

аналитических центрах, в подведомственных организациях и организациях, с которыми указанные органы заключили соглашения о взаимодействии в целях осуществления функций по управлению использованием атомной энергии (п. 14е Положения).

В соответствии с п. 19 Положения, ведомственные информационно-аналитические центры (**ВИАЦ**) осуществляют:

а) внедрение в соответствующих федеральных органах исполнительной власти, осуществляющих государственное управление использованием атомной энергии, их подведомственных организациях и организациях, с которыми такой орган заключил соглашения о взаимодействии в целях осуществления функций по управлению использованием атомной энергии, программного, информационного, методического и иных видов обеспечения системы государственного учета и контроля, разработанного центральным информационно-аналитическим центром;

б) сбор, обработку, включая анализ и контроль достоверности, и обобщение информации, поступающей от подведомственных организаций и организаций, с которыми соответствующий федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий государственное управление использованием атомной энергии, заключил соглашения о взаимодействии в целях осуществления функций по управлению использованием атомной энергии, а также подготовку аналитических материалов;

в) формирование и ведение баз данных по учету и контролю объектов государственного учета и контроля в подведомственных федеральным органам исполнительной власти, осуществляющим государственное управление использованием атомной энергии, организациях и организациях, с которыми такой орган заключил соглашения о взаимодействии в целях осуществления функций по управлению использованием атомной энергии;

г) подготовку в установленной форме данных по объектам государственного учета и контроля и представление их в центральный информационно-аналитический центр в порядке, установленном Госкорпорацией «Росатом», и с учетом требований законодательства Российской Федерации;

д) методическое руководство по вопросам учета и контроля объектов государственного учета и контроля и оказание консультационной помощи подведомственным организациям и организациям, с которыми федеральные органы исполнительной власти, осуществляющие государственное управление использованием атомной энергии, заключили соглашения о взаимодействии в целях осуществления функций по управлению использованием атомной энергии;

е) проведение контрольных проверок по вопросам учета и контроля объектов государственного учета и контроля подведомственных организаций и организаций, с которыми федеральные органы исполнительной власти, осуществляющие государственное управление использованием атомной энергии, заключили

соглашения о взаимодействии в целях осуществления функций по управлению использованием атомной энергии, в порядке, установленном законодательством Российской Федерации и нормативными правовыми актами соответствующего федерального органа исполнительной власти;

ж) информирование в установленном законодательством Российской Федерации порядке центрального информационно-аналитического центра и федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих государственное регулирование безопасности при использовании атомной энергии, о ставших известными фактах незаконного оборота, хищения и несанкционированного использования объектов государственного учета и контроля, обнаружения бесхозных объектов государственного учета и контроля.

Выводы

Для исполнения функций, возложенных Постановлениями Правительства РФ № 412 от 03.07.2006, № 88 от 17.02.2011, № 1069 от 19.10.2012, № 542 от 15.06.2016 на Федеральное агентство по недропользованию — Роснедра, как органа управления использованием атомной энергии на подведомственных или находящихся в сфере ответственности предприятиях, представляется необходимым создание при Роснедрах ведомственного информационно-аналитического центра учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов (ВИАЦ УК РВ и РАО).

Кроме того, целесообразно разработать и издать методическое руководство для предприятий по подготовке комплекта заявочных документов на признание пригодными эксплуатировать ядерную установку, радиационный источник или пункт хранения и осуществлять собственными силами или с привлечением других организаций деятельность по размещению, проектированию, сооружению, эксплуатации и выводу из эксплуатации объектов хранения и обращения радиоактивных веществ и отходов.

© Бахур А.Е., Гулынин А.В., Нозик М.Л., 2017

Бахур Александр Евстафьевич // e-mail: bae@u238.ru

Гулынин Александр Викторович // e-mail: lab@u238.ru

Нозик Михаил Леонидович // e-mail: milen2@mail.ru

УДК. 553.495+622.349.5:553.64(470.47)

**Авдонин Г.И., Гуров В.А., Мамошин М.Ю., Пикалова В.С.
(ФГБУ «ВИМС»)**

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ДОБЫЧИ УРАНА ИЗ ФОСФОРИТОВЫХ РУД

Основным видом нетрадиционных ресурсов урана являются фосфориты. Несмотря на текущий низкий уровень мировых цен на уран, в мире продолжают интенсивные исследования рентабельных путей извлечения урана из нетрадиционного сырья. До последнего времени основным способом извлечения урана из фосфоритов являлся экс-

тракционный метод. В статье описаны опытно-промышленные работы по получению урана и сопутствующих ценных элементов из бедных комплексных руд Шаргадыкского месторождения фосфоритов (Российская Федерация, Республика Калмыкия). Предложен эффективный метод комплексной переработки фосфоритовых руд, обеспечивающий высокое извлечение фосфора, урана, никеля, кобальта и суммы редкоземельных элементов на основе ионообменных технологий, лишенный недостатков, присущих экстракционному методу и характеризующий высокими интегральными показателями коммерческой эффективности. **Ключевые слова:** уран, редкоземельные элементы, скандий, фосфаты, фосфориты.

Avdonin G.I., Gurov V.A., Mamoshin M.Yu., Pikalova V.S. (VIMS)

AN ESTIMATE OF URANIUM RECOVERY FROM PHOSPHORITE ORES

*The bulk of the unconventional uranium resources worldwide is associated with phosphorite ores. Despite the ongoing depression in the world uranium markets, extensive research is underway in various countries with an objective of developing cost-effective ways of uranium recovery from non-conventional resources. Until recently, solvent extraction (SX)-based flowsheets dominated the phosphate resources development field when it came to the uranium recovery. The article features a novel, cost-effective method of ion exchange (IX)-based processing of complex low-grade phosphorite ores yielding high recovery rates of phosphorus, uranium, nickel, cobalt and rare-earth elements. Based on the results of the pilot plant operation conducted at Shargadyk low-grade complex phosphorite ore deposit (Russian Federation, the Republic of Kalmykia), the new heap leach — ion exchange (HL-IX)-based method is free of the faults and shortcomings characteristic of the conventional SX technologies of uranium recovery from the phosphate resources. The proposed HL-IX technology offers high integral level of commercial efficiency. **Keywords:** uranium, rare earth element, scandium, phosphates, phosphorites.*

Нетрадиционные ресурсы урана — это ресурсы, где уран содержится в небольшом количестве в виде примеси, и где он может быть извлечен как попутный продукт в ходе добычи основного ценного компонента. Это — фосфоритовые руды, руды цветных металлов, меднопорфиновые руды, углеродистые (черные) сланцы и уголь (лигниты).

Фосфориты — основной вид нетрадиционных ресурсов урана. Это — осадочные породы морского происхождения, содержащие 18–40 % P_2O_5 , а также уран (70–200 г/т). Консервативная оценка величины мировых ресурсов урана в фосфоритах дает от 9 до 22 млн т U [6]. Около 85 % от этого количества — уран, содержащийся в рудах фосфоритовых месторождений Марокко. Для сравнения, общие установленные традиционные ресурсы урана (достоверно установленные и предварительно оцененные) по состоянию на 01.01.2015 г. в мире составили 5 718 400 т U в категории

себестоимости < US \$ 130/кг U, а в категории себестоимости < US \$ 260/кг U — 7 422 700 т U [6].

При поддержке МАГАТЭ проекты по извлечению урана из фосфоритов действовали в Тунисе, на Филиппинах и в Египте (2012–2017 гг.).

Потенциал расширения нетрадиционной ресурсной базы урана в мире прочно связан с наличием возможностей вовлечения данных ресурсов в переработку. Эти возможности зависят от:

- рыночных предпосылок для промышленного извлечения из фосфатов, которые определяют экономику получения урана в качестве побочного продукта;

- изменения бизнес-модели в горнорудной промышленности в сторону включения в общий портфель инвестиций дополнительных продуктов с добавленной стоимостью;

- изменения общей политики в сторону необходимости получения урана и других критических продуктов таких, как РЗЭ по причинам стратегического плана и необходимости обеспечения достаточности, а не только в чисто коммерческом плане;

- экологических факторов (например, необходимости снижения содержания урана в минеральных удобрениях). Следует отметить, что экономическая выгода попутного извлечения урана из фосфатных руд состоит не только в получении прибыли от извлечения урана в качестве попутного продукта, но и в выполнении природоохранных требований по низкорadioактивным отходам.

По рыночному сценарию получение урана из фосфатов начнется, как только этот процесс станет выгодным экономически. Следовательно, рынок фосфатов действует как определяющий фактор того, сколько урана будет (даже в теории) извлекаться из фосфатного сырья.

По политическому сценарию к общей экономической оценке будет добавляться (различными способами) стоимость других элементов, извлекаемых из фосфатного сырья. Правительства могут давать приоритет получению сырья для ядерной энергетики из национальных источников для обеспечения резерва такого сырья, исключая таким образом зависимость от третьих стран. В ряде стран извлечение урана из фосфатов может быть объявлено обязательным.

Наиболее целесообразным в долгосрочной перспективе представляется гибридный сценарий (наличие как рыночной, так и политической мотивации). Основа для такого развития событий заложена в Бразилии, где создано совместное предприятие по освоению нового месторождения Santa Quitéria правительственной компании Industrias Nucleares do Brasil (INB) и компании Galvani Phosphates, где основным заказчиком выступила компания Eletrobras — ведущий производитель ядерной электроэнергии в стране. В ходе реализации данного проекта в едином интегрированном цикле будет производиться как желтый кек урана, так и гидрофосфат аммония с распределением коммерческих рисков между фосфатами и ураном. Альтернативная модель реализуется в Индии, где правительство

Таблица 1
Основные месторождения фосфоритов по странам мира и содержание урана в них [7]

Месторождение	Страна	Ресурсы урана, т U	Среднее содержание U, %	Состояние
Формация Phosphoria	США	6 000 000 – 7 000 000	0,006–0,020	Не разрабатывается
Бассейн Oulad Abdoun	Марокко	3 220 000	0,012	Разрабатывается
Бассейн Meskala	Марокко	2 043 000	0,010	Разрабатывается
Бассейн Gantour	Марокко	1 206 000	0,015	Разрабатывается
Восточная Флорида	США	270 000	0,010	Не разрабатывается
Центральная Флорида	США	250 000	0,010	Разрабатывается
Северо-Восточная Флорида	США	180 000	0,010	Не разрабатывается
Северная Флорида	США	90 000	0,010	Не разрабатывается
Прикаспийский регион	Казахстан	85 000	0,080	Не разрабатывается
Shidiya Eshidia	Марокко	83 000	0,007	Геологоразведка
Abu Tartur	Сомали	60 000	0,01–0,05	Не разрабатывается

выступает в качестве заказчика, исходя из предпосылки, что более широкая проблема обеспечения производства электроэнергии как фундаментальной движущей силы экономического развития оправдывает смещение рисков с коммерческого производителя на налогоплательщиков. По гибриднему сценарию как фосфаты, так и уран рассматриваются не как чисто рыночные товары. Данные по основным месторождениям фосфоритов в мире и содержанию урана в рудах этих месторождений приведены в табл. 1.

Мировые производственные мощности по производству оксида фосфора (P_2O_5) составляют около 50 млн т/год. Из них 9,5 млн т/год — в Северной Америке, 9,4 млн т/год — в Африке и 19,2 млн т/год — в Азии [5]. В мире с фосфоритовыми рудами из недр добывается до 15 400 т U/год, но металл сейчас практически не извлекается. До середины 1990-х годов около 20 % урана, добываемого в США, производилось из руд месторождений фосфоритов центральной Флориды. Всего за период 1978–1998 гг. на 8 предприятиях в США из фосфоритов было произведено 17150 т U [7]. В период 1981–1992 гг. ежегодное производство урана из фосфоритов составляло немногим более 1000 т U/год, но затем резко снизилось, упав до нуля в 1998 г. по экономическим причинам [4]. Производственный процесс при этом характеризовался невысоким извлечением урана и высокими операционными затратами.

Поскольку стоимость урана, попутно производимого в ходе переработки фосфоритов, незначительна по сравнению с доходами от реализации основного продукта (фосфорных удобрений), экономика его производства и величина потенциальных ресурсов урана в фосфоритовых рудах привязаны к экономике производства фосфорных удобрений.

Текущее состояние проектов по организации попутного извлечения урана из фосфоритов за рубежом [6]:

Австралия: редкоземельно-фосфатно-урановое месторождение Nolans Vore (Северные Территории) от-

крыто в 1995 г. Урановые ресурсы данного месторождения составляют 7 488 т U. В настоящее время производится разработка технологической схемы переработки руд. Запуск проекта запланирован на 2019 г. с производством 14 000 т/год оксидов РЗЭ и возможным получением урана, тория и фосфорной кислоты (110 000 т/год) в качестве побочных продуктов.

В **Бразилии** весь добываемый уран является побочным продуктом переработки фосфоритов. Государственная компания INB (Industrias Nucleares do Brasil) совместно с компанией

Galvani Phosphates образовала совместное предприятие Santa Quitéria для переработки фосфоритов месторождений Santa Quitéria (прогнозные ресурсы 140 000 т U) и Itataia (прогнозные ресурсы 80 000 т U). Производительность предприятия в 2015 г. должна была составить 970 т U/год с постепенным увеличением до 1 270 т U/год в 2017 г. В связи с неблагоприятной рыночной ситуацией запуск предприятия был перенесен на начало 2019 г. при проектной производительности по урану 1 600 т U/год [6]. Производство основной продукции на предприятии при этом составит: фосфорная кислота — 240 000 т/год, гранулированные фосфорные удобрения (аммофос) — 800 000 т/год, двойной суперфосфат — 100 000 т/год. Общий объем инвестиций в проект составит US \$ 400 млн [6].

США: запасы фосфоритов составляют 1 400 млн т, содержание урана в них оценивается на уровне 170 000 т U. При производстве 9,6 млн т P_2O_5 /год попутное производство урана может составить 2 300–2 680 т U/год. Корпорация Самесо проводит работу по проектированию предприятия по переработке флоридских фосфатов с производительностью около 400 т U/год.

Иордания: запасы фосфоритов составляют 1 500 млн т с содержанием 140 000 т U. При производстве 676 000 т P_2O_5 /год попутное производство урана может составить 135 т U/год. Правительство Иордании выставляет на тендер разработку месторождения Катрана (запасы фосфоритов — 52 млн т с попутным содержанием 22 000 т U).

Марокко: запасы фосфоритов составляют 50 000 млн т, количество урана в них 6,9 млн т U. Страна обладает самыми большими в мире ресурсами урана в фосфоритах. При производстве 4,8 млн т/год P_2O_5 побочное производство урана может составить 960 т U/год. Запуск попутного производства урана в размере 1 900 т U/год было запланировано компанией Areva на 2017 г., но по состоянию на май 2017 г. информация о данном проекте отсутствует.

Египет: запасы фосфоритов составляют 100 млн т, содержащих около 40 000 т урана, при среднем содержании 0,005 — 0,02 % U.

Тунис: запасы фосфоритов составляют 100 млн т, содержащих около 50 000 т урана (при производстве 1,6 млн т P_2O_5 /год попутное производство урана может составить 265 т U /год). Для извлечения попутного урана, а также РЗЭ из данных руд предложен традиционный процесс экстракции.

Индия: сооружается промышленное предприятие по извлечению попутного урана из фосфорной кислоты на комплексе по производству минеральных удобрений IFFCO (Indian Farmers Fertiliser Cooperative Limited). Второе предприятие по производству урана и редкоземельных элементов из экстракционной фосфорной кислоты запланировано к сооружению на предприятии Paradeep Phosphates Limited. Данный проект объявлен стратегическим.

Новая Зеландия: сообщалось о планах добычи фосфоритов с морского дна на подводном поднытии Чатем, расположенном к востоку от Южного Острова. Содержание урана в фосфоритах, которые планировалось добывать с морского дна с помощью драги с перекачкой для переработки на берегу (производительность по руде 1,5 млн т/год в течение 35 лет) составляет 0,024 %. В феврале 2015 г. новозеландское ведомство по охране окружающей среды отказало в предоставлении лицензии на развитие данного проекта.

Получение урана из фосфоритов. По традиционной технологии уран выделяется из экстракционной (влажной) фосфорной кислоты с помощью жидкостной экстракции. Восстановление урана в четырехвалентное состояние традиционно проводится железным порошком (расход железа—8 кг/м³). В качестве экстрагентов для извлечения попутного урана используются октилпирофосфорная кислота (ОППА — процесс), ди(2-этилгексил) фосфорная кислота (ДНЕРА) с триоктилфосфиноксидом (ТОРО), а также октилфенилфосфорная кислота (ОРАР-процессе).

Недостатками экстракционного способа извлечения урана из ЭФК является большой расход металлического железа, необходимость очистки рафинада от примеси органического экстрагента и создание особых условий для обеспечения пожаробезопасности.

Традиционный процесс экстракционной технологии попутного получения урана из фосфоритов весьма капиталоемок. Удельная величина капитальных затрат на попутное получение урана из фосфоритов экстракционным методом составляет US \$ 390—520/кг U (для сравнения, при подземной добыче в США и Австралии она составляет US \$ 182—208/кг U, а при добыче методом ПВ в Казахстане — US \$ 156—182/кг U).

В 2009 г. в Австралии и США компанией Urtek LLC разработана альтернативная технология извлечения попутного урана из фосфоритовых руд PhosEnergy [6].

Она состоит в сорбции попутного урана из экстракционной фосфорной кислоты с последующей десорбцией U и переводом его в концентрат обычными методами. В качестве исходного сырья для получения урана используется экстракционная 20—40 % H_3PO_4 с операции сернокислотного выщелачивания фосфоритов. Перевод урана в раствор протекает с проведением окислительно-восстановительной реакции для перевода урана из U(IV) в U(VI). Очищенная от урана фосфорная кислота возвращается обратно в основной технологический цикл. Роль процесса PhosEnergy в основном производстве сводится лишь к очистке фосфорной кислоты от U и V; твердых отходов при этом не образуется. В ходе опытно-промышленных испытаний процесса извлечение урана превысило 92 %, а операционные затраты составили US \$ 52—65/кг U.

Предварительное ТЭО промышленного предприятия с использованием процесса PhosEnergy было разработано в марте 2013 г. Капитальные затраты на сооружение предприятия с производительностью 340 т U_3O_8 /год и удельными операционными затратами, составляющими US \$ 46,78/кг U со сроком работы 25 лет, составляют ~ US \$ 156 млн [6].

В бывшем СССР уран добывался из бедных комплексных руд месторождений Меловое и Тасмурун. Руды этих месторождений представлены экзотическими скоплениями уран-редкометалльно-фосфатного костного детрита в майкопских (олигоцен-ранний миоцен) глинах, отложившихся во внешних глубоководных прогибах обширного морского бассейна Восточного Паратетиса. По всей массе руды распределены остатки скелетов рыб и животных, костная ткань которых замещена фосфорным минералом — франколитом [4]. Уран и РЗЭ замещают ион кальция в решетке этого минерала, другие ценные компоненты приурочены к пириту. Химический состав руды приведен в табл. 2.

Содержание в рудах иттриевой группы в сумме редкоземельных элементов уникально и составляет 30—35 % [4]. Запасы наиболее крупного месторождения в Закаспийском урановорудном районе (Казахстан) оценивались в 44 тыс. т урана. Оработка бедных по урану (<0,05 %) руд проводилась путем обогащения водной сепарации костного концентрата и производству фосфатных удобрений с попутным извлечением ценных компонентов, содержащихся в руде (торий, РЗЭ, скандий, сера) [4]. Технология предусматривала механическое обогащение руды с использованием двухступенчатой дезинтеграции и многоступенчатой классификации в гидроциклонах по классу +0,02 мм. Нижний продукт гидроциклонов — франколитовый концентрат с достаточно высоким содержанием всех ценных компонентов и высоким извлечением (90 %).

Таблица 2
Химический состав руды

Компонент	U	P_2O_5	$S_{общ}$	CaO	Fe	$C_{общ}$	$C_{орг}$	CO ₂	Sc	ΣTR_2O_3
Содержание, %	0,036	3,0-6,0	11,7	7,5	11,6	4,6	3,6	3,9	0,03	0,1-0,2

Слив — диспергированная глина и мельчайшие зерна мельниковита. В хвосты обогащения переходило до 90 % серы. Была разработана технология выделения из хвостов в батарейных гидроциклонах пиритного концентрата, пригодного для получения H_2SO_4 , необходимой для последующего выщелачивания урано-фосфорно-редкоземельного концентрата [2]. Последний был представлен в основном минералом франколитом с примесью глины и пирита. В нем содержалось 25 % P_2O_5 , до 1 % TR_2O_3 , урана — 0,2 %, скандия — 0,04 %. Вскрытие концентрата осуществляют либо серной, либо смесью серной и азотной кислот, взятой в стехиометрическом по отношению к CaO количестве [1].

Первоначально для переработки рудного концентрата использовали наиболее простую технологию, предусматривающую сернокислотное вскрытие с переводом в раствор фосфора и урана, РЗЭ, фильтрационное разделение фосфогипса и фосфорсодержащих растворов. Фосфатно-сульфатные растворы, обычно получающиеся в результате обработки фосфорных руд серной кислотой, имеют следующий состав: 0,2—0,7 г/л U; 0,1—0,3 г/л Th; 3—5 г/л Fe_2O_3 ; 2—3 г/л Al_2O_3 ; 100—180 г/л P_2O_5 ; 10—20 г/л SO_4^{2-} ; 15—20 г/л F; 2—3 г/л Si. Помимо урана и тория они могут содержать некоторое количество иония и полония [4]. Из раствора уран извлекался экстракционным способом с последующим получением U_3O_8 . В органическую фазу наряду с ураном переходят окисное железо и скандий. Фосфор и РЗЭ остаются в рафинате. В дальнейшем по этой технологии из отходов после переработки продуктов экстракционным методом был попутно извлечен скандий. Получаемый продукт содержит 99,9 % окиси скандия [1, 3].

Из очищенных фосфорно-сернокислых растворов получают также сложное гранулированное удобрение типа аммофоса, содержащее более 50 % питательных веществ. Схема получения удобрений включает аммонизацию растворов, их концентрирование методом противоточной многокорпусной выпарки, грануляцию и сушку упаренной пульпы с последующим дроблением и рассевом [1]. Технология внедрена в 1969 г. в ПО «Алмаз» (г. Лермонтов), с последующими корректировками она проработала до 1991 г. и обеспечивала извлечение 90 % урана в U_3O_8 , 80 % скандия в виде оксида, 89 % фосфора. Это был первый в СССР промышленный опыт вовлечения в переработку фосфоритов, содержащих уран и скандий.

Азотно-кислотная технология комплексной переработки фосфоритов месторождения Меловое была разработана, испытана в полупромышленном масштабе и внедрена на заводе в Днепродзержинске (Украина) в 1962 г. Разложение франколитового концентрата проводилось последовательно азотной и серной кислотами; образующийся в процессе переработки фосфогипс отделяли фильтрованием. Совместно с гипсом осаждаются основное количество радиоактивных элементов (в основном ^{226}Ra и ^{230}Th). Из фосфорнокислого раствора после восстановления осаждают коллективный химический концентрат (КХК) урана, редкозе-

мельных элементов, скандия в виде фосфатов, остальную часть актиния и ^{230}Th . Осадок растворяют в азотной кислоте, а уран из раствора извлекают экстракционным способом с последующим его выделением на стадии реэкстракции в виде уранилтрикарбоната. Редкоземельные элементы извлекают сорбцией, скандий — экстракцией. Готовую продукцию получали в виде U_3O_8 , оксидов редкоземельных элементов и скандия. Фосфорсодержащие растворы после выделения КХК и очистки от органики перерабатывали в комплексные азотно-фосфорные удобрения типа нитрофоска, содержащие до 40 % питательных веществ. Получаемые удобрения содержат фосфор — 50 % в водорастворимой и 50 % в цитратнорастворимой форме.

Извлечение в готовую продукцию таково (%): уран — 93, редкоземельные элементы — 54, скандий — 70, P_2O_5 — 85,5. Завод по переработке рудных концентратов месторождения Меловое в Днепродзержинске проработал до 1989 г.

В Российской Федерации аналогом месторождения Меловое является Ергенинский урановорудный район, расположенный на территории Республики Калмыкия, включающий 13 месторождений урана в глинистых отложениях майкопской серии олигоцен-нижнего миоцена с комплексными фосфор-редкоземельно-урановыми рудами. Запасы урана, подсчитанные в авторском варианте — 59 тыс. т; фосфора — 84,62 тыс. т; редких земель — 260 тыс. т. Наиболее изученным из них является Шаргадыкское месторождение. Основными полезными компонентами месторождения являются уран, фосфор и редкоземельные элементы (РЗЭ). Между ними существует прямая тесная корреляционная связь. Содержание урана в рудной залежи увеличивается от краев месторождения к центру от 0,01 до 0,07 %, составляя в среднем 0,03 %. Редкоземельные элементы представлены преимущественно легкими металлами цериевой группы (более 85 %), среди которых преобладают лантан, церий и неодим (77,7 % от общего количества РЗЭ). Среднее содержание РЗЭ — 0,252 %. Попутными полезными компонентами на месторождении являются: никель, кобальт, молибден, иттрий, скандий, рений.

Основными рудными составляющими являются: фоссилизованный костный детрит (от 15 до 45 %), с которым связаны основные концентрации урана и редкоземельных элементов, а также сульфиды железа, глины и карбонаты, присутствующие в различных соотношениях. Вещество костного детрита представлено фосфатом кальция, который по составу близок к карбонат-фтор-апатиту, осложненному гидроксильной группой, и содержит примесь органических веществ.

По количественному соотношению костного детрита и сульфидов железа на месторождении выделены три типа руд: фосфорный, фосфорно-сульфидный и сульфидный. По химическому составу руды фосфорного типа характеризуются наиболее высокими содержаниями Ca и P, а сульфидного — Fe и S. Фосфорно-



Общий вид рудных гранул, поступающих на выщелачивание

сульфидный тип выделен как переходный и в примерно равной степени обогащен фосфатным веществом и сульфидами железа. Фосфорный тип руды характеризуется наиболее высокими содержаниями урана (до 0,08-0,1 %), приуроченными к скоплениям обломочных частиц и дисперсных образований костного детрита. В смешанном типе руд содержания урана колеблются от 0,035 до 0,056 %, в сульфидном — от 0,017 до 0,03. Аналогичная ситуация и с редкоземельными элементами: в фосфорном типе суммарное их содержание достигает 0,3 %, в то время как в сульфидном типе оно редко превышает 0,1 %.

В 2015–2016 гг. на рудах Шаргадыкского месторождения проведены укрупненные опытные работы по сернокислотному кучному выщелачиванию. Выщелачивание проводилось из рудных гранул (рисунок), полученных в результате окомкования рудного материала дробленого до крупности -20 мм, и уложенных в перколяционные колонны диаметром 1 м и высотой 5 м. Металлы U, TR, Ni, Co, а также P_2O_5 при сернокислотном выщелачивании переходили в продуктивный раствор и извлекались при сорбционном и осадительном переделе. Проведенные работы позволили рекомендовать для отработки методом КВ руды, залегающие на глубине до 120 м, которые можно добывать открытым способом.

Процесс переработки руды и извлечения из нее полезных компонентов включает следующие стадии:

Подготовка руды к выщелачиванию (дробление и грануляция).

Кучное выщелачивание.

Технология кучного выщелачивания и переработки растворов включает следующие переделы:

— доставку автотранспортом на площадку КВ горнорудной массы из карьера с одновременной транспортировкой отработанной руды этим же транспортом до 1500 т/сут;

— дробление добытой руды на конусной дробилке по классу -10 мм с производительностью до 100 т/час;

— окомкование руды с серной кислотой и жидким стеклом в барабанном окомкователе с производительностью до 100 т/час;

— укладку и формирование штабелей КВ штабелеукладчиком и их оборудование системой орошения с производительностью 1 штабель (84 000 т) в 2 месяца или до 1500 т/сут по руде;

— кучное выщелачивание в три стадии — 6 штабелей (по 84 000 т) в год, одновременно в работе 2 штабеля на КВ с общей производительностью по продуктивным растворам (ПР) 230 м³/час и приемом ПР в грунтовые емкости;

— прием растворов в пять грунтовых емкостей: от стадии КВ-1 две грунтовые емкости, одна — на испарении, другая — на приеме по 25 000 м³ каждая; от стадии КВ-2 — одна емкость — 5 000 м³; от стадии КВ-3 — одна емкость — 5000 м³; прием маточных оборотных растворов — одна емкость — 10 000 м³;

— сорбцию никеля и кобальта на смолу Lewatit TP 207 с получением концентрата;

— сорбцию урана на смолу Lewatit K 1000 с получением концентрата;

— осаждение магнезией (MgO) из ПР железа, редких земель и фосфора с получением отдельных первичных фосфатных осадков Fe, PЗМ и Mg;

— спекание фосфатных осадков Fe и PЗМ (10 т/час) с содой (5 т/час) в трубчатой печи при 700 °С с использованием природного газа;

— отмывку фосфора горячей водой из спека и осаждение вторичного фосфата Mg с получением раствора сульфата натрия;

— раскисление серной кислотой первичного и вторичного фосфатов магния с получением раствора фосфорной кислоты и сульфата магния;

— осаждение из раствора известью суперфосфата с получением раствора $MgSO_4$. Выщелачивание отмытого спека раствором серной кислоты (50 г/л) и осаждение из раствора PЗМ шавелевой кислотой 50 % PЗМ-концентрата (3 кг/т руды) с прокалкой оксалатных солей и получением железистого кека (43 кг/т руды), содержащего 180 г/т Sc и 45 % Fe_2O_3 ;

— упаривание маточников и кристаллизация солей сульфатов магния и натрия по 5 т/час каждой соли.

Товарной продукцией являются: суперфосфат с содержанием P_2O_5 27 % (качество соответствует ТУ 2182-003-56937109-2002), урановый концентрат в виде полиураната аммония с содержанием U не ниже 60 % (соответствует ТУ-95.2822.2002), никель-кобальтовый 50 % концентрат (Ni — 37 %, Co — 13 %) в виде смешанных гидроксидов, редкоземельный 50 % концентрат ($\Sigma TR+Y$) в виде смешанных гидроксидов оксалатных солей. Побочной продукцией, получающейся из реагентов, используемых при выщелачивании, является: натрий сернокислый технический (ГОСТ 6318-77, 2 сорт), семиводный сульфат магния (соответствует ГОСТу 4523-77), песок строительный (ГОСТ 8736-2014).

Извлечение в готовую продукцию составило (%): уран — 84, никель — 76, кобальт — 61, $\Sigma TR+Y$ — 63, P_2O_5 — 77 при содержании в 1 т сухой руды (%): урана — 0,035; никеля — 0,05; кобальта — 0,02; $\Sigma TR+Y$ — 0,28; P_2O_5 — 11.

Таблица 3
Результаты расчета технико-экономических показателей эффективности освоения месторождения Шаргадык

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Величина показателя
1	Геологические запасы руды и основных полезных компонентов		
	сухой руды	тыс. т	15117,7
	U	т	5390,0
	ΣTR	тыс. т	36,9
	Y		9,5
	P ₂ O ₅		1556,3
2	Средние содержания полезных компонентов в разведанных запасах		
	U	%	0,036
	ΣTR		0,244
	Y		0,062
	P ₂ O ₅		10,29
3	Годовая производственная мощность предприятия:		
	по вскрышным породам	тыс. м ³	22192,0
	по добыче и переработке руды		
	сырая	тыс. т	629,8
	сухая		500,0
4	Срок обеспеченности рудника запасами	лет	39,0
5	Принятый горизонт оценки	лет	17,0
6	Сквозное извлечение основных компонентов		
	U	%	84,0
	ΣTR+Y		60,0
	P ₂ O ₅		77,0
7	Выпуск товарной продукции за год		
	суперфосфат	тыс. т	157,0
	урановый концентрат	т	250,0
	никелевый концентрат		490,0
	редкоземельный концентрат	тыс. т	1,7
	сульфат магния		4,1
	сульфат натрия		41,0
	песок строительный		млн м ³
8	Инвестиционные расходы, всего		
	в т.ч.: — первоначальные капвложения	млн руб.	9891,7
	в т.ч.: — добыча		6188,1
	переработка		1957,1
	«поддерживающий» капитал		5601,4
	по руднику		5329,9
	по перерабатывающему комплексу		271,5
	оборотные средства		651,4
9	Удельные первоначальные капиталовложения на 1 т годовой мощности по добыче руды	руб.	19783,3
10	Цена 1 т продукции		
	суперфосфат	тыс. руб.	16,8
	урановый концентрат		3477,7
	никелевый концентрат		440,4
	редкоземельный концентрат		278,6
	сульфат магния		15,0
	сульфат натрия		13,0
	песок строительный (1 м ³)		руб.

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Величина показателя
11	Стоимость товарной продукции		
	годового выпуска		4945,9
	суперфосфат	млн руб.	2637,6
	урановый концентрат		869,4
	никелевый концентрат		215,8
	редкоземельный концентрат		473,6
	сульфат магния		61,5
	сульфат натрия		533,0
	песок строительный		155,0
	итога за оцениваемый период		млн руб. 74188,4
12	Годовые эксплуатационные расходы		млн руб. 3257,1
	— в т.ч. амортизация		руб. 902,2
13	Эксплуатационные расходы на 1 т руды		
	в т.ч.: — удобыча		руб. 2334,2
	КВ и передел	3571,7	
	отчисления и платежи	253,9	
	общехозяйственные и коммерческие расходы	354,4	
14	Эксплуатационные расходы за оцениваемый период		млн руб. 48623,8
15	Себестоимость переработки 1 т руды		руб. 6514,2
16	Затраты на 1 руб. товарной продукции		руб. 0,66
17	Прибыль		
	валовая прибыль		млн руб. 1688,8
	за расчетный год		
	за оцениваемый период		25564,6
	чистая прибыль		млн руб. 1251,4
	за расчетный год		
	за оцениваемый период		
18	Амортизация		
	за год		млн руб. 902,2
	за оцениваемый период		руб. 13532,5
19	Чистая прибыль + амортизация		
	за год		млн руб. 2153,5
	за оцениваемый период		руб. 32527,5
20	Норма дисконтирования		% 10,0
21	Дисконтированная сумма инвестиций		млн руб. 12246,5
22	Чистый дисконтированный доход		млн руб. 2661,4
23	Индекс доходности		доли ед. 1,2
24	Внутренняя норма доходности		% 14,4
25	Дисконтированный срок окупаемости первоначальных капитальных вложений годовым доходом		лет 9,5
26	Бюджетная эффективность		
	за год		млн руб. 657,4
	за оцениваемый период		
	за оцениваемый период дисконтированная		
			руб. 9834,0
			4607,1

Отходами производства будут являться рудные хвосты в виде фосфогипса, которые планируется закладывать в отработанное пространство карьера, а также железистый кек с содержанием 180 г/т скандия. Кек планируется складировать для будущей переработки на скандий. Основная доля в товарной продукции приходится на суперфосфат (53 %), далее следуют урановый концентрат (17,6 %), сульфат натрия (10,8 %) и редкоземельный концентрат (9,6 %).

Расчеты выполнены при ставке дисконтирования в размере 10 и 15 %. Срок обеспеченности рудника запасами составляет 39 лет. Принятый горизонт расчета равен 17 годам. Выполненные технико-экономические расчеты (табл. 3) свидетельствуют об экономической эффективности отработки запасов Шаргадыкского месторождения. При ставке дисконтирования 10 % ЧДД равен 2661,4 млн руб.; индекс доходности — 1,2; внутренняя норма доходности — 14,4 %; дисконтированный срок окупаемости капитальных вложений — 9,5 лет; дисконтированная бюджетная эффективность — 4607,1 млн руб.

Основные выводы по результатам проведенных опытных работ сводятся к следующему.

По рыночному сценарию получение урана из фосфатов начнется, как только этот процесс станет выгодным экономически.

Промышленное освоение Шаргадыкского месторождения комплексных фосфор-редкоземельно-урановых руд представляется экономически целесооб-

разным. Проект характеризуется достаточно высокими интегральными показателями как коммерческой, так и бюджетной эффективности при коэффициенте дисконтирования 10 %, но при этом находится на грани окупаемости при применении нормы дисконта 15 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гидрометаллургическая переработка уранорудного сырья* / Под ред. Д.И. Скороварова. — М.: Атомиздат, 1979. — 280 с.
2. *Ласкорин, Б.Н.* Добыча и переработка урановых руд в СССР / Б.Н. Ласкорин, В.А. Мамилов, Д.И. Скороваров, Л.И. Водолазов и др. // *Атомная энергия*. — 1983. — Т. 4. — Вып. 4. — С. 286–292.
3. *Никонов, В.И.* Разработка технологических решений для переработки уранофосфорных руд / В.И. Никонов, К.М. Смирнов, Ю.А. Меньшиков, О.К. Крылова, В.А. Маликов / В сб.: ВНИИХТ-60 лет. / Под ред. Г.А. Сарычева. — М.: ООО «Леонардо-Дизайн», 2011. — С. 145–149.
4. *Практика переработки уранового сырья* / Под ред. Г.А. Машковцева. — М.: ВИМС, 2008. — 269 с.
5. *Ситнова, М.* Минерально-сырьевая база и рынок фосфатов в СНГ (Семинар № 25 симпозиума «Неделя горняка-2007») / М. Ситнова // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2008. — С. 359 — 364.
6. *Uranium 2016: Resources, Production and Demand. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*. — OECD 2016, NEA No.7301.
7. *Patrice Bruneton* — Unconventional Uranium Resources: Challenges and Opportunities. UNFC Workshop, Santiago, Chile, 9 — 12 July 2013.

© Коллектив авторов, 2017

Авдонин Геннадий Иванович // gosha1956@mail.ru
Гуров Владимир Алексеевич // guvalex@bk.ru
Мамошин Михаил Юрьевич // luiso_lucciccio@mail.ru
Пикалова Варвара Сергеевна // pikalova@vims-geo.ru

ОХРАНА НЕДР И ЭКОЛОГИЯ

УДК 550.42; 546.72: 504.05/63

Рихванов Л.П. (Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ФАКТОР ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

Обсуждается всеобщая распространенность естественных радионуклидов. Показана индикаторная роль естественных радиоактивных элементов для решения вопросов генезиса магматических и метасоматических пород, понимания процессов флюидогенного рудообразования и их использования для целей прогнозирования месторождений полезных ископаемых различных типов (урановых, редкометалльных, золоторудных, нефти и газа и др.). **Ключевые слова:** уран, торий, радиоактивность, всеобщая распространенность, индикаторная роль, магматизм, метасоматоз, рудообразование, радиогеохимические признаки.

Rikhvanov L.P. (National research Tomsk Polytechnic University) RADIOACTIVITY AND RADIOACTIVE ELEMENTS AS THE FACTOR OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT AND HIS USE IN SCIENCES ABOUT THE EARTH

The article discusses the universal abundance of natural radionuclides. We have shown the indicative properties of natural radioactive elements for the solution of the problems devoted to genesis of magmatic and metasomatic rocks, fluid-based ore formation processes and their use for the purposes of forecasting of various mineral deposits (uranium, rare metals, gold, oil and gas, etc.). **Keywords:** uranium, thorium, radioactivity, global abundance, indicative role, magmatism, metasomatism, ore formation, radiogeochemical features.

С момента открытия в 1896 г. гражданином Франции Анри Беккерелем явления радиоактивности и носителей этого явления — радиоактивных элементов, обстоятельно изученных Марией и Пьером Кюри, стало ясно, что «...это открытие произвело огромный переворот в научном мировоззрении, поставило перед жизнью и техникой практически новые задачи совершенно