М.: Наука, 1984. 235 с.

- 13 Комиссарова Л.Н. Неорганическая и аналитическая химия скандия. М.: Эдиториал УРСС. 2001. 512 с.

- 14 Томилов Н.П., Бергер А.С., Бойкова А.И. Об условиях образования гидроалюмокарбонатов при взаимодействии алюминия с растворами карбонатов щелочных металлов // Журнал неорганической химии. 1969. Т. 14. № 3. С. 674–680.

REFERENCES

- 1 Sabirzyanov N.A., Yatsenko S.P. Gidrohimicheskie sposoby kompleksnoj pererabotki boksita [Hydrochemical methods for bauxite complexing processing]. Yekaterinburg, Ural. Otd. Russ. Akad. Nauk, 2006. 385 p. (in Russian).
- 2 Trushko V.L., Utkov V.A., Bazhin V.Y. Topicality and possibilities for complete processing of red mud of aluminous production. *Zapiski Gornogo Instituta*. [Proceedings of Mining Institute]. 2017. vol. 227. pp. 547–553. (in Russian).

3 Pyagai I.N., Kozhevnikov V.L., Pasechnik L.A., Skachkov V.M. The Processing of red mud of aluminous production with extraction of Scandium concentrate. *Zapiski Gornogo Instituta*. [Proceedings of Mining Institute] 2016. vol. 218. pp. 225–232. (in Russian).

4 Deelwal K. Evaluation of characteristic properties of red mud for possible use as a geotechnical material in civil construction. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2014. vol. 7. no. 3. pp. 1053–1059.

5 Raghavan P.K.N. Recovery of metal values from red mud. *Light metals*. 2011. pp. 23–26.

6 Kozhevnikov V.L., Vodopyanov A.G., Pankov V.A., Kuzmin B.P. The joint complexing reprocessing of bauxite and red mud. *Zvetnye metalli* [Non-ferrous metals]. 2013. no. 12. pp. 36–38. (in Russian).

7 Ivanov A.I., Kozhevnikov V.L., Sitdikov F.G., Ivanova L.P. The complexing reprocessing of bauxite. *Yekaterinburg, Ural. Otd. Russ. Akad. Nauk*, 2003. 180 p. (in Russian).

8 Pyagai I.N., Yatsenko S.P., Pasechnik L.A. et al. Sposob polucheniya oksida skandiya iz krasnogo shlama [The Method of Scandium oxide production from red mud]. Patent RF, no. 2483131, 2013.

9 Korshunov E.A., Burkin S.P., Loginov Yu.N. et al. Sposob pererabotki krasnogo shlama glinozemnogo proizvodstva [The Method of red mud reprocessing]. Patent RF, no. 2245371, 2005.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей И. Степанов профессор, кафедра технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия, chao_step@mail.ru

Маунг Маунг Аунг аспирант, кафедра технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия, polluxaung@gmail.com

Хтет Йе Аунг аспирант, кафедра технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия, htetyeaung61058@gmail.com

Александр В. Бояринцев доцент, кафедра технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия, boyarin_sanya@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Сергей И. Степанов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Маунг Маунг Аунг обзор литературных источников по исследуемой проблеме

Хтет Йе Аунг провёл эксперимент, выполнил расчёты

Александр В. Бояринцев консультация в ходе исследования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 03.10.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 27.11.2018

10 Anashkin V.S., Fomin E.S. Yatsenko S.P. The Workout of technological circuitry of non-polluting and complexing reprocessing of low-quality bauxite and red muds. *Metallurgiya legkih metallov, problemy i perspektivy* [Metallurgy of lights metals: problems and opportunity: the abstracts of proceedings of II International scientific-practical conference]. Moscow, 2006. pp.41–45. (in Russian).

11 Stepanov S.I., Maung Maung Aung, Boyarintsev A.V., Gosiyan A.V. et al. The complexing processing of red mud. Aktual'nye voprosy polucheniya i primeneniya RZM i RM 2017 [The Problems of Manufacture of R.E.M. and R.M-2017: proceedings of the International scientific-practical conference]. Moscow, JSC «Institute «GINTSVETMET», 2017. pp. 278–281. (in Russian).

12 Komissarova L.N., Shatskiy V.M., Pushkina G.Ya. et al. Soedineniya redkozemel'nyh ehlementov. Karbonaty, oksalaty, nitraty, titanaty [Compounds of Rare Earth Elements. Carbonates, oxalates, nitrates, titanates]. Moscow, Nauka, 1984. 235 p. (in Russian).

13 Komissarova L.N. Neorganicheskaya i analiticheskaya himiya skandiya [Inorganic and Analytical Chemistry of Scandium]. Moscow, Editorial URSS, 2001. 512 p. (in Russian).

14 Tomilov N.P., Berger A.S., Boykova A.I. About conditions of hydroalumocarbonates formation under interaction Aluminum with solutions of alkaline metals carbonate. *Zhurnal neorganicheskoi khimii* [J. of Inorganic Chemistry]. 1969. vol. 14. no. 3. pp. 674–680. (in Russian).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergei I. Stepanov professor, technology of rare elements and nanomaterials based on them department, D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia, chao_step@mail.ru

Maung Maung Aung graduate student, technology of rare elements and nanomaterials based on them department, D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia, polluxaung@gmail.com

Htet Ye Aung graduate student, technology of rare elements and nanomaterials based on them department, D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia, htetyeaung61058@gmail.com

Aleksander V. Boyarintsev associate professor, technology of rare elements and nanomaterials based on them department, D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia, boyarin_sanya@mail.ru

CONTRIBUTION

Sergei I. Stepanov proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Maung Maung Aung review of the literature on an investigated problem

Htet Ye Aung conducted an experiment, performed computations

Aleksander V. Boyarintsev consultation during the study

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 10.3.2018

ACCEPTED 11.27.2018