

экономические параметры — по сути, важнейший решающий фактор для принятия управленческих решений о разработке проекта (рентабельность проекта, приведенный дисконтированный доход) резко возрастают, а сроки окупаемости снижаются.

#### Заключение

Для комплексных уникально богатых ниобий-редкоземельных пироксид-монацит-крандаллитовых руд, оцененных в пределах Северного и Южного участков Томторского рудного поля, несмотря на невысокую относительную долю в суммарной товарной продукции (менее 20 %), предложен методический подход к подсчету запасов по условному ниобию. Основная причина приведения всего спектра полезных компонентов ( $TR_2O_3$ ) к условному ниобию — стабильная цена на ниобиевую продукцию (феррониобий) при наличии устойчивого спроса на мировом рынке в течение длительного периода. Редкоземельные элементы, имеющие максимальный вес в стоимости товарной продукции (65,7 %), напротив, имеют высокую волатильность цен на индивидуальные оксиды и нестабильность спроса на мировом рынке при продолжающейся неопределенности спроса на редкоземельную продукцию на внутреннем российском рынке. Разработанное для руд Северного и Южного участков технико-экономическое обоснование кондиций позволило выполнить подсчет запасов уникальных руд по условному компоненту по кат.  $C_1$  и  $C_2$ , подтвердивший реальную возможность отработки уникальных руд в современных условиях, подсчитанных по бортовому содержанию условного ниобия от 0,7 до 1,6 % и эффективному сроку окупаемости вложений от 7 до 9 лет. Гибкое управленческие рисками, т.е. снижение стандартной ставки дисконтирования, например, с 15 до 12 % или до 10 % возможно, исходя из достоверности и точности введения экономических параметров проекта, а также в условиях стабильности текущих и прогнозных макроэкономических показателей. Это позволяет резко повысить рентабельность и приведенный дисконтированный доход проекта, снизить сроки окупаемости.

*Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ 18-17-00120 «Геологические, минералогические, геохимические и физико-химические условия формирования уникального комплексного редкоземельного и редкометалльного оруденения томторского типа».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский, Л.З. Задачи дальнейшего изучения Томторского рудного поля с целью повышения его инвестиционной привлекательности / Л.З. Быховский, Е.И. Котельников, Е.Г. Лихникевич, В.С. Пикалова // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 9. — С. 20–25.
2. Быховский, Л.З. Редкометалльное сырье России: перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы / Л.З. Быховский, Н.А. Архипова // Разведка и охрана недр. — 2016. — № 11. — С. 26–30.
3. Кравченко, С.М. Скандиево-редкоземельно-иттриево-ниобиевые руды — новый тип редкометалльного сырья / С.М. Кравченко, А.Ю. Беляков, А.И. Кубышев, А.В. Толстов // Геология рудных месторождений. — 1990. — Т. 32. — № 1. — С. 105–109.
4. Лазарева, Е.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) / Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик, Н.Л. Добрецов, А.В. Толстов, Б.Л. Щербов, Н.С. Карманов, Е.Ю. Герасимов, А.В. Брянская // Геология и геофизика. — 2015. — Т. 56. — № 6. — С. 1080–1115.

5. Лапин, А.В. Минерагеня кор выветривания карбонатитов / А.В. Лапин, А.В. Толстов. — М.: ГЕОКАРТ. ГЕОС, 2011. — 308 с.
6. Похиленко, Н.П. Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов / Н.П. Похиленко, В.А. Крюков, А.В. Толстов, Н.Ю. Самсонов // ЭКО. — 2014. — № 2 (476). — С. 22–35.
7. Рылов, Д.А. Перспективы и способы отработки Томторского рудного поля / Д.А. Рылов, А.П. Слепцов, А.В. Толстов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — № 3. — С. 168–175.
8. Толстов, А.В. Промышленные типы месторождений в карбонатитовых комплексах Якутии / А.В. Толстов, А.Р. Энтин, А.А. Тянь, А.Н. Орлов. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1995. — 168 с.
9. Толстов, А.В. Главные рудные формации Севера Сибирской платформы. МПР РФ. Федеральное агентство по недропользованию. РАН / А.В. Толстов. — М.: ИМГРЭ, 2006. — 212 с.
10. Толстов, А.В. Особенности формирования уникального редкометалльного месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения / А.В. Толстов, А.Д. Коноплев, В.И. Кузьмин // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 6. — С. 20–25.
11. Толстов, А.В. Инвестиционная привлекательность Томторского месторождения и перспективы ее повышения / А.В. Толстов, Н.П. Похиленко, А.В. Лапин, В.А. Крюков, Н.Ю. Самсонов // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 9. — С. 25–30.
12. Энтин, А.Р. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия) / А.Р. Энтин, А.И. Зайцев, Н.И. Ненашев, В.Б. Василенко, А.И. Орлов, О.А. Тянь, Ю.А. Ольховик, С.И. Ольштынский, А.В. Толстов // Геология и геофизика. — 1990. — Т. 31. — № 12. — С. 42–51.

© Коллектив авторов, 2019

Слепцов Афанасий Петрович // sleptsoffap@gmail.com  
Толстов Александр Васильевич // tolstovav@alrosa.ru  
Мамашев Александр Вячеславович // a.tomashev@mail.ru  
Самсонов Николай Юрьевич // samsonovNYu@alrosa.ru  
Баранов Леонид Николаевич // geoleo@igm.nsc.ru

УДК 546.631:553.068.3+622.775

Руденко А.А.<sup>1</sup>, Трошкина И.Д.<sup>2</sup>, Данилов А.А.<sup>3</sup>  
(1 — ФГБУ «ВИМС», 2 — РХТУ им. Д.И. Менделеева,  
3 — ООО «Золотой Запас»)

#### ОПЫТ ПОЛУЧЕНИЯ СКАНДИЕВОГО КОНЦЕНТРАТА ИЗ МАТЕРИАЛА КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

*Приведены результаты изучения скандийсодержащих латеритных кор выветривания в Кооперативной Республике Гайана и возможности получения товарной продукции — черного скандиевого концентрата. Разработаны основные направления оптимизации условий сорбции/экстракции, концентрирования первичного элюата, осаждения и очистки первичного концентрата скандия. Ключевые слова: выщелачивание, концентрат, кора выветривания, латериты, минералы, редкие металлы, ресурсы, скандий, сорбция, экстракция, элюат.*

Rudenko A.A.<sup>1</sup>, Troshkina I.D.<sup>2</sup>, Danilov A.A.<sup>3</sup> (1 — VIMS, 2 — RHTU of D.I. Mendeleev, 3 — Gold Reserves)

#### EXPERIENCE OF RECEIVING THE SCANDIUM CONCENTRATE FROM AERATION BARK MATERIAL

*The results of the study of scandium-containing laterite weathering crusts in the Cooperative Republic of Guyana and the possibility of obtaining commercial products — draft scandium concentrate. The main directions of optimization of conditions*





колебалась в районе 3 600 долл. США/кг. В последнее время наблюдается снижение цены на оксид скандия до 1 000–1 500 долл. США/кг. В Австралии при выполнении предварительного ТЭО применялись цены на оксид скандия 1 200–3 500 долл. США/кг.

Участок геологоразведочных работ (ГРР) ООО «Золотой Запас» находится в административном округе Сууни-Mazaгуни Кооперативной Республики Гайана, в 200 км от ее столицы — Джорджтауна (рис. 1). В геологическом отношении расположен в пределах Гвианского щита, сложенного гнейсами, гранитами, метавулканиками и метаосадочными породами архей-протерозойского возраста. Одним из основных структурных элементов Гвианского щита является гранит-зеленокаменный комплекс Birimian, в который входит надгруппа зеленокаменных поясов Barama-Mazaгуни. Зеленокаменные породы надгруппы Barama-Mazaгуни и гнейсы архей-протерозойского возраста прорваны интрузиями гранитов Trans-Amazonian серии, а также основными и ультраосновными породами раннего-среднего протерозоя. Фация метаморфизма пород зеленокаменного пояса преимущественно амфиболитовая.

В течение третичного периода метаморфические и интрузивные породы в результате интенсивного химического выветривания повсеместно преобразованы в латериты и латеритоподобные породы, характеризующиеся накоплением железа и алюминия, вплоть до образования промышленных месторождений бокситов. В окисленных породах происходит накопление сидерофильных и халькофильных элементов (Mn, V, Ga, Cu, Ni, Co, Zn), а также редкоземельных элементов и скандия.

Благоприятными факторами для формирования кор выветривания и локализации скандиевого оруденения являются:

- геологические — развитие метаморфических пород основного состава — амфиболитов, амфиболовых сланцев, пироксенитов, обогащенных скандием;
- неотектонические — блоки, характеризующиеся длительным тектоническим покоем и медленным поднятием, что в условиях жаркого и влажного климата привело к образованию мощных латеритных кор выветривания;

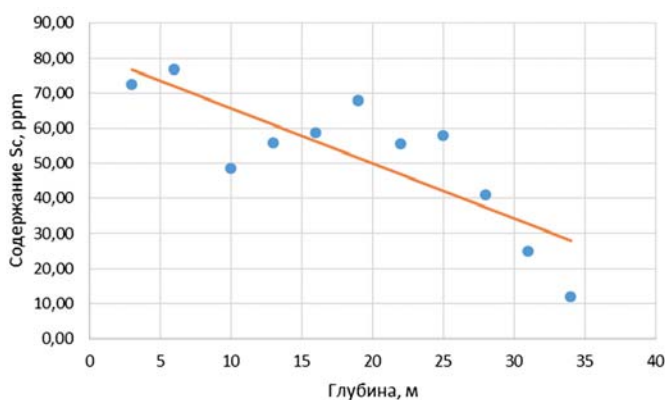


Рис. 2. Участок Октябрьский. Скв. 1030. Характер распределения скандия в коре выветривания амфиболитов

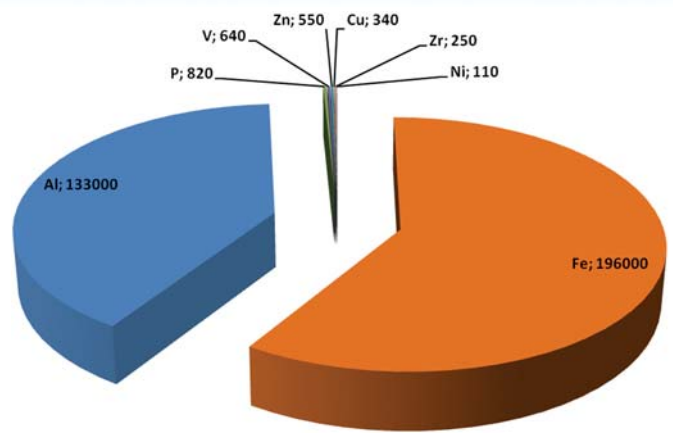


Рис. 3. Элементарный состав основных породообразующих компонентов, г/т

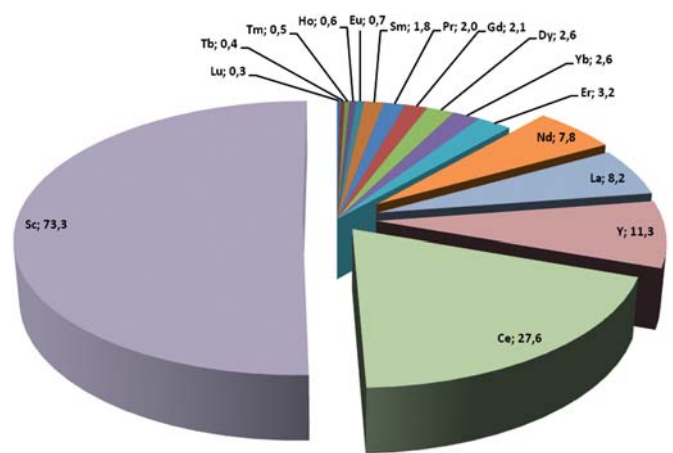


Рис. 4. Содержание скандия, иттрия и других РЗЭ в материале коры выветривания, г/т

— геоморфологические — холмистый рельеф с относительно пологими склонами, что обеспечивает сохранность коры выветривания и благоприятные гидрогеологические, горно-геологические и горнотехнические условия.

Эти факторы в полной мере проявлены на лицензионной площади Араматта, где проводились поисковые и разведочные работы на рудное золото. По данным бурения мощность коры выветривания достигает 35 м.

В составе коры выделяются (сверху-вниз):

— Зона бесструктурной коры выветривания кирпично-красного, буровато-коричневого цвета с древесной железистых обломков (пизолитами) — наиболее зрелая кора, залегает в самой верхней части отложений. Мощность варьирует от 0,5 до 20,0 м. С известной долей условности эти коры выветривания можно назвать «латеритоподобными», в отдельных случаях они могут отвечать латеритам.

— Зона глинистой бесструктурной пятнисто окрашенной коры выветривания. Преобладающие тона окраски — красновато-коричневые, розовато-красные с пятнами и слоями светло-желтого, желтого оттенков. Мощность изменяется от 1,5 м до 8,0 м.

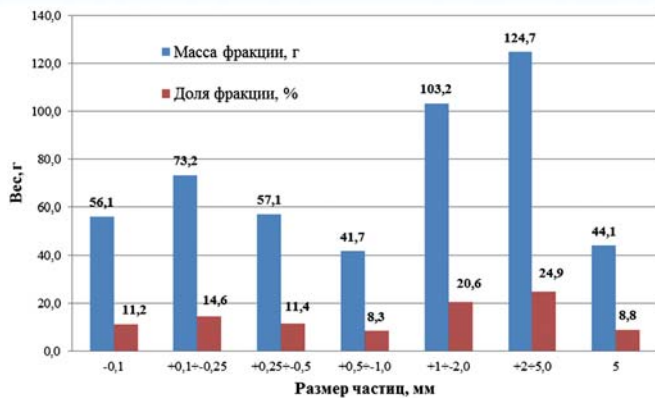


Рис. 5. Фракционный состав коры выветривания

— Зона структурной глинистой и щебнисто-глинистой коры выветривания. Цвет и структура полностью определяются особенностями строения первичных пород. Мощность колеблется от 4,0 до 10 м.

— Зона сапролитов. Глинизированные коренные породы по текстурным и структурным признакам неотличимые от первичных пород, как правило, легко ломаются руками или без особых усилий раскалываются молотком. Мощность до 5,0 м.

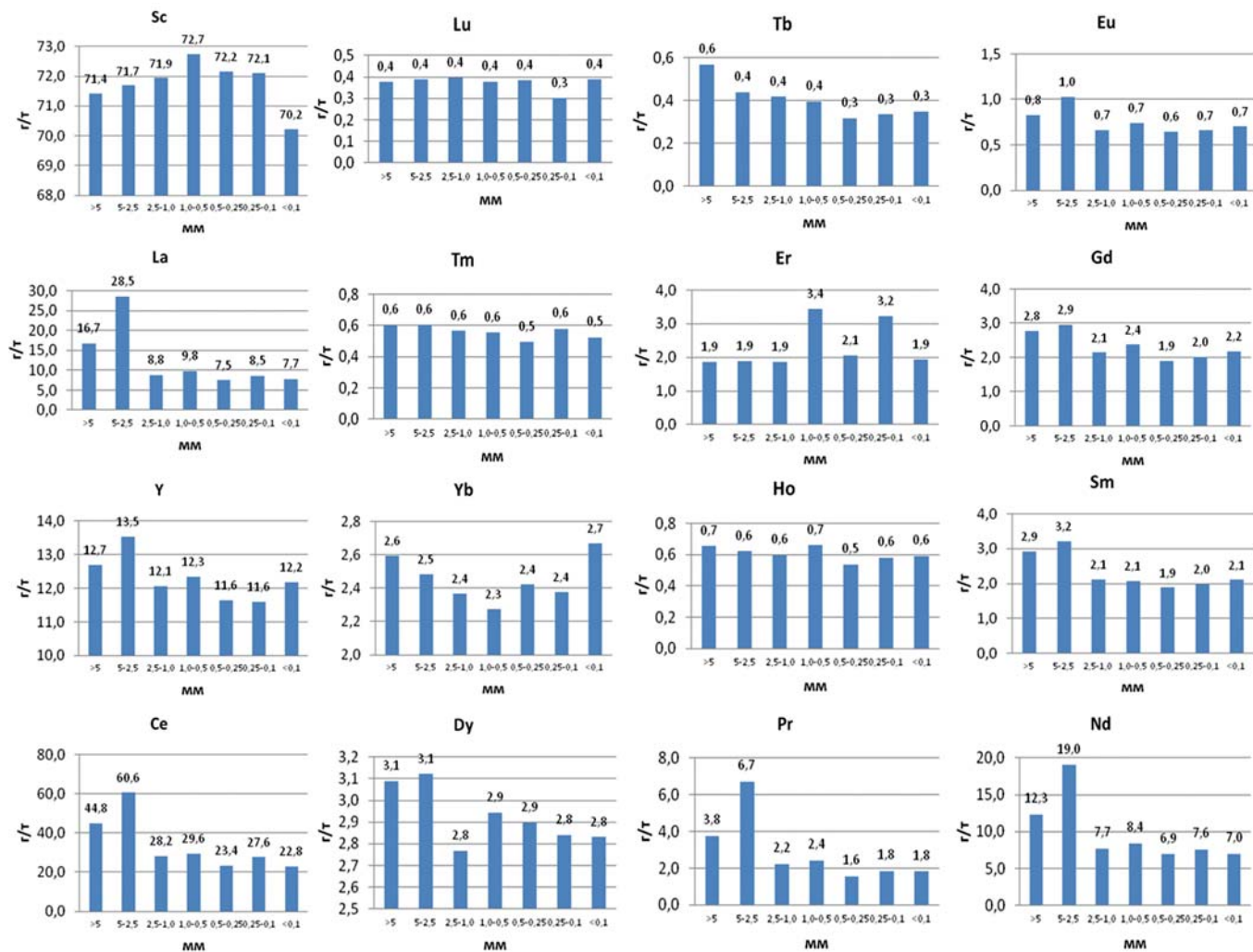


Рис. 6. Распределение РЗЭ, иттрия и скандия по классам крупности материала коры выветривания

Содержание скандия в породах коры выветривания колеблется от 30 до 100 г/т, при этом отмечается закономерное снижение концентрации скандия с глубиной, что обусловлено уменьшением степени окисленности пород (рис. 2). В первичных (скальных) породах содержание скандия колеблется в пределах 5–15 г/т.

По результатам поисковых работ оценены запасы и ресурсы скандия соответственно на участке золоторудного проявления Контакт [3] и участке Октябрьский. Ресурсы скандия  $P_1$  на участке Октябрьский оцениваются в 2000 т, при среднем содержании 60 г/т.

Технологические исследования по оценке параметров извлечения и получения скандия проводили в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева на технологической пробе ТП-7/2017, отобранной из керна скважин 1301 и 1303 (участок Контакт).

Анализ растворов и твердых проб на скандий и другие элементы проводили методами ICP-MS, HSCAM 520-AES/MS в Аналитическом сертификационном испытательном центре Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского (АСИЦ ВИМС) и РХТУ им. Д.И. Менделеева.



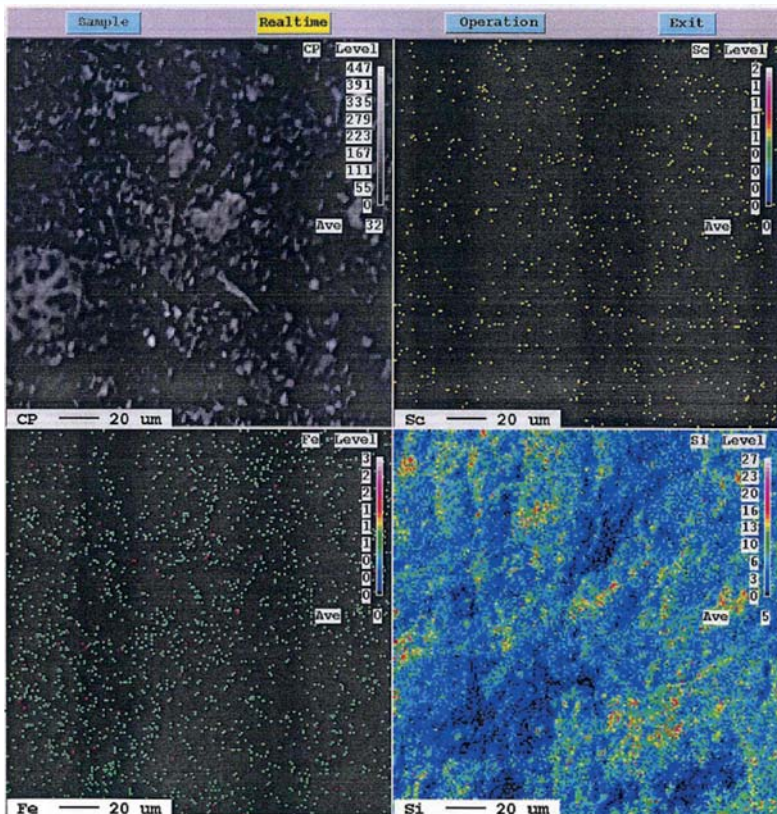


Рис. 7. Матрица материала коры выветривания и распределение скандия

Элементный состав исходной пробы коры выветривания приведен на рисунках 3 и 4.

Основные элементы в составе коры выветривания — железо и алюминий — до 99 %, содержание остальных элементов не превышает 0,1 %, что в дальнейшем облегчит задачу по сорбционному переделу растворов.

Редкоземельные элементы, включая скандий и иттрий, в материале коры выветривания суммарно составляют 145 г/т, при этом 78 % приходится на скандий (51 %), церий (19 %) и иттрий (8 %), при содержании скандия 73,3 г/т.

Гранулометрический анализ материала коры выветривания (ситовой метод) показал, что в материале преобладают фракции  $+2\div-5,0$  и  $+1\div-2,0$  с долей 24,9 и 20,6 % соответственно. Доля фракций менее 1 мм составляет 45,5 % (рис. 5).

Распределение редкоземельных элементов по классам крупности материала коры выветривания достаточно равномерное, за исключением празеодима, неодима, лантана и церия, содержание у которых в крупных классах превышает содержание в мелких классах в 2–3 раза. Содержание скандия изменяется от 70 до 73 г/т (рис. 6).

Идентификацию и распределение скандия в материале коры выветривания проводили с использованием рентгеноспектрального микроанализатора (с электронным зондом) Jeol JXA-8100 (Япония, Jeol Ltd.), оснащенного тремя кристалл-дифракционными и энергодисперсионным (Link Pentafet, Oxford Inst., Великобритания) спектрометрами (аналитик — с.н.с. И.Г. Быстров ФГБУ «ВИМС»).

Выявить основной минерал, с которым связан скандий, не представляется возможным. Идентификация минералов по результатам спектрографии показала, что скандий не приурочен к титансодержащим минералам (например, ильмениту), он тяготеет к гидроксидам железа, каолиниту, бариту и глинистому цементу.

Растровые снимки, полученные на микрозонде, дают картину распределения скандия в материале коры выветривания в виде равномерно рассеянных частиц размером менее 1 мкм (рис. 7).

В ходе проведения технологических исследований по оценке возможности получения скандиевого концентрата из материала коры выветривания были изучены в тестовых режимах: выщелачиваемость материала в естественном и измельченном состояниях, влияние времени контакта, температуры пульпы и концентраций реагентов на извлечение скандия в раствор, сорбционные и экстракционные показатели и др.

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Извлечение скандия при серноокислотном выщелачивании из неизмельченной пробы коры выветривания составило практически 100 % при содержании его в полученном растворе 19,4 мг/л.
2. Максимальная степень экстракции скандия из растворов элюатов составила 91 %.
3. Проведение экспериментов в условиях «смола в пульпе» (RIP) показало, что степень сорбции скандия достигает 78,4 %.
4. При упаривании элюатов получен черновой концентрат скандия с содержанием 9,89 % (по оксиду скандия).
5. Предложены принципиальные технологические схемы получения чернового концентрата скандия из материала коры выветривания.
6. Разработаны основные направления оптимизации условий сорбции/экстракции с целью снижения расхода кислоты, концентрирования первичного элюата, осаждения и очистки первичного концентрата скандия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комиссарова, Л.Н. Неорганическая и аналитическая химия скандия / Л.Н. Комиссарова. — М.: Эдиториал УРСС, 2001. — 512 с.
2. Обзор рынка скандия в России и мире / Инфолайн. — 3 изд. — М., ноябрь, 2017.
3. Руденко, А.А. Перспективы использования редкометалльной синергии на золоторудных объектах Гайяны / А.А. Руденко, А.А. Данилов, И.Д. Трошкина // Золото и технологии. — 2017. — № 3 (37). — С. 154–157.
4. Chasse, M. Scandium speciation in a world-class lateritic deposit / M. Chasse, W.L. Griffin, S.Y. O'Reilly, G. Calas // *Geochem. Persp. Let.* — 2017. — V. 3. — P. 105–114.

© Руденко А.А., Трошкина И.Д., Данилов А.А., 2019

Руденко Алексей Анатольевич // Rudall2007@yandex.ru  
Трошкина Ирина Дмитриевна // oban1@yandex.ru  
Данилов Алексей Алексеевич // danil-lex@mail.ru