

УДК 553.493(470):622.349

## О ПОПУТНОЙ ДОБЫЧЕ СКАНДИЯ ИЗ ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НА ДАЛМАТОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ УРАНА



**В. Ю. СМЫШЛЯЕВ,**  
руководитель проекта «Скандий»,  
smyshlyayev.v.y@dalur.ru,  
АО «Далур», Курганская область, Россия

### Введение

В настоящее время на Далматовском месторождении осуществляется промышленная добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ), в дальнейшем планируется разработка по той же технологии Хохловского и Добровольного месторождений в Курганской области. Основным реагент, который используется при этом, — 1–2%-ный раствор серной кислоты; в нем вместе с ураном происходит частичное растворение и других элементов рудовмещающих пород, в том числе и редкоземельных (РЗЭ). Достаточно эффективно растворяются соединения титана, скандия, титана, циркония и др. Все это определяет многокомпонентность продуктивных растворов. Среднее содержание элементов в них (в пересчете на металл) составляет, г/м<sup>3</sup>: уран — до 35–36; скандий — 1–1,5; торий — 2–3; цирконий — 2–2,5; сумма РЗЭ — 30–31; ванадий — 30–35; алюминий — до 3000; железо — до 1000. Удельная активность раствора превышает 35 кБк/дм<sup>3</sup>.

Технологии извлечения урана из таких растворов (сернокислый раствор с кислотностью около 0,4–0,5 %) разработаны давно и с успехом применяются во всем мире [1–6]. Более сложной в решении является проблема извлечения из продуктивных растворов СПВ редкоземельных элементов, в том числе скандия. Она привлекает все большее внимание специалистов в области горного дела [7–14]. Ниже показаны результаты работ, проведенных в АО «Далур» в данном направлении.

### Исследования по попутному извлечению скандия

При сорбции урана на анионите другие, представляющие интерес элементы, такие, как скандий, остаются в сернокислом растворе, который возвращается после доукрепления серной кислотой на СПВ (в рудное тело на следующий цикл выщелачивания).

Единственный на настоящее время пригодный с экономической точки зрения метод, который позволяет проводить селективное извлечение того или другого компонента, не изменяя состава раствора, является сорбционный. Грамотный выбор сорбента

*Прослежена история исследований, направленных на комплексное изучение недр с целью организации попутного извлечения скандия при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания.*

**Ключевые слова:** скважинное подземное выщелачивание, попутная добыча, редкоземельные металлы, сорбция, экстракция.

**DOI:** 10.17580/gzh.2017.08.05

может обеспечить высокую полноту извлечения целевого компонента даже при низких его концентрациях в исходных растворах. В настоящее время существует множество сорбентов, обладающих уникальными сорбционными свойствами. Однако, к сожалению, их производство в России практически отсутствует, поэтому эти иониты получают только на зарубежных предприятиях.

Интерес к скандию возник на волне «скандиевого бума», произошедшего в конце 1980-х — начале 1990-х годов и вызванного высокой стоимостью чистых соединений скандия на мировом рынке [15]. В продуктивном растворе подземного выщелачивания урана скандий содержится в количестве 1–1,5 мг/л, и при высокой цене на мировом рынке на соли скандия его попутная с ураном добыча может оказаться рентабельной даже при таких низких содержаниях в недрах. В связи с возможностью извлечения скандия попутно с ураном в период с 1988 по 1992 гг. выполнялась геолого-промышленная оценка скандиевого оруденения в проницаемых отложениях Далматовского месторождения с отбором дубликатов керновых проб. Содержание скандия по результатам нейтронно-активационных анализов колеблется в пробах водонепроницаемых отложений от 2 до 10 г/т при средневзвешенном содержании 6,4 г/т. Скандий в урановых рудах Далматовского месторождения находится в рассеянном состоянии и не образует собственных минералов, а также рудообразующих ореолов. Содержание скандия в рудах и рудовмещающих породах близко к кларковому. Его распределение в литологических разностях пород равномерное и не зависит от содержания урана и интенсивности эпигенетических изменений. Содержание лантаноидов изменяется от 123 г/т в гравелитах до 171–222 г/т в песчаниках, достигая максимальных значений в глинистых разностях (до 447 г/т) в безрудных породах рудовмещающего горизонта.

Комплекс технологических лабораторных исследований по оценке параметров извлечения из руд урана и скандия был выполнен на керновом материале из технологических скважин опытно-эксплуатационного (ПВ-2) и опытного (ПВ-89) участков

## Характеристика геотехнологических данных по опытным работам

Ж:Т, м <sup>3</sup> /т	Опыт ПВ-89				Опыт ПВ-88		Опыт ПВ-82	
	Уран		Скандий		Скандий		Уран	
	Извлечение, %	Среднее содержание в растворе, мг/л	Извлечение, %	Среднее содержание в растворе, мг/л	Извлечение, %	Среднее содержание в растворе, мг/л	Извлечение, %	Среднее содержание в растворе, мг/л
0,2	6,30	110,9	4,02	1,27	0,91	0,08	1,20	21,1
0,4	11,95	114,9	6,14	1,29	1,24	0,09	4,50	39,4
0,6	17,64	117,8	9,77	1,56	3,05	0,08	7,60	44,4
0,8	21,76	114,6	12,74	1,37	4,03	0,08	11,00	49,0
1	26,11	110,7	16,09	1,36	5,13	0,09	15,00	52,9
1,2	30,44	107,6	19,26	1,35	6,74	0,09	19,10	56,1
1,4	34,50	105,7	21,63	1,19	8,77	0,11	24,00	60,9
1,58	37,10	103,3	23,24	1,28	10,50	0,11	27,80	62,4

Далматовского месторождения. Проведены опыты как в статических условиях, так и в фильтрационном режиме; основной целью опытов являлась оценка степени попутного извлечения скандия в технологических режимах, оптимальных для добычи урана. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

- извлечение урана и скандия происходит синхронно, максимальное содержание как скандия, так и урана достигается при отношении Т:Ж = 0,3÷0,5, после чего содержание скандия падает и при Ж:Т менее 2–2,5 его содержание в продуктивном растворе снижается до сотых долей мг/л;

- извлечение скандия из руды в раствор во всех опытах не превышает 15 %;

- с повышением концентрации кислоты с 2 до 47 г/л увеличивается степень извлечения урана с 66–71 до 76–85 % и скандия с 5–8 % до 9–16 %, но при этом увеличивается расход реагента в 3–8 раз;

- применение окислителей не привело к заметному изменению содержаний скандия.

Для получения геотехнологических параметров и оценки промышленной значимости комплексного оруденения были проведены натурные опытные работы: ПВ-88 (две скважины) и ПВ-89 (полномасштабные работы с системой закачных и откачных скважин и извлечением урана и скандия из продуктивных растворов в коллективный концентрат на технологическом переделе). В качестве сорбента в опыте ПВ-89 использовали амфолит АФИ-22. Указанный ионит в свое время производили опытными партиями. Полученные результаты представлены в **таблице** (данные по опыту ПВ-82 приведены для сопоставления поведения урана и скандия при сернокислотном выщелачивании).

Сопоставляя технологические показатели, полученные при лабораторных и опытно-промышленных испытаниях, можно констатировать, что динамика перехода скандия в раствор и уровень



Опытно-промышленная установка по извлечению скандия из оборотных растворов СПВ



Емкости для приготовления десорбирующего раствора на опытно-промышленной установке

содержания на разных этапах выщелачивания практически идентичны с расхождением в показателях извлечения. Показатели извлечения, полученные при опытно-промышленных испытаниях, в 1,5 раза выше данных по лабораторным исследованиям, несмотря на то, что по ряду проб лабораторные испытания проводили в жестких (до 47 г/л) режимах кислотности выщелачивающих растворов. Расхождение произошло в результате занижения среднего содержания (4 г/т) и, соответственно, запасов скандия в контурах опытного участка. В результате пересчета при среднем содержании скандия по месторождению (6,3 г/т) запасы скандия в контурах опытного участка составили 860,8 кг, а извлечение – 15,7 %, что практически полностью совпадает с лабораторными данными. Таким образом, было показано, что скандий можно извлекать из недр совместно с ураном. К сожалению, таких широкомасштабных испытаний по добыче всех редкоземельных элементов проведено не было.

Вновь к массовым исследованиям по попутной добыче скандия вернулись в 2012 г., в конце которого на средства ООО «ИнтермиксМет» и по его же проекту на промплощадке АО «Далур» была сооружена опытная установка. Технология, разработанная этой компанией, предусматривала сорбционное извлечение скандия из маточных растворов извлечения урана с последующей десорбцией и получением черного концентрата. В течение

2013–2014 гг. на договорной основе на установке проводили работы по извлечению скандия из оборотных растворов подземного выщелачивания (после извлечения из них урана) с получением технологических проб в виде черного концентрата скандия. В последующем эти пробы направляли на гидromеталлургический завод ООО «ИнтермиксМет» с целью отработки технологии и оценки технико-экономических показателей получения оксида скандия из коллективного черного концентрата.

В результате проведенных работ была подтверждена принципиальная возможность попутного извлечения скандия из оборотных растворов подземного выщелачивания после извлечения из них урана. Однако остался еще не решенным ряд проблем, которые могут осложнить организацию промышленного производства скандия в будущем:

- пока получается плохо фильтруемый осадок концентрата с низким содержанием скандия (около 1 %);
- осадок концентрата скандия имеет высокую удельную радиоактивность, обусловленную содержанием в концентрате тория и радия; предложенные и опробованные способы снижения радиоактивности приводят к образованию значительного количества опасных отходов.

В 2015 г. на промплощадке АО «Далур» к стендовым испытаниям своих технологических решений по попутному извлечению



Локальная сорбционная установка на Далматовском месторождении



### Реакторы для сбора богатой фракции раствора десорбции ОПУ по производству скандия

редкоземельных элементов из продуктивных растворов СПВ приступили АО «ВНИПИпромтехнологии» (ВНИПИПТ) и Уральский федеральный университет (УрФУ); кроме того, данные работы должны были дать ответ на вопрос, насколько экономически оправданно и выгодно попутное извлечение скандия.

После обсуждения полученных результатов в январе 2016 г. и проведения сравнительных испытаний было отдано предпочтение технологическим решениям УрФУ, которые по ряду признаков выгодно отличались от решений, предлагаемых ВНИПИПТ, а именно:

- черновой концентрат фторида скандия имеет более высокое содержание скандия (25–30 %) и низкую удельную радиоактивность по сравнению с концентратом, полученным по технологии ВНИПИПТ;
- дальнейшая экстракционная переработка менее трудоемка (число ступеней 4–5 по сравнению с 30-ю у ВНИПИПТ);
- УрФУ одновременно предложил технологию получения 2–3%-ной алюмоскандиевой лигатуры с использованием черного концентрата фторида скандия.

Учитывая тот факт, что АО «Далур» имеет действующую производственную площадку по добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания, развитую инфраструктуру и большую заинтересованность в повышении полноты отработки запасов полезных ископаемых из недр и глубины переработки своего сырья, в 2015 г. проект «Скандий Далур» успешно прошел экспертизу в ГК «Росатом» – на Совете по развитию и глобализации принято решение по финансированию проекта. По инициативе предприятия запасы

скандия были поставлены на государственный учет. Указанный проект был также поддержан Правительством Курганской области в соответствии с планами создания промышленного парка с использованием промышленного потенциала АО «Далур».

Технологические решения, предложенные УрФУ, заложены в основу проекта опытно-промышленной установки по попутной добыче скандия из оборотных растворов подземного выщелачивания на Центральном участке Далматовского месторождения урана. В рамках развития и реализации данного проекта Уральский федеральный университет совместно с АО «Далур» в 2016 г. выиграл конкурс Министерства образования и науки РФ на право получения государственной субсидии на реализацию комплексного проекта «Создание высокотехнологичного скандиевого производства из продуктов подземного скважинного выщелачивания урана» с последующим созданием производства алюмоскандиевой лигатуры; заключен договор с Минобрнаукой и УрФУ на проведение НИОКР и ОПР.

### Заключение

В 2017 г. в рамках проекта «Скандий Далур», планируется завершить строительство и приступить к эксплуатации опытно-промышленной установки по попутному извлечению скандия из маточных растворов уранового производства производительностью по растворам до 200 м<sup>3</sup>/ч; годовой объем добычи скандия может достичь до 1,5 т, его стоимость по рыночным ценам составит не менее 100 млн руб. Следующим этапом развития проекта является организация производства алюмоскандиевой лигатуры.

**Библиографический список**

1. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов : в 2 т. / под ред. М. И. Фазлулина. – М. : ИД «Руда и Металлы», 2005. Т. 1: Уран. – 407 с.
2. Истомин А. Д., Бабкин А. С., Носков М. Д., Чеглоков А. А., Попонин Н. А. Технологическая информационная система для контроля и управления добычным комплексом предприятия по извлечению урана методом подземного выщелачивания // Цветные металлы. 2012. № 1. С. 16–22.
3. Святецкий В. С., Солодов И. Н. Стратегия технологического развития уранодобывающей отрасли России // Горный журнал. 2015. № 7. С. 68–77. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.10
4. Луценко Н. И., Равшанов Н. М. Технология добычи и переработки урана методом скважинного подземного выщелачивания // Горный журнал. 2016. № 10. С. 13–18. DOI: 10.17580/gzh.2016.10.02
5. Попонин Н. А., Лантев Ю. И. АО «Далур»: сырьевая база, этапы становления и перспективы развития // Горный журнал. 2016. № 10. С. 6–12. DOI: 10.17580/gzh.2016.10.01
6. Dutta T., Kim K.-H., Uchimiya M., Kwon E. E., Jeon B.-H., Deep A., Yun S.-T. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining // Environmental Research. 2016. Vol. 150. P. 182–190.
7. Кулифеев В. К., Тарасов В. П., Кропачев А. Н. Металлургия редкоземельных и радиоактивных металлов: физико-химические основы и технология получения редких, редкоземельных и радиоактивных металлов : учеб. пособие. – М. : НИТУ «МИСиС», 2013. – 75 с.
8. Смирнова Т. Л., Субботина Л. Г. Формирование кластера редкоземельных металлов как стратегия ГК «Росатом» развития Томской области // Цветные металлы. 2014. № 6. С. 8–11.
9. Быховский Л. З., Архипова Н. А. Рудная база стратегических редких металлов России: состояние, перспективы освоения и развития // Горный журнал. 2017. № 7. С. 4–10. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.01
10. Xiao W. L., Ping D. H., Murakami H., Yamabe-Mitarai Y. Microstructure and oxidation behavior of Ti–6Al–2Zr–1Mo–1V-based alloys with Sc addition // Materials Science and Engineering. 2013. Vol. 580. P. 266–272.
11. Gen Li, Naiqin Zhao, Tao Liu, Jiajun Li, Chunlian He, Chunsheng Shi, Enzo Liu, Junwei Sha. Effect of Sc/Zr ratio on the microstructure and mechanical properties of new type of Al–Zn–Mg–Sc–Zr alloys // Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 617. P. 219–227.
12. Chunsheng Shi, Liang Zhang, Guohua Wu, Xiaolong Zhang, Antao Chen, Jiashen Tao. Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al–3Li–1.5Cu–0.15Zr alloy // Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 680. P. 232–238.
13. Wilburn D. R., Stanley K. A. Annual Review 2012 : Exploration // Mining Engineering. 2013. Vol. 65. Iss. 5. P. 22–42. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/mflow/exploration-2012.pdf> (дата обращения: 30.06.2017).
14. Thrane K., Kalvig P., Keulen N. REE deposits and occurrences in Greenland // ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference : Book of Proceedings. – Milos, 2014. P. 301–307.
15. Голубев А. В. Скандий. Очень прибыльный металл // Редкие земли. 2014. № 2. С. 90–93. **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 8, pp. 28–32  
DOI: 10.17580/gzh.2017.08.05

**By-producing scandium from pregnant solutions during in-situ leaching at Dalmatovskoe uranium deposit**

**Information about author**

V. Yu. Smyshlyaev<sup>1</sup>, Scandium Project Manager, smyshlyaev.v.yu@dalur.ru

<sup>1</sup> Dalur JSC, Kurgan Region, Russia

**Abstract**

Dalur company carries out commercial production of uranium using the method of in-situ leaching. When sulfuric acid solution is fed in rock mass, some elements, including rare earths, in particular, scandium, are partly dissolved and go from enclosing rock mass to pregnant solutions together with uranium. At the present time, these by-products remain yet unrecoverable from pregnant solutions. At first, the task is set to extract scandium – a very valuable mineral product being in short supply in the world market.

The article presents the history of the laboratory and full-scale research aimed to find a technology to obtain scandium by-product during uranium production. Some institutions in Russia undertook especially extensive investigations in the indicated area of science in 2013–2016 using the pilot-plant equipment. As a result, a rough concentrate with a high content of scandium fluoride (25–30%) and low radioactivity was produced. In the current year, it is planned to accomplish construction of a pilot plant for by-producing scandium at a solution flow rate of 200 m<sup>3</sup>/h and at the expected annual scandium output of 1.5 t. The next stage of the project will be production of scandium aluminum alloy.

**Keywords:** in-situ leaching, by-product, rare earth metals, sorption, extraction.

**References**

1. Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals : in two volumes. Ed.: M. I. Fazlullin. Moscow. : "Ore and Metals" Publishing House, 2005. Vol. 1: Uranium. 407 p.
2. Istomin A. D., Babkin A. S., Noskov M. D., Cheglovkov A. A., Poponin N. A. Technological information system for the control and management of mining complex of enterprise for uranium extraction by underground leaching. *Tsvetnye Metally*. 2012. No. 1. pp. 16–22.

3. Svyatetskiy V. S., Solodov I. N. Technological advancement strategy of uranium mining industry in Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 7. pp. 68–77. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.10
4. Lutsenko N. I., Ravshanov N. M. Uranium treatment and production by underground leaching. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 10. pp. 13–18. DOI: 10.17580/gzh.2016.10.02
5. Poponin N. A., Laptsev Yu. I. Dalur: Mineral resources, stages of development and prospects. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 10. pp. 6–12. DOI: 10.17580/gzh.2016.10.01
6. Dutta T., Kim K.-H., Uchimiya M., Kwon E. E., Jeon B.-H., Deep A., Yun S.-T. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*. 2016. Vol. 150. P. 182–190.
7. Kulifeyev V. K., Tarasov V. P., Kropachev A. N. Metallurgy of rare-earth and radioactive metals: physical-chemical basis and technology of obtaining of rare, rare-earth and radioactive metals : tutorial. Moscow : NITU «MISiS», 2013. 75 p.
8. Smirnova T. L., Subbotina L. G. Formation of cluster of rare-earth metals as a strategy of Rosatom State Nuclear Energy Corporation for development of Tomsk Oblast. *Tsvetnye metally*. 2014. No. 6. pp. 8–11.
9. Bykhovskiy L. Z., Arkhipova N. A. Strategic rare metal supply in Russia: Current state and future prospects. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 7. pp. 4–10. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.01
10. Xiao W. L., Ping D. H., Murakami H., Yamabe-Mitarai Y. Microstructure and oxidation behavior of Ti–6Al–2Zr–1Mo–1V-based alloys with Sc addition. *Materials Science and Engineering*. 2013. Vol. 580. pp. 266–272.
11. Gen Li, Naiqin Zhao, Tao Liu, Jiajun Li, Chunlian He, Chunsheng Shi, Enzo Liu, Junwei Sha. Effect of Sc/Zr ratio on the microstructure and mechanical properties of new type of Al–Zn–Mg–Sc–Zr alloys. *Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 617. pp. 219–227.
12. Chunsheng Shi, Liang Zhang, Guohua Wu, Xiaolong Zhang, Antao Chen, Jiashen Tao. Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al–3Li–1.5Cu–0.15Zr alloy. *Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 680. pp. 232–238.
13. Wilburn D. R., Stanley K. A. Annual Review 2012 : Exploration. *Mining Engineering*. 2013. Vol. 65, Iss. 5. P. 22–42. Available at: <https://minerals.usgs.gov/minerals/mflow/exploration-2012.pdf> (accessed: 30.06.2017).
14. Thrane K., Kalvig P., Keulen N. REE deposits and occurrences in Greenland. *ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference : Book of Proceedings*. Milos, 2014. pp. 301–307.
15. Golubev A. V. Scandium. Very profitable metal. *Redkie zemli*. 2014. No. 2. pp. 90–93.