

ЭКСТРАКЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ И РАЗДЕЛЕНИЕ РЕДКИХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 5-(ДИФЕНИЛФОСФОРИЛ)ГЕКСАН-3-ОНОМ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ФОСФОГИПСА

© 2023 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, С. М. Аксенов^в, И. Г. Тананаев^{в,з}

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

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

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

^з *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
119991, Москва, ул. Косыгина, д. 19*

*e-mail: amsafiulina@bochvar.ru

Поступила в редакцию 29.08.2022, после доработки 21.11.2022, принята к публикации 23.11.2022

Продемонстрирована возможность использования 5-(дифенилфосфорил)гексан-3-она в качестве экстрагента для эффективного извлечения редкоземельных металлов, а также урана(VI) и тория(IV) из растворов вскрытия фосфогипса в рамках одного технологического экстракционного процесса. 5-(Дифенилфосфорил)гексан-3-он в качестве экстрагента сопоставлен по эффективности использования с коммерчески доступными ТБФ и ТОФО. Показано, что полное извлечение редкоземельных металлов в органическую фазу достигается за три стадии исчерпывания. Происходит экстракционная очистка суммы редкоземельных металлов от урана(VI) и тория(IV). Фактор разделения при экстракции для U(VI) и суммы РЗЭ составил $f_{[\Sigma \text{РЗЭ}/\text{U}(\text{VI})]} > 3000$, а в случае тория(IV) $f_{[\Sigma \text{РЗЭ}/\text{Th}(\text{IV})]} \sim 10000$. 5-(Дифенилфосфорил)гексан-3-он может успешно применяться при экстракционной переработке минерального и техногенного сырья, позволяя извлекать и концентрировать редкоземельные металлы.

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

DOI: 10.31857/S0033831123010082, **EDN:** OHLIDQ

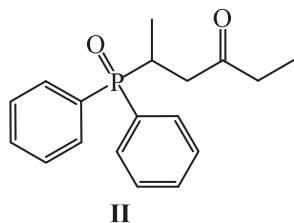
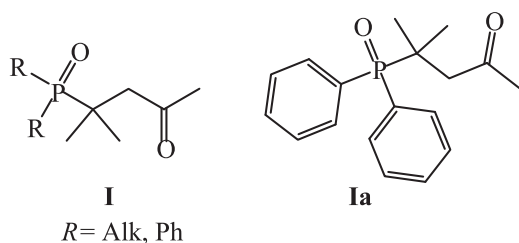
ВВЕДЕНИЕ

Для Российской Федерации актуальным вопросом является поиск новых сырьевых источников редкоземельных элементов (РЗЭ) [1, 2]. Одним из перспективных источников РЗЭ может служить фосфогипс – крупнотоннажный продукт переработки апатита при производстве экстракционной фосфорной кислоты для минеральных удобрений [3–7]. Кроме РЗЭ фосфогипс содержит уран, торий и эма-

нирующие продукты их радиоактивного распада, которые как загрязнители окружающей среды представляют особую опасность. Таким образом, извлечение РЗЭ, урана и тория из фосфогипса, а также их разделение представляет собою актуальную радиохимическую задачу.

Жидкостная экстракция является одним из наиболее отработанных в технологическом плане и эффективных методов извлечения и разделения редких и радиоактивных элементов [8, 9]. При этом особую

важность представляет собой выбор экстрагента, селективность и эффективность которого определяет экономическую целесообразность процесса переработки редкометалльного сырья. При поиске новых высокоэффективных и селективных экстрагентов в ряду бифункциональных нейтральных фосфорорганических соединений было установлено, что фосфорилкетоны **I** с алкильными и фенильными заместителями при атоме фосфора экстрагируют актиниды и лантаниды из азотнокислых сред значительно эффективнее известных нейтральных фосфорорганических соединений (НФОС) [10–12].



Для установления дентатности комплексообразования фосфорилкетонов с *f*-элементами были исследованы комплексы **Ia** с нитратом неодима(III) и уранила с использованием спектральных методов и рентгеноструктурного анализа [13]. При взаимодействии с нитратом уранила вне зависимости от соотношения компонентов фосфорилкетон действует как монодентатный фосфорильный лиганд, образуя бислигандный нейтральный комплекс, структура которого сохраняется в растворе. При взаимодействии с нитратом неодима в зависимости от соотношения реагентов фосфорилкетон образует бислигандные комплексы, действуя в первом из них как бидентатный лиганд, а во втором – как фосфорильный монодентатный. Вследствие хелатного взаимодействия лигандирующего ансамбля фосфорилкетона, основанного на координации как РО-, так и СО-групп к иону Ln^{3+} , соединения этого класса проявляют большую селективность по отношению к лантанидам в сравнении с актинидами [13].

При исследовании в направлении дизайна перспективных экстрагентов класса фосфорилкетонов для извлечения *f*-элементов установлено, что модифицирование фосфорилкетона **Ia** в изомерный ему фосфорилкетон **II** с изомеризацией алкильной части молекулы фосфорилкетонов может приводить к существенному увеличению их эффективности и селективности как экстрагентов. В работе [14] показано, что **II** является наиболее эффективным и селективным экстрагентом для извлечения тяжелых (Ho, Yb) и легких (La, Nd) лантанидов из азотнокислых растворов в хлороформ и для их разделения. Была исследована экстракция РЗЭ с помощью соединения **II** из раствора вскрытия фосфогипса [15] и эвдиалитового концентрата [14, 16]. Представляло интерес определить поведение урана и тория на фоне экстракции РЗЭ растворами лиганда **II** из растворов переработки фосфогипса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные вещества. Образец фосфогипса, предоставленный АО «Воскресенские минеральные удобрения» (г. Воскресенск), вскрывали по методике [17, 18]. В этом случае высаливателем РЗЭ являлся нитрат кальция, причем высаливающее действие $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, присутствующего в растворах после вскрытия в концентрации 2 моль/л, было эквивалентно действию 5 моль/л нитрата щелочного металла. В растворах, полученных после вскрытия фосфогипса, содержалось также около 2.3 моль/л остаточной азотной кислоты.

В качестве экстрагентов в работе использовали трибутилфосфат (ТБФ) (Aldrich, 98%), триоктилфосфиноксид (ТОФО) (Aldrich, 99%) и 5-(дифенилфосфорил)гексан-3-он (**II**), синтезированный по методике [14, 19] и охарактеризованный элементным анализом и спектроскопией ЯМР (^1H , $^{13}\text{C}\{^1\text{H}\}$ и $^{31}\text{P}\{^1\text{H}\}$). Разбавителем экстрагентов для ТОФО и **II** выступал хлороформ (х.ч.). Азотная кислота (ос.ч.) и нитрат кальция (х.ч.) использовали при вскрытии образца фосфогипса.

Методика экстракции. Эксперименты по экстракции проводили при отношении фаз 1 : 1 в течение 15 мин в ротаторе при частоте оборотов 100 мин⁻¹. Концентрацию суммы лантанидов, урана и тория в водной фазе определяли спектрофотометрическим методом [20] с арсеназо III на

Таблица 1. Химический состав образца фосфогипса. Общее содержание воды 27.8%

Оксид	CaO	SrO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	SO ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	F	Ln ₂ O ₃ (общ.)
Содержание, мас%	27.90	1.63	0.27	0.18	0.17	0.10	0.03	0.02	0.005	40.17	6.79	1.15	0.35	0.44

Таблица 2. Содержание оксидов РЗЭ в образце фосфогипса

Оксид	Ln ₂ O ₃ (общ.)	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃
Содержание, мас%	0.44	0.133	0.193	0.020	0.071	0.008	0.003	0.007
Оксид	Tb ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃
Содержание, мас%	0.0003	0.004	0.001	0.001	0.0002	0.0004	<ПО	0.017

спектрофотометре Lambda 465. Элементный анализ проводили масс-спектрометрическим методом ИСП-МС с использованием прибора Agilent 7500se (Agilent Technologies Inc., США) с погрешностью определения 4.5%.

Коэффициенты распределения РЗЭ, тория и урана ($D = [M]_{\text{орг}}/[M]_{\text{aq}}$) определяли как отношение их концентраций в органической и водной фазах. Коэффициенты разделения суммы РЗЭ и каждого из актинидов определяли как отношение их коэффициентов распределения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

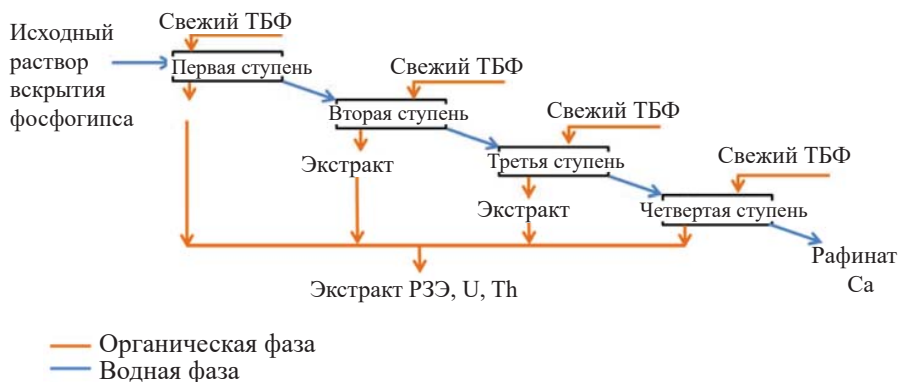
Химический состав использованного в работе образца фосфогипса, определенный по методике [21], приведен в табл. 1 и 2.

Из представленных данных (табл. 1 и 2) видно, что содержание лантанидов в фосфогипсе мало и не превышает ~0.5%. При этом основное содержание лантанидов в образце фосфогипса приходится на лантан, церий и неодим, в то время как на другие РЗЭ приходится менее ~15%.

Для оценки количества ступеней противоточного каскада, необходимых для полного извлечения РЗЭ из раствора вскрытия фосфогипса [22, 23], были проведены эксперименты как с однократным контактом фаз, так и в режиме перекрестного тока. Моделирование исчерпывающей ступени противоточного каскада позволяет оценить количество необходимых ступеней для достижения стационарного состояния или максимального приближения к нему.

При использовании в качестве экстрагента 100%-ного ТБФ проводили четыре стадии исчерпывания, а для раствора 1.33 моль/л **II** в хлороформе – три ступени (рис. 1 и 3).

Все эксперименты проводили при соотношении объемов фаз $O : B = 1 : 1$. Как следует из представленных на рис. 1 и 3 схем, при исчерпывании одна порция свежей водной фазы контактирует в ячейке 1 с порцией свежей органической фазы. После разделения фаз в делительной воронке обедненная водная фаза поступает в ячейку 2, где контактирует со свежей порцией органической фазы. После контакта во второй ячейке и разделения фаз обедненная водная фаза поступает в 3-ю ячейку, а затем в 4-ю.

**Рис. 1.** Схема четырех ступеней экстракционного исчерпывания 100%-ным ТБФ из раствора вскрытия фосфогипса.

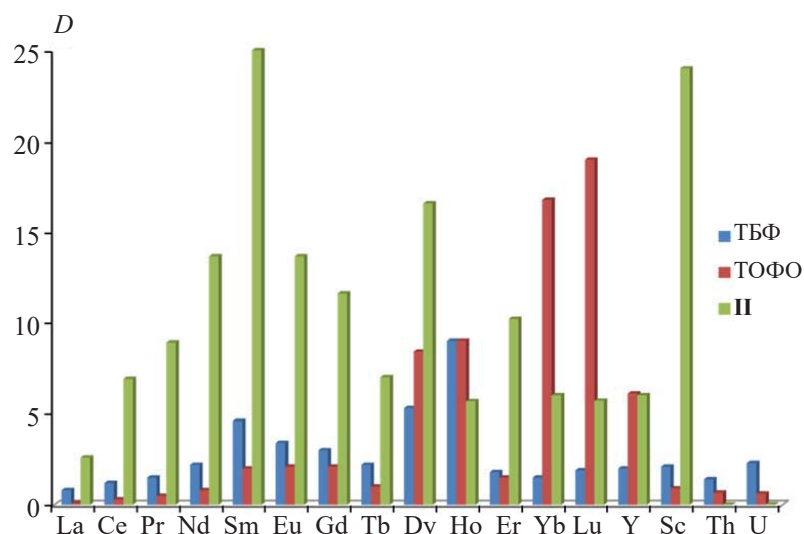


Рис. 2. Коэффициенты распределения РЗЭ, урана(VI) и тория(IV) при однократном контактировании водной и органической фаз в присутствии 100%-ного ТБФ, а также 1.8 моль/л ТОФО и 1.33 моль/л II в CHCl_3 .

После каждого контакта экспресс-методом определяли спектрофотометрически суммарное содержание РЗЭ, урана и тория в водной фазе.

На рис. 2 приведены коэффициенты распределения РЗЭ, урана и тория при единичном контактировании 100%-ного ТБФ с раствором вскрытия фосфогипса.

После четырех стадий экстракции РЗЭ, тория и урана практически все компоненты раствора вскрытия фосфогипса были извлечены в фазу 100%-ного ТБФ нацело. ТБФ был предварительно насыщен азотной кислотой.

Триалкилфосфиноксиды $(\text{Alk})_3\text{PO}$, в частности ТОФО, по сравнению с ТБФ и другими триалкилфосфатами $(\text{AlkO})_3\text{PO}$, как правило, обладают более высокой экстракционной способностью из-за менее электроотрицательных заместителей у атома

фосфора по сравнению с алкилфосфатами [24]. При этом алкилфосфиноксиды из-за своей более высокой электронодонорной способности эффективно экстрагируют металлы при более низких концентрациях кислот в сравнении с алкилфосфатами. Наибольшая экстракционная способность алкилфосфиноксидов наблюдается в области 1 моль/л HNO_3 , в то время как для $(\text{AlkO})_3\text{PO}$ наибольшая экстракционная эффективность возможна в области 3 моль/л HNO_3 [25, 26]. На рис. 2 представлены коэффициенты распределения РЗЭ при их экстракции (однократное контактирование водной и органической фаз) из раствора вскрытия фосфогипса раствором 1.8 моль/л ТОФО в CHCl_3 . Значения D для легких РЗМ оказались значительно ниже, чем в случае 100%-ного ТБФ, хотя тяжелые РЗЭ распределяются в органическую фазу лучше.

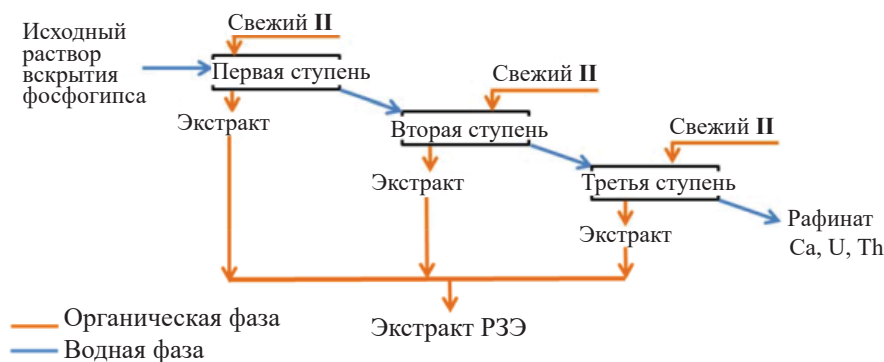


Рис. 3. Схема трех ступеней экстракционного перекрестного тока 1.33 моль/л II в хлороформе из раствора вскрытия фосфогипса.

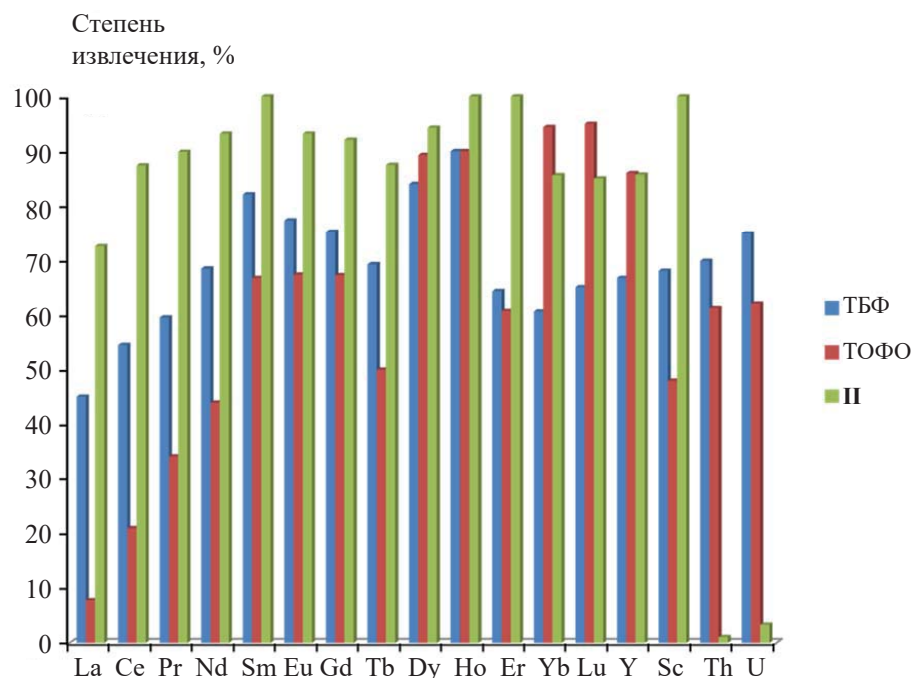


Рис. 4. Сравнение степеней извлечения РЗЭ, тория(IV) и урана(VI) при однократной экстракции 100%-ным ТБФ, растворами 1.6 моль/л ТОФО и 1.33 моль/л II в хлороформе.

Вследствие того, что ТОФО уже на одной ступени экстракции показал худшие характеристики, чем более дешевый и доступный ТБФ, экстракцию с ищерпыванием в случае ТОФО не проводили.

Для оценки эффективности и селективности фосфорилкетона II для извлечения РЗЭ, а также U(VI) и Th(IV) провели одно контактирование раствора 1.33 моль/л II с раствором вскрытия фосфогипса.

На рис. 2 представлены результаты однократной экстракции РЗЭ, тория(IV) и урана(VI) из раствора вскрытия фосфогипса 100%-ным ТБФ, а также растворами 1.8 моль/л ТОФО и 1.33 моль/л II в CHCl_3 .

Как видно из рис. 2, экстракционная способность II высока по отношению к РЗЭ как цериевой, так и иттриевой подгрупп, что отличает его и от ТБФ, который более селективен к РЗЭ цериевой подгруппы, и от ТОФО, избирательного к иттриевой подгруппе РЗЭ.

При экстракции раствором фосфорилкетона II выявили неожиданный эффект роста коэффициентов распределения лантанидов (D) цериевой подгруппы с максимальным значением D , приходящимся на самарий. Полученный эффект, возможно, связан с малым содержанием лантанидов

в сравнении с лантаном и церием. Различия в экстракции пары Nd(III) и Sm(III) больше ожидаемых, так как концентрация неодима в исходном растворе вскрытия фосфогипса 250 мг/л, а самария – 39 мг/л. Немаловажную роль в эффективности экстракции лантанидов играет известное [27–29] правило изменения прочности координационных комплексов лантанидов с увеличением порядкового номера элемента в цериевой подгруппе. Необходимо отметить, что фосфорилкетон II проявляет наиболее высокую эффективность в отношении пар тяжелых и легких лантанидов и особенно к Sm(III). Экстракционные свойства II сопоставлены со свойствами известных фосфорилсодержащих экстрагентов – ТБФ и ТОФО, исследованных в тех же экспериментальных условиях (рис. 2). Как видно из рис. 2, в отношении экстракции урана(VI) и тория(IV) известные экстрагенты (ТБФ и ТОФО) более эффективны. Однако в отличие от них фосфорилкетон II не проявляет экстракционную способность в отношении U(VI) и Th(IV), что является предпосылкой использования II в качестве экстрагента для селективного выделения эманулирующих U(VI) и Th(IV) с получением коллективного концентрата РЗЭ.

Далее провели три стадии перекрестного тока (рис. 3) при экстракции раствором 1.33 моль/л **II** в CHCl_3 по методике, описанной выше.

Было установлено, что в этих условиях экстракционная способность раствора 1.33 моль/л **II** в CHCl_3 значительно выше по сравнению с 100%-ным ТБФ, в результате чего достигается полное извлечение РЗЭ в органическую фазу.

При этом необходимо отметить, что уран(VI) и торий(IV) экстрагируются в органическую фазу, содержащую фосфорилкетон **II**, значительно хуже (в случае однократной экстракции см. рис. 2 и 4), что может быть предпосылкой для экстракционного разделения суммы РЗЭ и радиоактивных урана(VI) и тория(IV). Фактор разделения для U(VI) и суммы РЗЭ составил $f_{[\text{РЗЭ/У(VI)}]} > 3000$, а в случае тория(IV) $f_{[\text{РЗЭ/Тh(IV)}]} \sim 10000$ оказался в три раза выше.

Полученные результаты демонстрируют возможность использования 5-(дифенилфосфорил)гексан-3-она (**II**) в качестве экстрагента для эффективного извлечения РЗЭ из растворов вскрытия фосфогипса, а также их отделения от радиоактивных урана(VI) и тория(IV) в рамках одного технологического процесса. В отличие от коммерчески доступных ТБФ и ТОФО полное извлечение редкоземельных металлов в органическую фазу достигается за три стадии исчерпывания, при этом концентрация фосфорилкетона почти в 3 раза ниже, чем концентрация ТБФ (3,62 моль/л). Оба эти факта приводят к значительному упрощению процесса извлечения редкоземельных металлов из раствора вскрытия фосфогипса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, 5-(дифенилфосфорил)гексан-3-он является более эффективным экстрагентом редкоземельных металлов, чем трибутилфосфат и триоктилфосфиноксид. Он обладает высокой селективностью, что позволяет при экстракции РЗЭ очищать их от радиоактивных урана и тория с высоким фактором разделения (для U(VI) и суммы РЗЭ $f_{[\text{РЗЭ/У(VI)}]} > 3000$, для тория(IV) и суммы РЗЭ $f_{[\text{РЗЭ/Тh(IV)}]} \sim 10000$). Этот реагент может быть успешно применен для экстракционной переработки фосфогипса и другого минерального и техногенного сырья, позволяя извлекать и концентрировать

РЗЭ, а также отделять их от сопутствующих примесей, в частности, от радиоактивных урана и тория.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00697-22-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а также в рамках научной темы ГИ КНЦ РАН № АААА-А19-119100290149-1.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сарычев Г.А., Стриханов М.Н.* // Цв. металлы. 2012. № 3. С. 5–12.
2. *Иванец Д.В., Тананаев И.Г., Сарычев Г.А.* // Цв. металлы. 2012. № 3. С. 33–72.
3. *Yahorava V., Lakay E., Clark W., Strauss J.* // Extraction. Cham: Springer, 2018. P. 2415–2427. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_204
4. *Moalla R., Gargouri M., Khmiri F., Kamoun L., Zairi M.* // Environ. Eng. Res. 2018. Vol. 23, N 1. P. 36–45. <https://doi.org/10.4491/eer.2017.055>
5. *Jarosinski A., Kowalczyk J., Mazanek Cz.* // J. Alloys Compd. 1993. Vol. 200, N 1–2. P. 147–150. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(93\)90485-6](https://doi.org/10.1016/0925-8388(93)90485-6)
6. *Soukeur A., Szymczyk A., Berbar Y., Amara M.* // Sep. Purif. Technol. 2021. Vol. 256. Article 117857. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117857>
7. *Косынкин В.Д., Селивановский А.К., Федулова Т.Т., Смирнов К.М., Крылова О.К.* // Цв. металлы. 2012. № 3. С. 31–34.
8. *Мастрюкова Т.А., Артюшин О.И., Одинец И.Л., Тананаев И.Г.* // Рос. хим. журн. (ЖРХО им. Д.И. Менделеева). 2005. Т. 49, № 2. С. 86–96.
9. *Тананаев И.Г., Мясоедов Б.Ф.* // Радиохимия. 2016. Т. 58, № 3. С. 257–264. (*Tananaev I.G., Myasoedov B.F.* // Radiochemistry. 2016. Vol. 58, N 3. P. 257–264. <https://doi.org/10.1134/S1066362216030061>)
10. *Сафиулина А.М., Матвеева А.Г., Дворянчикова Т.К., Синегрибова О.А., Ту А.М., Татаринцев 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>
11. *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., Safiulina 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>
 12. *Матвеева А.Г., Горюнов Е.И., Ту А.М., Сафиулина А.М., Горюнова И.Б., Бодрин Г.В., Лесив А.В., Синегрибова О.А., Брель В.К.* // Изв. АН. Сер. хим. 2014. № 11. С. 2493–2501. (*Matveeva A.G., Goryunov E.I., Tu A.M., Safiulina A.M., Goryunova I.B., Bodrin G.V., Lesiv A.V., Sinegribova O.A., Brel V.K.*) // Russ. Chem. Bull. 2014. Vol. 63, N 11. P. 2493–2501.
<https://doi.org/10.1007/s11172-014-0767-4>
 13. *Матвеева А.Г., Григорьев М.С., Дворянчикова Т.К., Матвеев С.В., Сафиулина А.М., Синегрибова О.А., Пасечник М.П., Годовиков И.А., Татаринов Д.А., Миронов В.Ф., Тананаев И.Г.* // Изв. АН. Сер. хим. 2012. № 2. С. 397–402. (*Matveeva A.G., Grigoriev M.S., Dvoryanchikova T.K., Matveev S.V., Safiulina A.M., Sinegribova O.A., Passechnik M.P., Godovikov I.A., Tatarinov D.A., Mironov V.F., Tananaev I.G.*) // Russ. Chem. Bull. 2012. Vol. 61, N 2. P. 399–404.
<https://doi.org/10.1007/s11172-012-0056-z>
 14. *Сафиулина А.М., Матвеева А.Г., Лизунов А.В., Бодрин Г.В., Горюнов Е.И., Григорьев М.С., Семенов А.А., Брель В.К., Нифантьев Э.Е.* // Докл. АН. 2015. Т. 460, № 6. С. 673–676. (*Safiulina 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, N 2. P. 57–60
<https://doi.org/10.1134/S001250081502007X>
 15. *Сафиулина А.М., Матвеева А.Г., Евтушенко А.В., Лизунов А.В., Горюнов Е.И., Горюнова И.Б., Бодрин Г.В., Семенов А.А., Брель В.К.* // ЖОХ. 2015. Т. 85, № 9. С. 1551–1557. (*Safiulina 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>
 16. *Сафиулина А.М., Семенов А.А., Лизунов А.В., Лесина И.Г., Горюнов Е.И., Горюнова И.Б., Бодрин Г.В., Брель В.К., Тананаев И.Г.* // Радиохимия. 2022. Т. 64, № 6. С. 547–553.
 17. *Генкин М.В., Евтушенко А.В., Комков А.А., Сафиулина А.М., Спиридонов В.С., Швецов С.В.* Патент RU 2528576 // Б.И. 2014. № 26.
 18. *Генкин М.В., Евтушенко А.В., Комков А.А., Сафиулина А.М., Спиридонов В.С., Швецов С.В.* Патент RU 2528573 // Б.И. 2014. № 26.
 19. *Горюнов Е.И., Бодрин Г.В., Горюнова И.Б., Нелюбина Ю.В., Петровский П.В., Стрелкова Т.В., Перегудов А.С., Матвеева А.Г., Пасечник М.П., Матвеев С.В., Нифантьев Э.Е.* // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 3. С. 779–790. (*Goryunov E.I., Bodrin G.V., Goryunova I.B., Nelyubina Yu.V., Petrovskii P.V., Strelkova T.V., Peregudov A.S., Matveeva A.G., Pasechnik M.P., Matveev S.V., Nifant'ev E.E.*) // Russ. Chem. Bull. 2013. Vol. 62, N 3. P. 780–791.
<https://doi.org/10.1007/s11172-013-0106-1>
 20. *Саввин С.Б.* Органические реагенты группы арсеназо III. М.: Атомиздат, 1971. 352 с.
 21. *Хитрова О.А.* Патент RU 2511375 // Б.И. 2014. № 10.
 22. *Трейбал Р.* Жидкостная экстракция. М.: Химия, 1966. 724 с.
 23. *Альдерс Л.* Жидкостная экстракция. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 258 с.
 24. *Мастрюкова Т.А., Кабачник М.И.* // Успехи химии. 1969. Т. 38, № 10. С. 1751–1782. (*Mastryukova T.A., Kabachnik M.I.*) // Russ. Chem. Rev. 1969. Vol. 38, N 10. P. 795–811.
<https://doi.org/10.1070/RC1969v038n10ABEN001839>
 25. *Розен А.М.* // Рос. хим. журн. (ЖРХО им. Д.И. Менделеева). 1996. Т. 40, № 6. С. 42–52.
 26. *Розен А.М., Крупнов Б.В.* // Успехи химии. 1996. Т. 65, № 11. С. 1052–1079. (*Rozen A.M., Krupnov B.V.*) // Russ. Chem. Rev. 1996. Vol. 65. N 11. P. 973–1000.
<https://doi.org/10.1070/RC1996v065n11ABEN000241>
 27. *Яцимирский К.Б., Костромина Н.А., Шека З.А., Давиденко Н.К., Крисс Е.Е., Ермоленко В.И.* Химия комплексных соединений редкоземельных элементов. Киев: Наук. думка, 1966. 493 с.
 28. *Матвеева А.Г., Перегудов А.С., Матросов Е.И., Старикова З.А., Тимофеева Г.И., Матвеев С.В., Бодрин Г.В., Нифантьев Э.Е.* // Докл. АН. 2007. Т. 413, № 6. С. 771–775. (*Matveeva A.G., Peregudov A.S., Matrosov E.I., Starikova Z.A., Timofeeva G.I., Matveev S.V., Bodrin G.V., Nifant'ev E.E.*) // Dokl. Chem. 2007. Vol. 413, N 2. P. 95–99.
<https://doi.org/10.1134/S0012500807040052>
 29. *Матвеева А.Г., Перегудов А.С., Матросов Е.И., Старикова З.А., Матвеев С.В., Нифантьев Э.Е.* // Inorg. Chim. Acta. 2009. Vol. 362, N 10. P. 3607–3616.
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2009.04.005>