

неоднородностях массива горных пород. При качественном документировании данные бурения с отбором ориентированного керна хорошо увязываются с известными геологическими структурами месторождения.

Телеметрические исследования требуют наличия специализированного оборудования и предъявляют повышенные требования к качеству подготовки и промывки скважин. Сложность таких исследований компенсируется получением более полного и точного набора структурных данных и, главное, возможностью полноценно оценить литологическую слоистость массива. Кроме того, метод позволяет получить характеристики трещин, ориентированных вдоль направления ствола скважины.

Для полноценной всесторонней оценки структурной неоднородности массива целесообразно использовать комбинацию классического геомеханического описания ориентированного керна и телеметрических исследований. При этом необходимо, по нашему мнению, использовать полный комплекс телеметрических исследований — оптический и акустический. Консолидация данных, полученных разными методами, должна осуществляться с помощью единого интерпретационного словаря, разработанного с учетом геолого-структурных особенностей конкретного месторождения.

Стоимость телеметрических исследований сопоставима со стоимостью работ с отбором ориентированного керна в случае проведения работ силами российской подрядной организации. Это даст возможность комбинировать бурение с отбором ориентированного керна и бурение с телеметрией скважин без существенного увеличения стоимости работ.

Совместное использование данных ориентированного бурения и телеметрических исследований также позволяет осуществлять двусторонний контроль качества данных, получаемых путем сравнения описания ориентированного керна и результатов телеметрии по отдельным контрольным скважинам. Такая схема контроля дает возможность оптимизации объемов геомеханических изысканий для повышения их экономической эффективности без потери качества получаемых данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трушин, С.И. Управление трассами наклонно-направленных скважин при бурении в многолетнемерзлых горных породах со сложной тектоникой / С.И. Трушин, А.И. Осецкий, М.Ю. Малых, А.В. Пак, А.И. Шенгалыц // Разведка и охрана недр. — 2019. — № 8. — С. 32–37.
2. Gwynn, X.P. Combined use of traditional core logging and televiewer imaging for practical geotechnical data collection / X.P. Gwynn, X.C. Brown, J.P. Mohr. Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, 25–27 September 2013 / Dight, P.M. (ed.) Australian Centre for Geomechanics, Nedlands. — pp 261–272.
3. Rien Corstanje Choong Pek Kem Acoustic Borehole Televiewer — Raising the Bar in Geotechnical Site Investigation. <http://geosensor.com.au/wp-content/uploads/Acoustic-Borehole-Televiewer-Raising-the-Bar-in-Geotechnical-Site-Inve....pdf> (10.01.2020 г.).

4. Ureel, S. Rock core orientation for mapping discontinuities and slope stability analysis / S. Ureel, M. Momayes, Z. Oberling // International Journal of Research in Engineering and Technology. Volume 02, issue 7, 2013.

5. Weir, F.M. The future of structural data from boreholes / F.M. Weir // International Journal of Geotechnical Engineering in volume 9, 2015. — pp 223–228.

© Коллектив авторов, 2020

Чужинов Дмитрий Николаевич // ChuzhinovDN@polymetal.ru

Рубчевский Юрий Игоревич // Rubchevskiy_UI@polymetal.ru

Малых Максим Юрьевич // MalyhMY@polymetal.ru

Осецкий Александр Иосифович // Osetskiy@polymetal.ru

Колпаков Виктор Борисович // KolpakovVB@polymetal.ru

Симаков Антон Петрович // SimakovAP@polymetal.ru

УДК 669.712: 615.035.4

Степанов С.И., Бояринцев А.В., Хтет Йе Аунг, Чекмарев А.М. (Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева)

ИЗВЛЕЧЕНИЕ СКАНДИЯ ИЗ КРАСНЫХ ШЛАМОВ И ОТХОДОВ МОКРОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ ТИТАНО-ЖЕЛЕЗО-ВАНАДИЕВЫХ РУД

*Красные шламы (КШ) алюминиевого производства и отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) титано-железо-ванадиевых руд Гусевогорского месторождения рассмотрены как техногенные источники скандия, содержащие более 120 г/т этого редкого элемента. Изучено карбонатное выщелачивание скандия из КШ при сатурации пульпы CO_2 и сернокислотное выщелачивание Sc из отходов ММС. Показано, что основным фактором, снижающим извлечение скандия в карбонатные растворы, является его соосаждение с алюминием, обусловленное гидролитической полимеризацией в присутствии протона угольной кислоты. Извлечение скандия из отходов ММС в сернокислые растворы определяется степенью аморфизации кристаллической структуры диопсида в процессе механоактивации исходного минерального сырья. **Ключевые слова:** скандий, красные шламы, отходы мокрой магнитной сепарации, титано-железо-ванадиевые руды, карбонатное и сернокислотное выщелачивание, переработка техногенного минерального сырья.*

Stepanov S.I., Boyarintsev A.V., Htet Ye Aung, Chekmarev A.M. (Russian University of Chemical Technology named after D.I. Mendeleev)

SCANDIUM EXTRACTION FROM RED SLIMES AND WASTES OF WET MAGNETIC SEPARATION OF TITANIUM-IRON-VANADIUM ORES

Red muds (RM) of aluminium production and wastes of wet magnetic separation (WMS) of titanium-iron-vanadium ores of Gusevogorsk deposit are considered as technogenic sources of scandium containing more than 120 g/t of this rare element. Carbonate leaching of scandium from RM during CO_2 pulp saturation and sulfuric acid leaching of Sc from WMS were

studied. It is shown that the main factor reducing the extraction of scandium into carbonate solutions is its co-precipitation with aluminium due to hydrolytic polymerization in the presence of a carbonic acid proton. Extraction of scandium from WMS into sulfuric acid solutions is determined by degree of amorphous structure of diopside in process of mechanical activation of initial mineral raw material. **Keywords:** Scandium, red muds, waste of wet magnetic separation, titanium-iron-vanadium ores, carbonate and sulfuric leaching, reprocessing of technogenic mineral raw materials.

В настоящее время два отхода крупномасштабной переработки природного минерального сырья можно отнести к техногенным источникам скандия, содержащим до 120 г/т этого редкого и рассеянного элемента: красные шламы (КШ) — многотоннажный отход переработки бокситов и отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) титано-железо-ванадиевых руд Гусевогорского месторождения, Качканарского ГОКа, Свердловской области. Количества накопленных и КШ, и отходов ММС составляют миллиарды тонн и прирастают ежегодно на миллионы тонн.

Если отходы ММС представляют собой в основном источник только скандия, т.к. содержание в них таких элементов как ванадий, титан, железо сравнительно невелико, то КШ можно рассматривать как поликомпонентное сырье, содержащее скандий, алюминий, редкоземельные элементы (РЗЭ), титан, цирконий, железо и в меньших количествах галлий и индий.

Учитывая значительные количества этих отходов, переработка их не может ограничиваться только извлечением скандия, но требует комплексного извлечения всех ценных компонентов и превращения минеральной основы в ликвидные продукты, используемые в различных видах промышленности, преимущественно в металлургии и промышленности строительных материалов. Комплексность переработки и КШ, и отходов ММС, в том числе их минеральной основы, позволит исключить образование вторичных отходов и перейти к постепенной ликвидации обширных шламовых прудов и хранилищ, занимающих большие земельные площади.

В то же время комплексность переработки КШ и отходов ММС подразумевает предварительное извлечение из них скандия, как наиболее дорогостоящего и ценного компонента, последующего извлечения других ценных компонентов и затем уже переработку минеральной основы. Если проводить классификацию этих двух отходов по химическому составу, то КШ можно отнести условно к «щелочному» сырью, переработка которого целесообразна в щелочно-карбонатных средах, а отходы ММС — к «кислотному» сырью, извлечение скандия из которого целесообразно проводить в растворы минеральных кислот. Кроме того, отходы ММС можно отнести к упорному, трудновскрываемому силикатному сырью. Исходя из приведенной химической классификации для извлечения скандия из КШ и отходов ММС, требуется разработка гидрометаллургических методов,

различающихся по своей реагентной составляющей: использованию карбонатно-щелочных растворов при переработке КШ, и кислотных — при переработке отходов ММС.

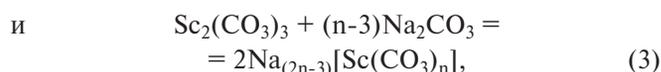
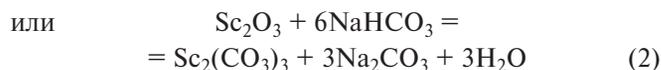
Действительно, для извлечения скандия из КШ разработан карбонатный метод его выщелачивания с последующим извлечением из растворов осаждением щелочными реагентами [5]. Для переработки отходов ММС предложен способ серноокислотного выщелачивания скандия в присутствии, так называемой «фторидной добавки» — кремнефторида натрия, для облегчения вскрытия силикатной матрицы отхода [2]. Оба названных способа извлечения скандия характеризуются своими положительными и отрицательными свойствами. Так, извлечение скандия из КШ в процессах карбонатного выщелачивания по описанному в патенте [3] способу не превышает 17–20 %, что конечно представляется достаточно низким. Введение фторидной добавки при извлечении скандия из отходов ММС позволяет поднять выход скандия в серноокислые растворы до 55–60 %, однако вторичные отходы силикатной основы, сбрасываемые в шламохранилища, загрязняются достаточно токсичным фтором, что повышает стоимость обращения с такими отходами.

В настоящей работе развивается подход, основанный на разработке ключевых стадий в процессах извлечения скандия из КШ и отходов ММС, позволяющих выявить главные факторы, влияющие на полноту его выхода в растворы выщелачивания, и реализовать технологические схемы с высокими показателями по извлечению скандия.

Карбонатное выщелачивание скандия из КШ

В работе использовали КШ «Богословского алюминиевого завода» следующего состава, в масс. %: Al_2O_3 — 14,2, 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, ZrO_2 — 1,11, Sc — 0,0090–0,012, ΣLn — 0,122, со следующим фракционным составом, 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.

Выщелачивание скандия (при его нахождении в КШ в форме оксида) из КШ водными растворами Na_2CO_3 при сатурации пульпы углекислым газом обусловлено протеканием следующих реакций:



CO_2 в таких системах обеспечивает образование протона угольной кислоты, без которого невозможно растворение оксида скандия. Кинетические кривые

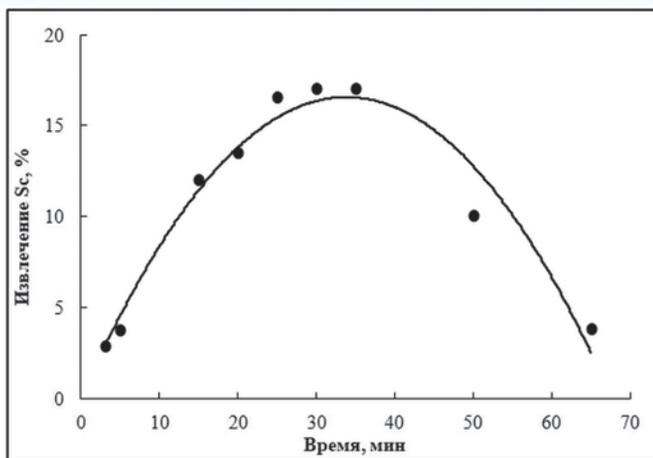
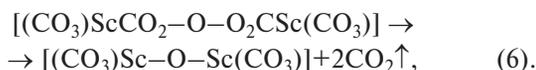
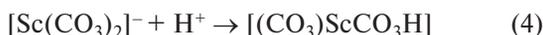


Рис. 1. Зависимость извлечения Sc от времени при выщелачивании из КШ 1,2 М раствором Na_2CO_3 и барботаже CO_2 . Условия выщелачивания: Т:Ж=1:5, расход CO_2 — 1,5 л/мин, $t = 70 \pm 5$ °С, исходная концентрация скандия в КШ — 100 г/т

выщелачивания, полученные для различных условий проведения процесса (рис. 1) проходят через максимумы, что обусловлено вторичным осадкообразованием.

Анализ причин выделения скандия из карбонатных растворов в форме вторичных осадков позволил сформулировать гипотезу о гидролитической полимеризации его карбонатных соединений в присутствии того же протона угольной кислоты [1]. Этот процесс может быть описан следующими уравнениями:



Сатурация углекислым газом модельных карбонатных растворов, содержащих до 1,5 г/л Sc, не обнаружила образование вторичных осадков даже при длительном барботаже CO_2 и изменении температурного и концентрационного режимов.

Однако в конкретных КШ содержатся разнообразные примеси, которые также могут переходить в карбонатные растворы. Наиболее вероятным компонентом, который может переходить в растворы при карбонатном выщелачивании и претерпевать гидролитическую полимеризацию по схеме, описанной уравнениями (4–6), является остаточный алюминий. Для проверки гипотезы о гидролитической полимеризации алюминия в карбонатно-щелочных растворах при их сатурации CO_2 , был проведен барботаж углекислого газа через 4,0 М водный раствор NaOH выщелачивания КШ, содержащий 0,61 г/л Al (рис. 2). Через 15–30 мин проведения сатурации весь алюминий был переведен во вторичный осадок. Таким образом, была подтверждена гипотеза протека-

ния гидролитической полимеризации в карбонатных растворах в присутствии избытка протонов угольной кислоты.

Для объяснения осаждения скандия во вторичные осадки при карбонатном выщелачивании в присутствии CO_2 была предложена схема образования смешанных Al-Sc гидролитических осадков, описываемая уравнениями (7–10):

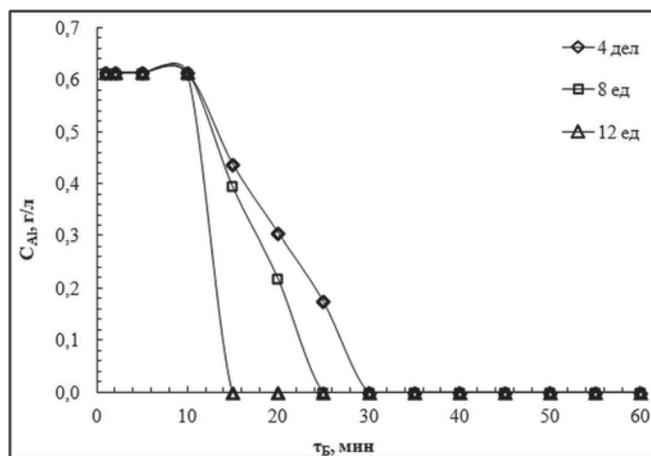
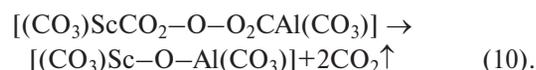
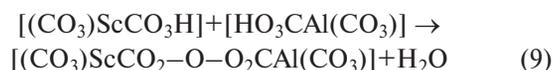


Рис. 2. Кинетика осаждения Al при барботаже CO_2 через раствор выщелачивания КШ 4,0 М водным раствором NaOH , содержащим 0,61 г/л Al, при расходе CO_2 , л/мин: 0,5 — 4 ед; 1,0 — 8 ед.; 1,5 — 12 ед.

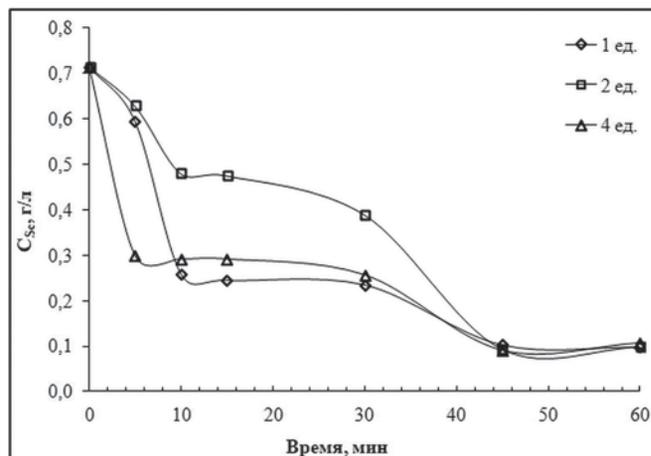


Рис. 3. Кинетика осаждения Sc при барботаже CO_2 через смешанный щелочно-карбонатный раствор, содержащий 0,55 г/л Al и 0,71 г/л Sc при расходе CO_2 , л/мин: 0,125 — 1 ед; 0,25 — 2 ед.; 0,5 — 4 ед

Таблица 1
Карбонатное выщелачивание Sc из КШ при сатурации и обработке пульпы УЗ

Стадия выщелачивания	Объем р-ра Na ₂ CO ₃ , мл	C _{Sc} , мг/л	P _{Sc} , по водн. фазе, %	C _{Sc} в кеке, %	P _{Sc} , по тв. фазе, %
1-1	150	6,50	53(54,1)	—	—
1-2	(130+20)	—	—	0,0049	59,1
2-1	(130+20)	10,75	36(44,7)	—	—
2-2	(130+20)	—	—	0,0053	55,8

Эта схема была подтверждена экспериментально на модельном растворе, содержащем 0,55 г/л Al и 0,71 г/л Sc в 0,12 М NaOH + 0,25 М Na₂CO₃ (рис. 3). В смешанный осадок было переведено 83,6 % Al и 85,9 % Sc. Полученные данные показали, что Sc соосаждается из карбонатных растворов только в присутствии Al в рассмотренной области концентраций. РФА по кристаллографической базе JCPDS позволил выявить следующие фазы в осадке: ScOOH (карта № 72–0360), Al₅(CO₃)₃(OH)₁₃·xH₂O (карта № 42–0588), AlO(OH) (карта № 83–1505) и NaAlCO₃(OH)₂ (карта 45–1359).

Проведенные исследования показали, что основной причиной перехода скандия во вторичные осадки при выщелачивании из КШ водными растворами Na₂CO₃ в присутствии газообразного CO₂ является его гидролитическая полимеризация с другими примесями, переходящими в карбонатный раствор, и преимущественно с алюминием.

Для предотвращения образования смешанных гидролитических осадков скандия и алюминия были разработаны условия проведения карбонатного выщелачивания при оптимизации исходного состава карбонатного раствора и расхода CO₂ (табл. 1), что позволило повысить выход скандия в карбонатные растворы (P_{Sc}) до ~ 60 %, т.е. практически в три раза.

Остаточные ~ 40 % Sc не удается извлечь в карбонатные растворы в предлагаемом процессе, что обусловлено, по-видимому, изоморфным вхождением Sc в кристаллическую решетку неразлагаемых в карбонатных растворах алюмосиликатов.

Другим вариантом повышения выхода скандия в растворы выщелачивания является предварительное удаление остаточного алюминия, растворимого в щелочных растворах. С этой целью было изучено выщелачивание алюминия водой и водными растворами NaOH, в том числе при использовании остаточного гидроксида натрия, содержание которого в КШ достигает 5 %. Максимальное извлечение алюминия в щелочные растворы из КШ не превысило 30 % от его исходного содержания в КШ даже после предварительного спекания с Na₂CO₃ или NaOH (табл. 2).

Тем не менее, эта стадия, проведенная перед карбонатным выщелачиванием Sc, также позволила повысить его выход до 55–60 %. Другим положительным эффектом щелочного выщелачивания алюминия из КШ является его обогащение по железу, что в сочетании с карбонатным выщелачиванием скандия и сопутствующих редких металлов, таких как РЗЭ,

цирконий, титан, позволяет получать конечные остатки, содержащие до 70–80 % Fe₂O₃. Последующее гранулирование железосодержащих остатков и восстановительная плавка позволяют получить металлическое железо или чугун, что позволяет вовлечь в конечную переработку значи-

тельную составную часть КШ. В образующийся при восстановительной плавке шлак переходят остатки скандия, РЗЭ, титана и других примесей, недоизвлеченных в процессах щелочного и карбонатного выщелачиваний. Учитывая незначительное количество таких шлаков по сравнению с исходным объемом КШ, они могут быть в дальнейшем переработаны кислотными методами с достаточно полным выделением всех ценных компонентов.

Сернокислотное выщелачивание скандия из отходов ММС

Отходы ММС относятся к упорному типу сырья, и лишь с большим трудом поддаются вскрытию традиционными гидрометаллургическими методами. Отходы ММС представлены следующими минералами: диопсидом — Ca(Mg,Al)(Si,Al)₂O₆, аугитом — Ca(Mg,Fe³⁺,Al)(Si,Al)₂O₆, диоксидом титана — TiO₂. Скандий находится в отходах ММС в форме оксида — Sc₂O₃.

Для выщелачивания скандия из отходов ММС было предложено использовать серную кислоту, однако без дополнительных реагентов или применения специальной обработки скандий практически не извлекается в сернокислые растворы. В варианте технологической схемы, разработанной во ВНИИХТе [2], для повышения извлечения скандия при сернокислотном выщелачивании использовали ускоряющую добавку — кремнефторид натрия в количестве от 30 до 50 кг/т отходов ММС, что породило проблемы с утилизацией фтора, сбрасываемого в отвалы.

Для повышения извлечения скандия из отходов ММС в технологической схеме, разработанной в РХТУ им. Д.И. Менделеева было предложено про-

Таблица 2
Извлечение Al из спеков КШ с NaOH, полученных при 900 °С при выщелачивании водой при 100 °С и Т:Ж=1:10

Время, мин	Количество NaOH, взятое на спекание, %				
	5	10	15	20	25
	Степень извлечения алюминия, P _{Al} , %				
0	0	0	0	0	0
10	3,15	11,54	13,11	20,45	20,97
30	3,67	14,16	17,83	27,26	30,41
60	7,34	15,73	19,40	25,69	29,36
120	5,24	12,58	22,55	24,12	26,22

Таблица 3
Влияние аморфизации на извлечение Sc из отходов ММС при выщелачивании H₂SO₄

A, %	60–70	60–80	80–90
α _{Sc} , %	65–70	75–85	90–95

Таблица 4
Извлечение Sc в растворы H₂SO₄ после обработки отходов ММС в Активатор-500

№ прохода	1	2	3	4	5	6
ММС II, α _{Sc} , %	16	23	45	43	55	70
ММС III, α _{Sc} , %	26	26	55	42	56	60

водить предварительную механообработку в энергонасыщенных механоактиваторах [4, 6]. Как было установлено, основным протекающим процессом в активаторе является аморфизация кристаллической структуры диоксида, который составляет более 90 % отходов ММС.

В настоящей работе были использованы отходы ММС Качканарского ГОКа, содержание элементов в которых варьировалось в интервале, в масс. %: Ti — 0,43–0,77; V — 0,04–0,13; Fe — 6,64–7,27; Al — 1,46–1,55; Ca — 11,25–12,07; Mg — 7,82–8,37; Si — 16,31–17,23; O — 51,30–51,46. Содержание Sc — 40–100 г/т. Механообработку твердых отходов ММС проводили на лабораторных активаторах марки Активатор 2SL, АГО-2У, Pulverisette 5, и в промышленных аппаратах «Активатор 500» и МП5. Эффективность механоактивации определяли по степени аморфизации кристаллической структуры после механообработки. Степень аморфизации (A) оценивали по соотношению интенсивностей основного рефлекса исходного (H₀) и измельченного (H_i) минерала: $A = (H_0 - H_i) / H_0$.

Проведенные исследования показали, что с увеличением времени механообработки и соотношения массы мелющих тел к массе отхода ММС происходит увеличение аморфизации кристаллических образцов. Максимальная степень аморфизации при обработке в Активатор-2SL за 15 мин при массовом отношении проба ММС: мелющие тела = 1:10 достигала 70 %, а при увеличении времени до 1 часа при обработке в Pulverisette 5 — 85 %. При увеличении центробежного ускорения в АГО-2У до 60 g и массового отношения проба отходов ММС : мелющие

тела до 1:20, степень аморфизации возросла до 95 %, но наблюдался рост агрегации частиц порошка и его уплотнение.

Для определения эффективности механоактивации проводили контрольное выщелачивание Sc из активированных образцов при следующих условиях: C_{исх.} H₂SO₄ — 300 г/л, T:Ж = 1:7, T_{выщ.} — 95°C, время выщелачивания 5 ч. Извлечение Sc в сернокислый раствор (α_{Sc}) рассчитывали по его остаточному содержанию в отфильтрованном, отмытом до нейтральной реакции и высушенном при 100°C кеке. Данные по влиянию степени аморфизации на извлечение скандия в сернокислые растворы представлены в табл. 3, которые подтверждают установленную корреляцию степени аморфизации отходов ММС, достигнутой при механоактивации на планетарно-центробежных активаторах, с извлечением Sc в сернокислый раствор. При переходе к промышленным мельницам Активатор-500 и Активатор-5000 наблюдается иная картина. Аппараты этого типа относятся к центробежно-эллиптическим шаровым мельницам. Эффективность помола определяется количеством проходов через размольную трубу активатора. Чем больше повторных проходов размываемого материала через мельницу, тем большие нарушения в структуре претерпевает обрабатываемый материал. Достигаемые величины степени аморфизации при этом не превышали 20–25 %. Однако извлечение Sc достигает 70 % с ростом числа проходов (табл. 4). Таким образом, активация в промышленных центробежно-эллиптических шаровых мельницах позволяет достигать извлечение Sc на уровне 70–75 %, что удовлетворяет крупнотоннажной переработке отходов ММС.

Для оптимизации условий сернокислотного выщелачивания Sc предварительно проводили балансовые опыты с образцами, подвергнутыми механообработке на различных активаторах. В табл. 5 представлены балансы по выщелачиванию скандия из отходов ММС, активированных в аппарате АГО-2У. Время обработки — 15 мин при ускорении 40 g. Отношение масс образец : мелющие стальные шары диаметром 8–9 мм = 1:20.

Аналогичные данные были получены для отходов ММС, обработанных в мельнице Pulverisette 5. Для балансового опыта было проведено выщелачивание растворами 300 г/л H₂SO₄. Извлечение Sc составило 83 %, при степени аморфизации образцов ~ 85 %.

Таблица 5
Распределение Sc при выщелачивании из отходов ММС, активированных на АГО-2У

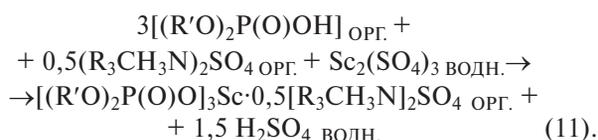
Исходные реагенты			Фильтрат			Промывной раствор			Кек		α _{Sc} , % (по кеку)	α _{Sc} , % (по р-ру)	
m, г	V H ₂ SO ₄ *, мл	V H ₂ O, мл	m Sc, мг	V _ф , мл	C _{Sc} , мг/л	m _{Sc} , мг	V _{пр.р.} , мл	C _{Sc} , мг/л	m _{Sc} , мг	m, г			C _{Sc} , г/т
Серная кислота, 300 г/л													
43	50	250	4,472	285	10,0	2,85	230	0,8	0,25	37,9	26	75	70,5
Серная кислота, 150 г/л													
25	41	135	2,6	250	7,1	1,78	180	0,64	0,12	23,0	24	76,9	73,0

Содержание Sc в растворах повысилось до 13 мг/л, а в твердом остатке снизилось до 18 г/т. Безвозвратные потери H_2SO_4 составили от 589 до 675 кг/т отходов ММС или 67,2÷77,1% от максимальных потерь на сульфатизацию.

При переработке опытной партии использовали 50 кг отходов ММС, обработанных на мельнице Активатор-500. Аморфизация после механообработки не превышала 30 %. Выщелачивание проводили раствором 300 г/л H_2SO_4 при Т:Ж=1:7, Т=95 °С, 4 часа. Объем фильтрата составил 1700 мл, C_{Sc} в фильтрате — 7,0 мг/л, $C_{H_2SO_4}$ — 255 г/л. Объем промывных вод: 1-я промывка — 805 мл, C_{Sc} — 2,0 мг/л, $C_{H_2SO_4}$ = 45,6 г/л, 2-я промывка — 785 мл, $C_{H_2SO_4}$ = 6,6 г/л. Масса сухого остатка после выщелачивания — 297 г. Содержание Sc в сухом остатке 32 мг/т, α_{Sc} в раствор по водной фазе — 63,7%, α_{Sc} в раствор по твердой фазе — 64,4 %. Безвозвратные потери H_2SO_4 на сульфатизацию — 453–579 кг на 1 т отходов ММС, 51,7–66,9 %.

Наряду со Sc в серноокислые растворы переходят примеси других элементов. Их содержание в растворе выщелачивания из отходов ММС II представлено в табл. 6, из которой следует, что хорошо растворимые сульфаты Mg, Fe, Al, а также V достаточно полно переходят в раствор.

Последующую переработку серноокислых растворов Sc осуществляли экстракционным методом с использованием в качестве экстрагента бинарной смеси сульфата метилтриалкиламмония (МТАА) и ди-2-этилгексилфосфорной кислоты (Д2ЭГФК) в толуоле [7]. Экстракция Sc из серноокислых растворов смесью Д2ЭГФК+сульфат МТАА может быть описана следующим уравнением:



В зависимости от условий проведения экстракции скандия 0,4–0,9 М изомольными растворами смесей Д2ЭГФК+сульфат МТАА в толуоле из серноокислых растворов выщелачивания концентрация Sc в органической фазе достигает 350–400 мг/л, при остаточной концентрации в рафинате от 0,02 до 2 мг/л.

Реэкстракцию Sc из экстрактов проводили водными растворами Na_2CO_3 , NaOH и их смесей. Для эффективного осаждения Sc из экстрактов в черновой скандиевый концентрат (ЧСК) был выбран водный раствор, содержащий 12 % Na_2CO_3 +1 % NaOH. Реэкстракция Sc в этих условиях составляла ~ 95 %, а степень осаждения Sc в ЧСК ~ 96 %. С учетом того,

Таблица 6
Извлечение примесей в раствор при выщелачивании H_2SO_4 отходов ММС

Элемент	Mg	V	Fe	Al	Ti	Ca	Si
Концентрация в растворе, г/л	12,3	0,033	7,2	4,5	0,44	0,19	0,052
Извлечение, %	100	100	80,1	77,8	65	1,8	0,2

Таблица 7
Состав ЧСК, полученного из органического экстракта, содержащего 350 мг /л Sc

Элемент	Sc	SiO ₂	Ti	Fe	Al	Mg	Ca	V
Содержание, %	7,70	21,3	15,0	8,00	0,20	0,52	0,83	0,16

что насыщенная органическая фаза содержала значительные количества соэкстрагированной H_2SO_4 , перед реэкстракцией проводили три последовательные промывки водой при 30–40 °С и О:В=1:1. Концентрация Sc в промывных водах 1-й промывки достигала — 0,005 мг/л, H_2SO_4 — 0,8–0,9 М, 2-й и 3-й промывках — менее 0,001 мг/л Sc и ~ 0,4 М и 0,05 М H_2SO_4 . В зависимости от содержания Sc в экстрактах получали 2–8 % ЧСК. Реэкстракция из экстрактов с более 300 мг/л Sc позволяла получать ЧСК, содержащий до 8 % Sc (табл. 7).

Дальнейшую переработку ЧСК с получением оксида скандия чистотой 99,9–99,99 % проводили экстракционным методом из азотнокислых растворов с использованием фосфиноксидов (ФОР, ТОФО) в углеводородном разбавителе в качестве экстрагентов. Необходимо отметить, что такая экстракционная переработка может быть использована и для ЧСК, полученного из КШ, и для ЧСК, полученного из отходов ММС. Так, из ЧСК отходов ММС был получен оксид скандия чистотой 99,978 % с содержанием металлических примесей не более 0,022 % (Сертификат химического состава №3058-13 от 14 марта 2013 г.).

Заключение

Ключевым фактором, определяющим извлечение скандия из КШ при карбонатном выщелачивании и сатурации пульпы углекислым газом, является образование вторичных осадков за счет гидролитической полимеризации скандия с алюминием и некоторыми другими растворимыми примесями в присутствии протона угольной кислоты. Оптимизация условий, снижающих или устраняющих протекание этого процесса, позволяет повысить извлечение скандия в карбонатные растворы в 3–3,5 раза.

Эффективность извлечения скандия из отходов ММС в процессе серноокислотного выщелачивания определяется предварительной механоактивацией минерального сырья с аморфизацией кристаллической структуры отходов, представленных на 90–95 % силикатным минералом диопсидом. С ростом аморфизации до 90–95 % степень извлечения скандия в раствор также возрастает до 90–95 %. Последующая экстракционная переработка серноокислых растворов выщелачивания скандия позволяет получить 2–8 % ЧСК, экстракционная переработка которого позволяет получать оксид скандия чистотой 99,9–99,99 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бояринцев, А.В. Химические аспекты карбонатного выщелачивания скандия из красных шламов / А.В. Бояринцев, Маунг Аунг Маунг, Йе Аунг Хтет, С.И. Степанов, В.Г. Гиганов, А.М. Чекмарев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. — 2018. — Т. 80. — № 4. — С. 301–309.
2. Быховский, Л.З. Скандий России: перспективы освоения минерально-сырьевой базы и развития производства / Л.З. Быховский, В.В. Архангельская, Л.П. Тигунов, С.И. Ануфриева // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая, № 22. — М.: Изд-во ВИМС, 2007. — 45 с.
3. Патент RU 2247788 РФ, МПК C22B59/00, 3/04, 3/20, C01F17/00. Способ получения оксида скандия из красного шлама / Яценко С.П., Сабирзянов Н.А., Пасечник Л.А. и др. Заявка № 2003119050/02; заявл. 24.06.2013; опубл. 10.03.2005. Бюл. № 7.
4. Патент RU № 2094374 РФ, МПК C01F17/00, B09B3/00. Способ извлечения скандия из кремнийсодержащих материалов / Степанов С.И., Ильенок А.А., Чижевская С. В., Ключников М. И., Мусаев В.В. Заявитель и патентообладатель федеральный институт промыш-

ленной собственности, отделение ВПТБ. Заявка № 96111651/25; заявл. 11.06.96; опубл. 27.10.97.

5. Сабирзянов, Н.А. Гидрохимические способы комплексной переработки бокситов / Н.А. Сабирзянов, С.П. Яценко. — Екатеринбург: УРО РАН, 2006. — 386 с.
6. Степанов, С.И. Применение механоактивации для повышения извлечения скандия из трудноосквашиваемого силикатного сырья / С.И. Степанов, Хейн Пьей, А.В. Бояринцев, В.Г. Гиганов // Химическая технология. — 2017. — № 10. — С. 450–455.
7. Степанов, С.И. Экстракция скандия из сернокислых растворов смесями Д2ЭГФК и сульфата МТАА в толуоле / С.И. Степанов, Хейн Пьей, А.В. Бояринцев, В.Г. Гиганов, Маунг Маунг Аунг, А.М. Чекмарев // Химическая технология. — 2016. — № 10. — С. 466–470.

© Коллектив авторов, 2020

Степанов Сергей Илларионович // chao_step@mail.ru
Бояринцев Александр Валентинович // boyarin_sanya@mail.ru
Хтет Йе Аунг // htetyeaung61058@gmail.com
Чекмарев Александр Михайлович // chekmarv@muctr.ru;

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 553.041+553.3072

Турамурастов И.Б. (ГП «Институт повышения квалификации» Госкомгеологии РУз), Ежков Ю.Б., Халилов А.А. (ГП «Институт минеральных ресурсов» Госкомгеологии РУз)

К СТРАТЕГИИ СОЗДАНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

В последние годы неуклонно растет добыча и потребление редкоземельных элементов (РЗЭ) в мире, связанных с резко возросшими потребностями высокотехнологичных отраслей промышленности. В статье обосновывается возможность создания собственной минерально-сырьевой базы РЗЭ. В Узбекистане известны проявления редкоземельной минерализации, однако месторождений не выявлено. Изучен характер распределения РЗЭ в различных геологических формациях мира и Узбекистана в сравнительном аспекте, выделены геологические позиции для дальнейшего изучения и разработана стратегия создания МСБ РЗЭ в Узбекистане. **Ключевые слова:** редкоземельные элементы, минерально-сырьевая база, стратегия развития, генетические типы, рудная формация, экспертная оценка.

Turamuratov I.B. (GP «Institute of Skills Development» of Goskomgeologiya of RUz), Yezhkov Yu.B., Khalilov A.A. (GP «Institute of Mineral Resources» Goskomgeology RUz)

TO THE STRATEGY OF CREATION OF MINERAL AND RAW MATERIAL BASE OF RARE-EARTH ELEMENTS OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

In recent years, the production and consumption of rare earth elements (REE) in the world has been steadily growing due to the sharply increased needs of high-tech industries. This

article substantiates the possibility of creating its own mineral resource base of REE. In Uzbekistan, manifestations of rare earth mineralization are known, but no deposits have been identified. The nature of the distribution of REE in various geological formations of the world and Uzbekistan in a comparative aspect has been studied, geological positions have been identified for further study and a strategy has been developed for creating a mineral resource base of REE in Uzbekistan. **Keywords:** rare earth elements, mineral resource base, development strategy, genetic types, ore formation, expert assessment.

В Республике Узбекистан редкоземельные элементы (лантаноиды), к которым по близости физико-химических свойств относится и иттрий, на сегодня являются нетрадиционным, промышленно не востребуемым видом сырья. Однако уже многие годы известен факт нахождения весьма повышенных содержаний лантана — до 0,58 %, церия — до 1,49 %, иттрия — 0,47–1,34 % среди уран-ванадатовых руд месторождений в углеродисто-кремнистых образованиях нижнего палеозоя в южной части Центральных Кызылкумов. На этом основании многие исследователи считают возможным отнести руды подобных месторождений к комплексным уран-ванадий-редкоземельным. Имеются и другие примеры установления повышенных концентраций элементов Y-Ce редкоземельной группы, например, в фосфоритовых рудах Кызылкумского региона, в сидеритах каолиновой коры выветривания в подугольной толще Ангренского бурогоугольного месторождения, в глинисто-горючесланцевой металлонасыщенной субстанции эоценового возраста в различных регионах республики, в альбититах и лейкогранитах, пегматитах щелочных интрузивов Чаткало-Кураминского региона, в рудах месторождений благородных металлов и др.