

ИЗВЛЕЧЕНИЕ И РАЗДЕЛЕНИЕ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ЭВДИАЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА НОВЫМИ РЕАГЕНТАМИ КЛАССА ФОСФОРИЛКЕТОНОВ

© 2022 г. А. М. Сафиулина^{а,*}, А. А. Семенов^а, А. В. Лизунов^а, И. Г. Лесина^а,
Е. И. Горюнов^б, И. Б. Горюнова^б, Г. В. Бодрин^б, В. К. Брель^б, И. Г. Тананаев^{б, 2}

^а *Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов
им. акад. А. А. Бочвара, 123060, Москва, ул. Рогова, д. 5а*

^б *Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН,
119334, Москва, ул. Вавилова, д. 28, стр. 1*

² *Кольский научный центр РАН, 184209, Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, д. 14*

² *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 19
e-mail: amsafulina@bochvar.ru

Поступила в редакцию 14.04.2022, после доработки 08.10.2022, принята к публикации 10.10.2022

С помощью 5-(дифенилфосфорил)гексан-3-она суммарный концентрат тяжелых лантанидов, цирконий, скандий, а также эманулирующие уран и торий из растворов вскрытия эвдиалитового рудного концентрата в рамках одной технологической стадии экстракционного процесса могут быть извлечены. Метод позволяет разделять компоненты редкометалльного сырья различного происхождения и получать концентраты, удобные для дальнейшей переработки. Предлагаемый новый реагент класса фосфорилкетон может быть успешно применен при экстракционной переработке минерального и техногенного сырья, позволяя извлекать и концентрировать редкоземельные металлы, а также отделять их от сопутствующих примесей, в частности, от радиоактивных урана, тория и продуктов их распада.

Ключевые слова: уран, торий, лантаниды, редкоземельные металлы, экстракция, переработка, извлечение, разделение, фосфорорганические экстрагенты, фосфорилкетоны, минеральное и техногенное сырье, эвдиалит, фосфогипс.

DOI: 10.31857/S0033831122060077, **EDN:** MFWOUY

При переработке минерального сырья, содержащего редкоземельные и редкие металлы (РЗМ и РМ), как природного, так и техногенного происхождения образуются низкоактивные радиоактивные отходы (РАО), обусловленные в основном присутствием эманулирующих урана и тория. Требованиями органов государственного регулирования предусматривается передача этих РАО на хранение с последующим захоронением, что существенно снижает экономическую эффективность производства концентратов и другой продукции на основе РМ и РЗМ, а также привлекательность проектов по созданию новых производств [1–3]. При этом в получаемых отходах содержатся ценные компоненты – уран и торий, которые могут быть выделены и примене-

ны в ядерном топливном цикле атомных электростанций. Использование перспективного торий-уранового топливного цикла позволит существенно расширить топливную базу отечественной атомной энергетики [4–8]. Таким образом, выделение РМ и РЗМ как в виде концентратов, так и в индивидуальной форме является актуальной радиохимической задачей.

В силу острой дефицитности и высокой стоимости РМ и РЗМ приходится рассматривать в качестве исходного сырья для их получения не только традиционное полиметаллическое сырье, но также и новые природные и техногенные источники этих металлов. В этом отношении интересен, например, минерал эвдиалит, который является сложным сили-

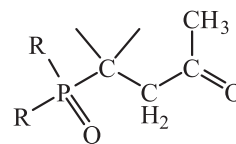
катом натрия, кальция и циркония [9–13]. Эвдиалит содержит до 2.5% лантанидов, причем в нем высоко содержание металлов «тяжелой» иттриевой подгруппы, наиболее ценной, дефицитной и востребованной атомной энергетикой, так как гадолиний и эрбий широко применяются в качестве выгорающих поглотителей в твэлах АЭС [14–16]. Эвдиалит широко представлен среди минералов месторождений Кольского полуострова [12], содержит помимо РЗМ ценные уран, торий, цирконий и скандий, кроме того, он легко вскрывается кислотами даже без предварительной активации, что упрощает его переработку [13]. Переработка эвдиалита с целью извлечения из него РЗМ рассмотрена, в частности, в работах [17–20].

Из техногенного сырья, содержащего редкие металлы, очень важным потенциальным сырьевым источником является так называемый фосфогипс – крупнотоннажный отход переработки апатита, в котором концентрируется большая часть содержащихся в нем РЗМ [21, 22]. Помимо собственно гипса (сульфата кальция), фосфогипс содержит также значительные количества остаточной фосфорной кислоты, фтора, железа, алюминия и стронция. Содержание РЗМ в фосфогипсе невелико (0.3–1%), но его переработка представляет интерес также для попутного получения высококачественных стройматериалов и для решения важной экологической проблемы, связанной с накоплением огромных количеств фосфогипса в отвалах производств минеральных удобрений и фосфорной кислоты. Ранее нами исследована экстракция редкоземельных элементов, урана(VI) и тория(IV) из растворов вскрытия фосфогипса рядом известных фосфорорганических соединений: трибутилфосфатом, триоктилфосфиноксидом, бис(2-этилгексил)фосфорной кислотой, а также фосфорилкетонем – 5-(дифенилфосфорил)гексан-3-оном [23]. Установлено, что наиболее эффективным реагентом для получения коллективного концентрата лантанидов является указанный фосфорилкетон [23].

При переработке сырья, содержащего редкие металлы в достаточно низких концентрациях, особенно важен выбор правильной технологии, которая позволяла бы как концентрировать ценные компоненты, так и очищать их от попутно извлекаемых металлов. Кроме того, важно обеспечить возможность селективного выделения индивидуальных элементов с необходимым уровнем чистоты из concentra-

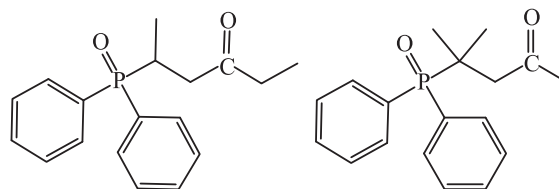
тов. Жидкостная экстракция, применяемая в технологии редких металлов, не всегда отвечает всей совокупности требований, включая экономическую целесообразность и экологическую приемлемость процесса [24, 25]. Одним из важнейших способов управлять технологическим процессом гидрометаллургической переработки редкометалльного сырья является выбор экстрагента. Традиционно используемые нейтральные фосфорорганические реагенты, в частности, трибутилфосфат, имеют довольно низкие коэффициенты распределения и разделения лантанидов, поэтому возникает потребность в поиске новых, более эффективных, но при этом несложных и недорогих в синтезе, доступных химических реагентов для решения этих задач.

Ранее упоминалась возможность использования для выделения РЗМ фосфорилкетонов [26–28] следующего структурного вида:



R = *n*-Pr (**a**), *n*-Bu (**b**), *n*-C₅H₁₁ (**c**), *n*-C₆H₁₃ (**d**), *n*-C₈H₁₇ (**e**), Ph (**f**)

Нами было установлено, что фосфорилсодержащие кетоны являются весьма эффективными и селективными экстрагентами для извлечения и группового разделения *f*-элементов при экстракции из модельных азотнокислых растворов в хлороформ. При этом наиболее доступны в плане синтеза соответствующие *P,P*-дифенилфосфорилалканоны, получаемые из коммерческого сырья.



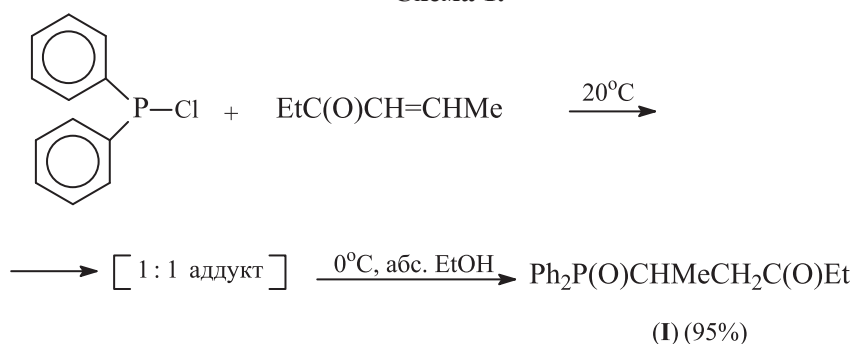
I

II

Наработку укрупненной партии лиганда **I** проводили на основе двухстадийного one-pot процесса с использованием в качестве фосфорорганического исходного соединения промышленно доступного дифенилхлорфосфина Ph₂PCl (схема 1).

На первой стадии процесса этот хлорфосфин и соответствующий енон при комнатной температуре

Схема 1.



в отсутствие растворителя образуют твердый 1 : 1 аддукт, который после обработки абсолютным этанолом при 0°C превращается в фосфорилированный алканон – 5-(дифенилфосфорил)гексан-3-он **I**. Его выделяли из реакционной смеси с выходом, близким к количественному, фильтрацией через Al_2O_3 . Состав **I** был подтвержден элементным анализом, а его строение доказано данными спектров ЯМР (^1H и $^{31}\text{P}\{^1\text{H}\}$) [23].

Модельный лиганд **II** был синтезирован нами по известной методике [27].

На примере фосфорилкетона **II** и изомерного ему фосфорилкетона **I** впервые показано, что изменение структуры алкильной части изомерных фосфорилкетонов может приводить к существенному увеличению их эффективности и селективности как экстрагентов.

Такое модифицирование, а именно перенос Мегруппы от α - к δ -углеродному атому *P*-алкильного заместителя, содержащего $\text{C}=\text{O}$ -фрагмент, должно приводить одновременно к снижению стерических затруднений при координации фосфорильного кислорода молекулы экстрагента к катиону металла и к увеличению липофильности как самого экстрагента, так и соответствующих экстрагируемых комплексов. Показано, что при извлечении *f*-элементов из модельных азотнокислых растворов в хлороформ экстракционная способность и селективность фосфорилкетона **I** существенно выше, чем у изомерного ему фосфорилкетона **II**, а также известных нейтральных фосфорорганических соединений (НФОС) – трибутилфосфата (ТБФ), триоктилфосфиноксида (ТОФО) и (дibuтилкарбаомилметил)дифенилфосфиноксида (КМФО). Продемонстрирована возможность использования фосфорилкетона **I** для эффективного извлечения ценных компонентов (циркония, скандия и сум-

марного концентрата тяжелых РЗЭ) из растворов вскрытия эвдиалита в рамках одной технологической стадии экстракционного процесса [29].

Первоначально положительный эффект указанной выше трансформации фосфорилкетонов был выявлен в модельных экспериментах по экстракции ряда *f*-элементов из азотнокислых растворов в хлороформ. Было показано, что эффективность и селективность фосфорилкетона **I** при извлечении лантанидов существенно выше, чем его прототипа **II** и известных НФОС: ТБФ, ТОФО и КМФО (рис. 1).

При этом оба фосфорилкетона не экстрагируют торий и относительно плохо экстрагируют уран, что весьма полезно при использовании этих соединений для разделения *f*-элементов из природного сырья, так как коллективный экстракт лантанидов практически не будет содержать примесей радиоактивных актинидов. Продукты радиоактивного распада тория и урана, в частности, изотопы радия,

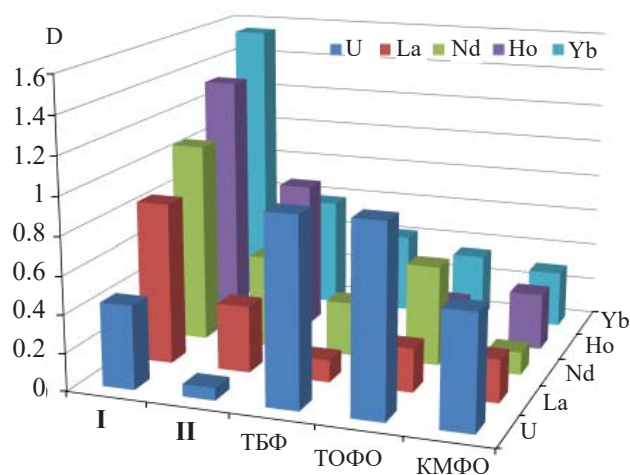


Рис. 1. Сравнение коэффициентов распределения U(VI), La(III), Nd(III), Ho(III) и Yb(III) при экстракции лигандами **I**, **II**, ТБФ, ТОФО и КМФО из 3.75 моль/л HNO_3 (0.01 моль/л раствор в CHCl_3 , 0.25 ммоль/л раствор соли в водной фазе).

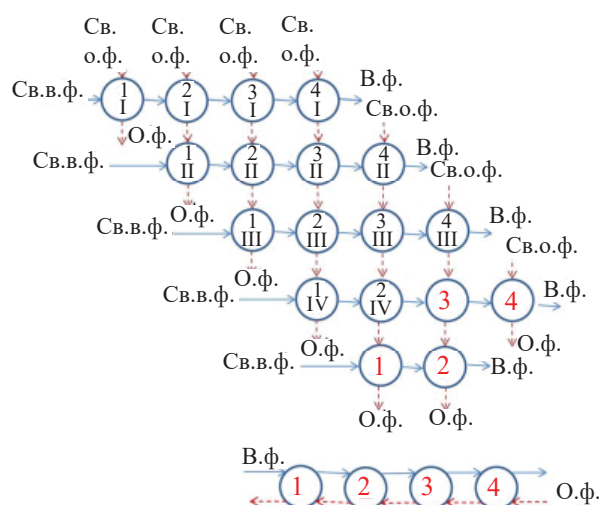


Рис. 2. Моделирование четырехступенчатого противоточного каскада. Св.в.ф. – свежая водная фаза, Св.о.ф. – свежая органическая фаза, О.ф. – органическая фаза, В.ф. – водная фаза.

также не будут переходить в органическую фазу при экстракции, что при выделении РЗМ позволит избавиться от всех радиоактивных примесей и существенно удешевить и упростить схему переработки минерального и техногенного сырья. Возможность использования фосфорилкетона I для экстрационного выделения ценных компонентов из растворов вскрытия рудного материала была исследована в экспериментах, моделирующих жидкостной экстрационный противоточный каскад.

Объектом исследования был выбран эвдиалитовый концентрат Ловозерского ГОК. Перед вскрытием нами был определен гранулометрический и элементный состав концентрата. Гранулометрический состав концентрата исследовали методом малоуглового рассеяния лазерного излучения (LALLS, лазерной дифракции) с применением дифрактометра Analyzette 22 Compact (Fritsch), распределение частиц по размерам рассчитывали с использованием теории Фраунгофера. Средний размер частиц, полученный описанным способом, составил 120 мкм, размеры ~90% частиц находятся в интервале от 30 до 200 мкм.

Таблица 1. Элементный состав эвдиалитового концентрата

Элемент	Si	Al	Fe	Zr	Mn	Ca	Na	K	Ti
Содержание, мас%	49.97	11.65	11.55	8.67	3.81	3.13	2.63	2.01	1.96
Элемент	Sr	Cl	Nb	Mg	P(V)	Hf	Ba	Mo	Ta
Содержание, мас%	1.25	0.675	0.503	0.309	0.292	0.122	0.064	0.039	0.031
Элемент	S	Ni	La–Lu+Y		La–Nd		Sm–Lu+Y		Y
Содержание, мас%	0.023	0.017	1.22		0.77		0.45		0.403

Элементный анализ образца эвдиалитового концентрата Ловозерского горно-обогатительного комбината (ГОК) выполняли методом бесстандартной рентгенофлуоресцентной спектрометрии с применением волнодисперсионного РФА-спектрометра ARLAdvant'X и программного обеспечения UniQuant. Программное обеспечение UniQuant использовали без каких-либо коррекций, результаты получены в виде массовых процентов без учета содержания кислорода и представлены в табл. 1, а в виде массовых процентов индивидуальных компонентов относительно суммы РЗЭ – в табл. 2.

Вскрытие эвдиалитового концентрата (6 г) проводили 6 моль/л H_2SO_4 при перемешивании и температуре $70^\circ C$ в течение 1.5 ч. Из полученного сернокислотного раствора металлы выделяли в виде гидроксидов с NH_4OH . Вследствие высокого содержания циркония в растворах вскрытия осаждение в виде гидроксидов позволяет существенно снизить концентрацию в растворе, направляемом на экстракцию, оксо-катионов ZrO^{2+} и $Zr_2O_3^{2+}$, которые негативно влияют на процесс, образуя третьей фазы [18]. Полученный осадок растворили в 4 моль/л HNO_3 объемом до 25 мл, затем проводили обескремнивание с ГКЖ-11н (водный раствор метилсиликоната натрия с содержанием не менее 5% Si). Из полученного раствора нитратов металлов проводили экстракцию с использованием растворов I в хлороформе.

Нами использована схема, заключающаяся в имитации противоточного непрерывного процесса периодическим 4-кратным повторением межфазных контактов по схеме перекрестного тока (рис. 2).

Эта схема позволяет получить концентрационный профиль компонентов по ступеням каскада и на основании этих данных оценить эффективность экстрационного процесса. При использовании предложенной схемы моделирования принимали, что каждый контакт несмешивающихся фаз эквивалентен одной идеальной (теоретической) ступени.

В ячейке 1 исходный раствор контактирует со свежей порцией экстрагента, экстракт отбрасывают, а рафинат экстрагируют свежей порцией экстрагента в ячейке 2. После этого экстракт подают в ячейку 1 второй ступени, а рафинат – в ячейку 3 первой ступени и т.д. Экстракты движутся сверху вниз, а рафинаты – слева направо. Соотношение фаз при контактах составляло 1 : 1 и не изменялось в продолжение всего исследования.

Верхний ряд операций (рис. 2) представляет собой четыре ступени экстракции в перекрестном токе (исходная смесь четыре раза экстрагируется одинаковым количеством экстрагента). Соответственно после указанных операций концентрация металлов в рафинате будет значительно меньше концентрации конечного рафината (после четвертой ступени) при моделировании противоточного каскада (исчерпывающая экстракция). С увеличением числа операций конечная концентрация металлов в рафинате возрастает.

Элементный состав водной фазы анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой ИСП-МС с использованием прибора Agilent 7500ce (Agilent Technologies, США). Состав органической фазы не анализировали.

В ходе первого эксперимента по моделированию противоточного каскада в качестве исходной водной фазы был использован раствор после вскрытия эвдиалита, выполненного по методике, описанной выше, в качестве исходной органической фазы – раствор 0.01 моль/л **I** в хлороформе. В ходе второго эксперимента в качестве исходной водной фазы использовали рафинат из первого эксперимента, в качестве исходной органической фазы – раствор 0.05 моль/л **I** в хлороформе. Стационарные концентрационные профили по ступеням каскада приведены в табл. 3 и 4. Из представленных данных видно, что при экстракции раствором 0.01 моль/л **I** достигается практически полное извлечение в органическую фазу одного из макрокомпонентов раствора – циркония, одновременно в органическую фазу практически полностью переходит скандий и примерно наполовину – кальций. В то же время значимой экстракции ряда других макрокомпонентов – железа, титана, как и суммы РЗЭ, не отмечается. Таким образом, предварительная стадия экстракционного разделения, заключающаяся в освобождении технологического раствора от ряда макроком-

Таблица 2. Массовые доли групп РЗЭ и некоторых индивидуальных РЗЭ в эвдиалитовом концентрате относительно общей суммы РЗМ

Элементы	La–Nd	Ce	Sm–Lu+Y	Y
Содержание, мас%	63.2	0.40	36.8	0.40

понентов экстракцией их в разбавленный раствор **I**, позволяет эффективно очистить раствор лишь от одного из компонентов – циркония. Тем не менее, это следует признать важным результатом, так как высокое содержание циркония в технологическом растворе существенно снижает эффективность экстракции РЗЭ и может приводить к ряду технологических трудностей, например, к образованию третьих фаз. Технологическая стадия очистки от циркония необходима и может быть организована в рамках единого аппаратно-технологического решения с последующей стадией группового разделения РЗЭ. В результате второго эксперимента на четырех теоретических ступенях экстракции при использовании фосфорилкетона **I** в концентрации 0.05 моль/л в хлороформе возможно групповое разделение лантанидов по границе Pr–Sm, при этом легкие РЗЭ, уран(VI) и торий(IV) преимущественно остаются в водной фазе, а тяжелые РЗЭ переходят в органическую. После четырех ступеней противоточного каскада элементы группы La–Sm, а также уран(VI) и торий(IV) практически полностью остаются в водной фазе, в то время как тяжелые лантаниды переходят в органическую фазу. При этом Tm и Lu извлекают количественно, Eu и Ho – на 95–97%, а Gd, Tb, Dy, Er и Yb – на 80–90%. Содержание Y в водной фазе после второго цикла уменьшается почти в 10 раз (с 52 до 5 мг/л), т.е. степень его извлечения достигает 88%.

Таким образом, предлагаемый новый реагент класса фосфорилкетонов может быть успешно применен при экстракционной переработке минерального и техногенного сырья, позволяя извлекать и концентрировать РЗМ, а также отделять их от сопутствующих примесей, в частности, от радиоактивных урана, тория и продуктов их распада. В рамках одной технологической стадии экстракционного процесса возможно выделение отдельной фракции циркония и скандия. Кроме того, возможно разделение редкоземельных металлов на границе Nd–Sm с получением концентратов с содержанием тяжелых лантанидов, а также концентратов эманулирующих урана и тория. Этот метод позволяет разделять ком-

Таблица 3. Стационарный профиль концентраций компонентов по ступеням моделируемого противоточного каскада при экстракции раствором I с концентрацией 0.01 моль/л

Элемент	Содержание, мг/л				
	Исходный раствор	x_1	x_2	x_3	x_4
Ca	40	21	15	21	16
Sc	0.36	0.24	0.18	0.01	≤0.01
Ti	46	47	47	48	35
Fe	330	330	330	330	330
Y	53	53	53	55	52
Zr	720	510	370	89	3.7
La	6.6	6.6	6.6	6.8	6.8
Ce	15	15	15	15	15
Pr	2	2	2	2.1	2
Nd	8.6	8.5	8.4	9.1	8.7
Sm	3.1	3	3	3.4	3.1
Eu	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3
Gd	6.2	6.1	6.1	6.6	6.2
Tb	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3
Dy	10	10	10	11	9.8
Ho	2.3	2.3	2.3	2.4	2.2
Er	7.5	7.5	7.4	7.7	7.1
Tm	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1
Yb	7.2	7.2	7.2	7.4	6.7
Lu	0.99	0.99	0.99	1	0.92
Th	0.56	0.55	0.56	0.55	0.55
U	2.0	1.99	1.98	1.95	1.95

поненты редкометалльного сырья различного происхождения и получать концентраты, удобные для дальнейшей переработки.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00697-22-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Таблица 4. Стационарный профиль концентраций компонентов по ступеням моделируемого противоточного каскада при экстракции раствором I с концентрацией 0.05 моль/л

Элемент	Содержание, мг/л				
	Исходный раствор	x_1	x_2	x_3	x_4
Ca	16	18	15	12	11
Ti	35	33	32	30	27
Fe	330	330	320	330	325
Y	52	31	17	8	5
Zr	3.7	0.8	0.1	0.05	< 0.01
La	6.8	6.5	6.5	6.3	6.3
Ce	15	15	15	15	14
Pr	2.0	2.2	2.0	2.0	2.1
Nd	8.7	8.3	7.6	7.1	6.8
Sm	3.1	2.2	1.5	1.1	0.9
Eu	1.3	0.7	0.4	0.1	0.07
Gd	6.2	5.0	3.7	2.5	1.6
Tb	1.3	0.6	0.2	0.08	0.04
Dy	9.8	7.0	5.1	3.9	2.6
Ho	2.2	1.3	0.6	0.2	0.05
Er	7.1	5.0	3.1	2.2	1.5
Tm	1.1	0.6	0.3	0.08	<0.01
Yb	6.7	4.8	2.2	1.0	0.6
Lu	0.92	0.42	0.08	0.02	<0.01
Th	0.55	0.54	0.54	0.53	0.53
U	1.95	1.92	1.92	1.9	1.9

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков В.А., Яценко В.А., Крюков Я.В. // Горная пром-сть. 2020. № 5. С. 68–84.
<http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2020-5-68-84>.
2. Кондратьев В.Б. // Горная пром-сть. 2017. № 4 (134). С. 48–54.
3. Никулин А.А. // Пробл. нац. стратегии. 2014. № 1. С. 134–152.
4. Суглобов Д.Н., Яковлев Р.М., Мясоедов Б.Ф. // Радиохимия. 2007. Т. 49, № 5. С. 385–392. (Suglobov D.N., Yakovlev R.M., Myasoedov B.F. // Radiochemistry. 2007. Vol. 49, N 5. P. 441–448.
<https://doi.org/10.1134/S106636220705001>)

5. Бобров Е.А., Теплов П.С., Гурин А.В., Андрианова Е.А., Бландинский В.Ю., Гроль А.В. // Вопр. атом. науки и техники. Серия: Физика ядер. реакторов. 2019. № 3. С. 28–38.
6. Алексеев П.Н. // Инноватика и экспертиза. 2016. Вып. 3 (18). С. 146–174.
7. Xiao S.C., Zhao J., Heng X., Sheng X.Y., Zhou Z., Yang Y. // Fusion Sci. Technol. 2015. Vol. 68, N 3. P. 566–572.
<https://doi.org/10.13182/FST14-907>
8. Irwanto D., Obara T. // J. Nucl. Sci. Technol. 2012. Vol. 49, N 2. P. 222–229.
<https://doi.org/10.1080/00223131.2011.649080>
9. Аксенов С.М., Расцветова Р.К., Митчелл Р., Чакрабартти А. // Кристаллография. 2014. Т. 59. № 2. С. 190–198 (Aksenov S.M., Rastsvetaeva R.K., Mitchell R.H., Chakrabarty A. // Crystallogr. Rep. 2014. Vol. 59, N 2. P. 146–154.
<https://doi.org/10.1134/S1063774514020023>
10. Chakrabarty A., Pruseth K.L., Kumar Sen A. // J. Geol. Soc. India. 2011. Vol. 77. P. 12–16.
<https://doi.org/10.1007/s12594-011-0003-x>
11. Amores-Casals S., Gonçalves A.O., Melgarejo J.-C., Molist J.M. // Minerals. 2020. Vol. 10. N 1. Paper 5. <https://doi.org/10.3390/min10010005>
12. Маслобоев В.А., Лебедев В.Н. Редкоземельное сырье Кольского полуострова и проблемы его комплексной переработки. Апатиты: Изд-во КНЦ АН СССР, 1991. 152 с.
13. Захаров В.И., Скиба Г.С., Соловьев А.В., Лебедев В.Н., Майоров Д.В. // Цвет. металлы. 2011. №.11. С. 25–29.
14. Казьмин Д.Н., Якубенко И.А. // Глобальная ядер. без-опасность. 2013. № 4 (9). С. 53–57.
15. Лысыков А.В., Кулешов А.В., Самохвалов А.Н. Патент RU 2362223 // Б.И. 2009. № 20.
16. Новиков В.В., Бибилашвили Ю.К., Михеев Е.Н., Грачёв А.Ф., Калыгин В.В., Овчинников В.А., Кобылянский Г.П. // Атом. энергия. 2008. Т. 105, Вып. 4. С. 205–210. (Novikov V.V., Bibilashvili Yu.K., Mikheev E.N., Grachev A.F., Kalygin V.V., Ovchinnikov V.A., Kobylanskii G.P. // Atomic Energy. 2008. Vol. 105, N 4. P. 262-269.
<https://doi.org/10.1007/s10512-009-9095-4>)
17. Дибров И.А., Чиркст Д.Э., Матвеева Т.Е. // Цвет. металлы. 2002. № 12. С. 38–41.
18. Матвеев В.А., Майоров Д.В., Соловьев А.В. // Цвет. металлы. 2018. № 1. С. 5–28.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2018.01.02>
19. Лебедев В.Н., Руденко А.В. // Хим. технология. 2002. № 12. С. 27–30.
20. Лебедев В.Н. // ЖПХ. 2003. Т. 76, № 10. С. 1601–1605 (Lebedev V.N. // Russ. J. Appl. Chem. 2003. Vol. 76, N 10. P. 1559–1563.
<https://doi.org/10.1023/B:RJAC.0000015712.10513.94>)
21. Mikaba J.-L., Eze C.P., Perea O., Petrik L.F. // Minerals. 2021. Vol. 11. Paper 1051.
<https://doi.org/10.3390/min11101051>
22. Косынкин В.Д., Селивановский А.К., Федулова Т.Т., Смирнов К.М., Крылова О.К. // Цвет. металлы. 2012. № 3. С. 31–34.
23. Сафиулина А.М., Матвеева А.Г., Евтушенко А.В., Лизунов А.В., Горюнов Е.И., Горюнова И.Б., Бодрин Г.В., Семёнов А.А., Брель В.К. // ЖОХ. 2015. Т. 85, №9. С. 1551–1557 (Safulina A.M., Matveeva A.G., Evtushenko A.V., Lizunov A.V., Goryunov E.I., Goryunova I.B., Bodrin G.V., Semenov A.A., Brel V.K. // Russ. J. Gen. Chem. 2015. Vol. 85, N 9. P. 2128–2134.
<https://doi.org/10.1134/S1070363215090170>)
24. Трейбал Р. Жидкостная экстракция. М.: Химия. 1966. 724 с.
25. Альдерс Л. Жидкостная экстракция. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 258 с.
26. Сафиулина А.М., Матвеева А.Г., Дворянчикова Т.К., Синегрибова О.А., Ту А.М., Татаринов Д.А., Костин А.А., Миронов В.Ф., Тананаев И.Г. // Изв. АН. Сер. хим. 2012. № 2. С. 390–396 (Safulina A.M., Matveeva A.G., Dvoryanchikova T.K., Sinegribova O.A., Tu A.M., Tatarinov D.A., Kostin A.A., Mironov V.F., Tananaev I.G. // Russ. Chem. Bull. 2012. Vol. 61, N 2. P. 392–398.
<https://doi.org/10.1007/s11172-012-0055-0>)
27. Татаринов Д.А., Миронов В.Ф., Костин А.А., Баронова Т.А., Бузыкин Б.И. // ЖОХ. 2010. Т. 80, № 7. С. 1377–1379 (Tatarinov D.A., Mironov V.F., Kostin A.A., Baronova T.A., Buzykin B.I. // Russ. J. Gen. Chem. 2010. Vol. 80, N 7. P. 1211–1213.
<https://doi.org/10.1134/S1070363210070297>)
28. Матвеева А.Г., Ту А.М., Сафиулина А.М., Бодрин Г.В., Горюнов Е.И., Горюнова И.Б., Синегрибова О.А., Нифантьев Э.Е. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 6. С. 1309–1316 (Matveeva A.G., Tu A.M., Safulina A.M., Bodrin G.V., Goryunov E.I., Goryunova I.B., Sinegribova O.A., Nifant'ev E.E. // Russ. Chem. Bull. 2013. Vol. 62, N 6. P. 1309–1316.
<https://doi.org/10.1007/s11172-013-0184-0>)
29. Сафиулина А.М., Матвеева А.Г., Лизунов А.В., Бодрин Г.В., Горюнов Е.И., Григорьев М.С., Семёнов А.А., Брель В.К., Нифантьев Э.Е. // Докл. АН. 2015. Т. 460. № 6. С. 673–676 (Safulina A.M., Matveeva A.G., Lizunov A.V., Bodrin G.V., Goryunov E.I., Grigor'ev M.S., Semenov A.A., Brel V.K., Nifant'ev E.E. // Dokl. Chem. 2015. Vol. 460, Part 2. P. 57–60.
<https://doi.org/10.1134/S001250081502007X>)