

ВЫДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ В КОНТЕКСТЕ МИРОВЫХ ПРОБЛЕМ ИХ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ

Глущенко Ю.Г., Нечаев А.В., Поляков Е.Г., Левин Б.В.

Хотелось бы обратить внимание на некоторые категории, которые лежат в основе понимания тех процессов в сфере производства и потребления редкоземельных элементов, которые сегодня зримо проявляются как внутри государств, так и на мировом рынке.

а) Цена корзины РЗЭ. До недавнего времени, особенно на фоне безудержного роста цен на мировом рынке редких земель, проблема производства и снабжения ими производителей конечной продукции воспринималась совершенно не дифференцировано. Попытки более глубокого осмысления её выразились в появлении термина «цена корзины РЗЭ», которым оперируют эксперты из Technology Metals Research, ежеквартально оценивающие состояние перспективных проектов в, так называемом TMR Advanced Rare-Earth Projects Index. Отражая, по сути, только динамику цен оксидов РЗЭ определённой квалификации, этот показатель мало что говорит о реальной ценности проекта, но часто используется в спекулятивных целях на стадии принятия стратегических решений.

б) Критические элементы. Шагом в правильном направлении стал глубокий анализ сегодняшней и перспективной востребованности отдельных лантаноидов, их важности для производителей конечной продукции, влияние на поставки возможных геополитических факторов, соотношение отдельных РЗЭ в различных сырьевых источниках и т.д.

В 2011 году министерство энергетики США провело исследование мировых запасов, спроса, и потребления редких материалов, используемых при создании оборудования в секторе чистых технологий и альтернативной энергетики. В ходе данного исследования эксперты пришли к выводу, что ряд редкоземельных металлов являются критическими для энергетических технологий, так как уже в ближайшее время их потребление может превысить объёмы мировых поставок.

В результате сформировалось новое понятие – «критические элементы», от которых зависит устойчивое развитие и обороноспособность государства [1]. Среди них и редкоземельные элементы - празеодим, неодим, европий, тербий, диспрозий и иттрий.

в) Структурный дисбаланс производства и потребления РЗЭ. Сейчас пришло время прислушаться и к тем специалистам, которые уже достаточно давно обращали внимание на существование «структурного дисбаланса» в цепочке «производство – потребление» редких земель [2,3]. Минеральное РЗМ-содержащее сырьё в большинстве

крупнейших эксплуатируемых в настоящее время и перспективных месторождений содержит в своём составе наиболее распространённые в природе лёгкие элементы цериевой группы. Поиски альтернативных китайским источников РЗЭ в последние годы вызвали к жизни более 50 проектов в разных странах, два из которых (Molycorp и Lynas) уже вышли со своей продукцией на рынок, проектные мощности, соответственно, 40 и 22 тыс. т/г преимущественно цериевой (лёгкой) группы. В сырье, добываемом крупнейшими западными компаниями Моликорп и Лайнэс, доля лёгких составляет, соответственно, 98,6 и 94,7%.

Отечественные сырьевые источники в этом смысле не являются исключением. В лопарите, например, их доля превышает 95%, в природном концентрате Томтора – 86%. Поэтому, извлекая из лопарита, допустим, 1 кг тербия, мы выводим на рынок ещё 62,5 кг лантана и более 130 кг церия. Применительно к концентрату Томтора эти цифры выглядят, как 69,5 и 152 кг., которые не относятся к критическим и реализация которых является проблематичной.

Это видно в Таблице 1, которая позволяет сделать аналогичную оценку для других источников редкоземельных элементов.

Таблица 1
Содержание РЗЭ в различных природных и техногенных источниках
(«критические элементы» выделены цветом)

Источник РЗЭ, %	Оксиды РЗЭ, % от общего содержания								
	La+Ce	Nd+Pr	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Y
Лопарит	78	20	0,9	0,08	0,6	0,4	0,12	0,02	-
Томтор	67	19	2,1	0,6	1,6	0,3	0,8	0,3	7,6
Эвдиалит	41	18	4,2	0,95	2,5	0,9	3,4	2,0	23
Фосфогипс	66,5	22,1	2,3	0,6	1,8	0,2	0,9	0,3	3,5
ЭФК	40,8	28,7	4,0	1,0	4,3	0,5	2,3	1,0	18,2

Не следует также забывать и о природной радиоактивности практически всех руд, содержащих РЗМ – извлекая 1 кг тербия мы вынуждены решать проблему захоронения 25 кг тория для лопарита и 10 – для концентрата Томтора. Зарубежные сырьевые источники в этом смысле не являются исключением – в сырье, добываемом крупнейшими западными компаниями Моликорп и Лайнэс, также радиоактивно.

К 2020 г. ожидаются изменения и в поставках иттриевых (тяжёлых) РЗЭ, связанные с созданием горно-металлургических комплексов компаниями Ucore, Orbite, Hastings,

Tasman - эвдиалит месторождения Норра-Кар в Швеции) с производительностью всего 5 000 т/г, но, в основном, тяжёлых! [11].

Несмотря на эти усилия, ведущие эксперты прогнозируют устойчивый дефицит вышеупомянутых «критических» элементов в среднесрочной и более отдалённой перспективе. В 2016 г. он может составить: по европию – 280т, тербию – 100, диспрозию – 200, иттрию – 3 350т. [7].

Главными причинами структурного дисбаланса являются:

- наращивание объемов переработки бастнезита, лопарита, монацита, следствием которого является перепроизводство лёгких РЗЭ;

- ограниченность и локализация месторождений РЗЭ иттриевой группы.

К 2020 г. прогнозируется увеличение производства редких земель до 240-250 тыс. т против 135 000 тонн в 2013г. При этом, в 2020 году ожидается накопление невостребованного оксида церия в количестве более 100 000 тонн, а в его производство вложены значительные средства [5].

Поиск сфер использования легких РЗЭ. Понимая серьёзность возникающих новых проблем, некоторые компании вкладывают деньги в создание новых рынков трудноликвидных лёгких редких земель. Моликорп, например, разработала и освоила производство цериевых соединений для процессов водоподготовки промышленного и гражданского применения и для очистки сточных вод птицефабрик. Коагулянты этой компании SorbX-100 и PhosFIX в несколько раз эффективнее традиционных хлоридов алюминия и железа при очистке от фосфатов, а быстро осаждающийся и не образующий взвесей фосфат церия легко удаляется и не представляет опасности для окружающей среды [4].

Положение с ценами. Однако в целом это не решает ситуации с перепроизводством целого ряда РЗЭ, прежде всего легкой группы. Цена на них падает.

Пройдя за рассматриваемый период максимум для наиболее «критических» позиций, цены большинства редких земель существенно снизились в июле 2014г. и остаются стабильными уже четвёртый месяц подряд (Таблица 2).

Таблица 2
Цены редких земель долл/кг оксида 99% минимум, FOB Китай) [6].

№ п/п	Наименование РЗЭ	август 2013	февраль 2014	ноябрь 2014
1	Церий	6,75	5,25	4,75
2	Диспрозий	505	465	340
3	Европий (99,9)	925	960	725
4	Гадолиний	46,5	46,5	46,5
5	Лантан	5,8	5,8	4,8
6	Неодим	63,0	67,5	58,7
7	Празеодим	96	117	119,5
8	Самарий	9,0	9,0	5,5
9	Тербий	725	825	620
10	Иттрий (99,999)	18	21	13,5

Как видно из таблицы, цены на среднетяжелую группу в значительно меньшей степени подвержены падению.

Ликвидация структурного дисбаланса. Ликвидировать создавшееся положение можно путем перехода к использованию других сырьевых источников. Основным источником тяжёлых редких земель в мире в настоящее время являются ионно-адсорбционные глины юга Китая с содержанием РЗЭ около 0,1мас.% (Табл.3).

Таблица 3
Содержание отдельных РЗЭ (в % от их общего количества) в месторождениях ионно-адсорбционных глин Китая [8].

Name	Ganzhou, Jiangxi								Fujian	Guangxi
	LongNan 1	LongNan 2	LongNan 3	LongNan 4	Xunwu 1	Xunwu 2	Xinfen 1	Xinfen 2	Changting	Chongzuo
La	2.48	7.8	2.18	2.18	38	29.84	26.2	27.56	20.93	19.49
Pr	0.98	2.4	1.08	1.08	7.41	7.14	6	5.62	5.56	5.89
Sm	3.91	3	2.37	2.34	5.32	6.32	4.5	4.54	5	4.64
Gd	6.62	4.4	5.69	5.69	4.21	4.21	4.8	5.96	5.63	4.58
Dy	8.83	7.48	7.48	5.3	1.77	1.77	4.1	3.71	5.03	4.27
Er	5.1	4.26	4.26	3.6	0.88	0.8	2	2.48	2.37	2.05
Yb	3.94	3.34	3.34	2.7	0.62	0.62	1.6	1.13	2.11	1.48
Ce	0.49	2.4	1.09	1.09	3.5	7.18	1.9	3.23	1.83	5.33
Nd	5.07	9	3.47	3.47	30.18	30.18	21.1	17.55	20.45	22.43
Eu	0.3	0.03	0.37	0.1	0.51	0.51	0.71	0.93	0.93	0.72
Tb	1.34	0.9	1.13	1.13	0.46	0.46	0.77	0.68	0.82	0.76
HO	1.6	1.6	1.6	1.4	0.27	0.27	0.8	0.74	0.94	0.89
Tm	0.66	0.6	0.6	Trace	0.13	0.13	0.2	0.27	0.3	0.28
Lu	0.51	0.47	0.47	0.3	0.13	0.13	0.2	0.21	0.3	0.33
Y	58.3	64.1	64.97	56.2	10.07	10.07	25.1	24.26	27.79	26.85

Месторождения ионно-адсорбционных глин – большая редкость. Кроме южного Китая они имеются на Мадагаскаре и небольшое месторождение в нашем Приморье.

Французская компания Rhodia Operations и немецкая Tantalus Rare Earths AG приступают к работам на Мадагаскаре, где подобные китайским ионные глины содержат всего 0,08 мас.% РЗЭ, но тяжёлая группа составляет 20% общего их количества, и считают проект очень конкурентоспособным [9].

В Китае – основном производителе РЗЭ в мире, наиболее остро ощущающем все проблемы редкоземельной отрасли, предпринимаются шаги по скупке за рубежом сырья тяжёлых РЗЭ, в частности, ксенотима у производителей касситерита; развитию системы рециклинга (в 2013 г. - 500 т диспрозия и 200 т тербия) и консолидации производства [5]. Кроме того, там уже выстроена вертикально-интегрированная система производства от шахт до конечной продукции (аккумуляторы, электродвигатели, кондиционеры, средства связи, компьютеры, катализаторы, люминофоры и др.) и продолжают развиваться нисходящие звенья этой цепи. Отмеченные особенности мирового и китайского рынков РЗЭ подтверждают прогнозы ведущих экспертов относительно развивающегося дефицита тяжёлых РЗЭ и устойчивого спроса на них.

Следует также отметить:

- отсутствие (пока) у потенциальных конкурентов Китая промышленной технологической цепочки по глубокому разделению элементов среднетяжёлой группы;
- правительство КНР всячески препятствует трансферу используемой в Китае экстракционной технологии, благодаря которой производится весь спектр редкоземельной продукции.

Остановимся на **ситуации с редкими землями в нашей стране**. В качестве реальных сырьевых источников редкоземельного сырья отечественные эксперты рассматривают:

- лопарит Ловозера;
- семь апатит-нефелиновых месторождений Хибин;
- Туганское монацит-циркон-рутил-ильменитовое месторождение;
- монацит из Госрезерва (Красноуфимск);
- подготовленное для промышленного освоения Катугинское циркон-пирохлор-гагаринит-иттрофлюоритовое месторождение [10].

Эти источники либо находятся в эксплуатации, либо могут стать таковыми в течение ближайших 3-5 лет. Остальные, включая Томтор и Чуктукон, требуют проведения тех или иных работ и находятся в категории потенциальных или перспективных.

В монаците группа лёгких РЗЭ составляет 94%, в лопарите – 95%, поэтому как месторождение тяжёлых редких земель может рассматриваться только Катугинское с содержанием иттриевой группы около 40%.

Кроме перечисленных, существует еще эвдиалитовое месторождение (г.Аллуайв, в 10-ти километрах от промплощадки Ловозерского ГОКа). Содержание тяжёлых в эвдиалите около 35%. Инфраструктурные возможности организации его добычи и переработки очень благоприятны. ИХТРЭМС владеет технологией переработки эвдиалита с получением редких земель, тантала, циркония.

При этом хорошо известно, что большая часть затрат средств и времени от начала проекта до выпуска продукции тратится на создание горно-обогажительного комплекса.

На наш взгляд, реальные и наиболее подготовленные сегодня к освоению источники «критических» РЗЭ в нашей стране – это продукты переработки апатита – фосфогипс и экстракционная фосфорная кислота (ЭФК).

Отсутствие радиоактивности и необходимости в создании горно-обогажительного комплекса даёт им дополнительные преимущества перед рудным сырьём, а в случае фосфогипса решает и серьёзную природоохранную задачу.

Если в отношении направляемого в отвалы фосфогипса имеется теоретическая возможность последующего извлечения РЗЭ хотя бы в неопределённом будущем, то РЗЭ, остающиеся в ЭФК, переходят в категорию рассеянных элементов после внесения фосфорных удобрений в почву.

Проще говоря, мы навсегда теряем ценное сырьё. Это вынуждает нас существенным образом изменить отношение к этому продукту как к источнику редкоземельных металлов, несмотря на их низкое содержание и очевидные проблемы, вызванные огромными потоками кислоты. С учётом реальных потребностей нашей промышленности в редких землях сегодня продукты переработки апатита являются хорошей альтернативой расширению рудной базы. Безусловно, в перспективе такое расширение необходимо, но дальнейшие шаги нужно увязывать с ростом внутренних потребностей и реальной, а не гипотетической возможностью экспорта.

№ 4 Таблица Сравнительный анализ состава РЗЭ в экстракционной фосфорной кислоте и фосфогипсе.

ЭФК	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Σ
% мас.	14,1	26,7	3,9	24,8	4,0	2,3	18,2	1,0	4,3	0,7	0,1-0,12
ФФГ											
% мас.	20,5	45,9	5,1	17,0	2,3	0,9	3,5	0,6	1,8	0,1	

Спектр редких земель в ЭФК безусловно выигрывает в сравнении с фосфогипсом.

Общее содержание всех редких земель в ЭФК - 0,1-0,12%, что вполне сопоставимо с содержанием их в ионно-адсорбционных глинах Китая как по общему количеству, так и по компонентному составу.

В отличие от ионных глин, РЗЭ в ЭФК уже находятся в растворе, что исключает капитальные и эксплуатационные затраты на выщелачивание. Кроме того, производство 1 т редких земель из ионных глин сопровождается получением 2 000 т отходов с необходимостью затрат на их утилизацию [5].

К преимуществам ЭФК перед фосфогипсом следует отнести практически отсутствие отходов переработки, нахождение РЗЭ в ионной форме в растворе, затраты на получение которого уже отнесены на основное производство. Наконец, нет необходимости решать проблему получения и сбыта миллионов тонн стройматериалов.

В Инженерном химико-технологическом центре «Русредмет» разработана сорбционно-экстракционная технология попутного извлечения редкоземельных элементов непосредственно в производственном процессе предприятия ОАО «ФосАгро-Череповец». Она включает в себя:

- коллективную ионообменную сорбцию, которая осуществляется в каскаде пачуков с помощью катионообменной смолы. Процесс сорбции осуществляют в противотоке “ЭФК – смола”. Десорбция проводится также в противотоке раствором аммиачной селитры;
- вторая стадия процесса включает очистную и разделительную экстракцию из нитратных растворов с помощью ТБФ.

Для проведения крупномасштабной проверки процесса в условиях действующего предприятия, компания «Русредмет»:

- разработала Исходные данные для проектирования ОПУ по извлечению РЗЭ из ЭФК;
- осуществила проектирование;
- разработала конструкторскую документацию не стандартное оборудование – прежде всего пачуки (сорбционно-десорбционный каскад), а также экстрактора;
- изготовила значительную часть оборудования (более 100 единиц оборудования);
- осуществила шеф-монтаж;
- 23 апреля 2014 года были завершены пуско-наладочные работы.

В этой связи, создание крупного производства для извлечения редких земель из ЭФК, особенно тяжёлых РЗЭ, в компании ФосАгро-Череповец, представляется коммерчески привлекательной и неотложной задачей, как с экономической, так и организационной и технологической точек зрения.

Преимущества создания такого производства заключаются в следующем:

- обеспеченность собственным сырьём (ЭФК);
- затраты на подготовительные операции (вскрытие сырья) выполнены и отнесены на стоимость других продуктов;

- состав редких земель в ЭФК заметно превосходит по стоимости и востребованности все альтернативные разрабатываемые и подавляющее большинство потенциальных сырьевых источников в стране и сопоставим с составом ионно-адсорбционных глин Китая;

- обученный персонал и опыт проведения разнообразных химико-технологических операций;

- апробированность процесса выделения коллективного концентрата РЗЭ;

- проверенный опыт работы с «Русредметом» в части разработки технологических процессов, аппаратуры для их осуществления и аналитического контроля производства;

- отсутствие активности, а, следовательно, отсутствие необходимости захоронения активных материалов. Кстати говоря, следует отметить, что при переработке лопарита, для получения 1 кг тербия будет получено 25 кг тория, а при переработке томторского концентрата соответственно 10 кг тория. Это - ещё один не просто неликвидный продукт, а продукт, требующий захоронения;

- безотходность технологии – часть основного потока ЭФК заворачивается на ОПУ. После выделения РЗЭ, кислота возвращается в основной поток на получение удобрений;

- отсутствие в настоящее время реальной конкуренции в нашей стране и наличие устойчивого сбыта продукции на мировом рынке.

Встают вопросы экономической эффективности. Поскольку задача не ставилась, расчетов нет. Однако в качестве примера можно опереться на зарубежный опыт. Лайнэс, например, истратил 800 млн долл. для организации переработки 122 тыс. т/г концентрата с выпуском 22 000 т РЗО, где только 1 000 т составляют тяжёлые. Моликорп – более 1 млрд для выпуска 19 800 т/г суммы РЗЭ и менее 1 000 т тяжёлых.

На этом фоне сильно выигрывают небольшие по объёму производства проекты, например, Тасман (эвдиалит месторождения Норра-Кар в Швеции) с производительностью всего 5 000 т/г, но, в основном, тяжёлых! [11].

Допустим, производство построено. Получены индивидуальные РЗЭ.

Что дальше? Безусловно, сами по себе редкоземельные элементы мало что дают.

Должна быть создана цепочка потребителей этих металлов. Создание отрасли потребителей РЗЭ в России предусмотрено подпрограммой «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов», подписанной 30 января 2013 года и действующей в настоящее время.

Предусматривается разработка технологий и строительство предприятий в рамках подпрограммы по трем составным частям:

- разработка технологий извлечения концентратов РЗ и РЗМ из различных сырьевых источников и их разделения;

- разработка технологий получения чистых и высокочистых индивидуальных редких и редкоземельных металлов и их соединений;

- разработка технологий получения материалов и высокотехнологичной продукции нового поколения на основе и с применением редких и редкоземельных металлов, в т.ч.:

а) в металлургии;

б) в производстве магнитов, в т.ч. тонкопленочных;

в) в производстве катализаторов для автомобильной промышленности;

г) в производстве фотолитографов, оптоэлектронных приборов, дисплейных органических светодиодов красного, зелёного и синего цветов свечения, керамического композиционного материала на основе тугоплавких соединений редких и редкоземельных металлов и др.

В результате выполнения программы должны быть созданы промышленные производства полного технологического цикла (от добычи сырья до производства конечной РМ- и РЗМ-содержащей продукции), при полном обеспечении потребностей создаваемых конечных производств по всей номенклатуре РЗМ;

Опыт Китая в развитии РЗМ-промышленности, показывает, что они шли по точно такому же алгоритму действий:

- в 70-ые годы Китай, в основном, экспортировал концентраты минералов;

- в 80-ые годы - химические соединения смешанных РЗМ;

- в начале 90-х годов экспортировались разделённые РЗМ (оксиды и металлы);

- в конце 90-х годов - переработанные РЗМ (люминофоры, магниты);

- в 2000-ые годы - изделия на основе редкоземельных материалов (телевизоры, компьютеры, электрические моторы).

Алгоритм такой же, но только наше отставание оценивается примерно в 30 – 40 лет. Технологий нет, кадров нет, предприятий нет. Все надо начинать практически с нуля.

Интересная деталь. США прекратили производство на Маунтин Пасс в 2002 году. Прошло 10 лет – и правительственный доклад констатирует: «Мы потеряли все свои мощности по технологической цепочке, включая интеллектуальные». (<http://aftershock-2.livejournal.com/268310.html>.) Если в Соединенных Штатах имеются трудности с квалифицированными инженерами – то, что говорить о России.

Тем не менее, замысел очень хороший. Будем надеяться на то, что данная программа заработает и на выходе – 2016 – 2020 годы мы получим современную промышленность, не только производящую РЗЭ, но и в полной мере использующую их в производстве товаров народного потребления, современных средств коммуникаций, научных приборах, современном оружии, наконец.

В заключение хотелось бы отметить следующее. Применение редкоземельных элементов является серьезным показателем уровня промышленности любой страны.

Если иметь в виду сегодняшнее экономическое и международное положение России, то не факт, что нефть будет дорогой, а, как минимум, она будет нестабильна, то есть цены на нефть будут колебаться. Выгодные условия в 2010-2013 годах, когда мировые цены на нефть были на относительно высоком уровне, не в полной мере использованы для технологического рывка. Мы решили, что кризис закончился. А между тем:

- изменилась экономическая антикризисная стратегия США;
- за это время Европейский союз свалился в кризис;
- Китай начал все активнее терять темпы роста.

Как видим, в мировой экономике наступила масса событий, которые негативно влияют сейчас на рынок нефти, что негативно сказывается на нашей стране. Было бы крупной ошибкой ждать, когда что-то изменится в лучшую сторону.

Необходимо побороть упрямое представление, будто буря в пустыне утихнет сама, а мы ее переждем и продолжим продавать сырье за нефтедоллары.

РЗЭ может стать одним из звеньев, потянув которое, страна может выйти на новый технологический и экономический уровень.

Бездействие убьет экономику.

Выводы:

1. После резкого скачка цен на РЗЭ в 2010 – 2011 годах, рынок стабилизировался. В немалой степени это связано с появлением на рынке крупных производителей РЗЭ, главные из которых – Моликорп и Лайнес.

2. В последнее время объявлено о разведанных редкоземельных месторождениях вне территории Китая.

3. Возможно через некоторое время монополия Китая в производстве РЗЭ может снизиться, возможности резкого изменения ценовой политики резко упадут. Более того, возможно в обозримом будущем Китай станет перед проблемой нехватки РЗЭ тяжелой группы.

4. Прошло 4 года с момента резкого скачка цен на РЗЭ (2010г.). Задолго до этого роль и значение РЗЭ в промышленности были нам известны. Уже тогда должна была развернуться работа по производству и потреблению РЗЭ. Однако только в сентябре 2013 года была сформирована программа, объявлены конкурсы на разработку технологий. Мы опаздываем, хотя шанс успеть еще есть.

Литература:

1. Moss R.L., Tzimas E., Willis P., Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector . Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2013. 242 P.
2. Falconnet P. // J. Less-common Met. 1985. V. 111. No1-2. P. 9-15.
3. Binnemans K., Jones P. T., van Acker K., et al.// J. of Metals 2013. V. 65. P. 846-848.
4. <http://www.molycorp.com/technology/advanced-water-technologies/>
5. Lifton J.// InvestorIntel. Oct. 2, 2013.
6. <http://www.metal-pages.com/metalprices/rareearths/>
7. Kingsnorth, D. J., IMCOA – RARE EARTHS: Reducing our dependence upon China, Metal Pages Rare Earths Conference, Beijing, September 2011/February 2012.
8. <http://investorintel.com/rare-earth-intel/analyzing-chinas-heavy-rare-earth-element-reserves-part-1-ion-absorbed-clays-illegal-mining/>
9. (<http://www.tre-ag.com/~media/Files/T/Tantalus-Rare-Earths/Attachments/pdf/media>).
10. Быховский Л.З., Ануфриева С.И., Тигунов Л.П. Реальные сырьевые источники редкоземельного сырья. //Тез. докл. конф. «Актуальные вопросы получения и применения РЗМ». М.: «ГИНЦВЕТМЕТ», 2014. С.33-38.
11. Lifton J. // The Gold Report (7/9/13).
12. <http://investorintel.com/rare-earth-intel/title/>