

Экстракционное выделение и концентрирование радионуклидов без носителей из мишеней, облученных на ускорителях, и природных объектов

А. А. Абрамов, В. М. Федосеев

АЛЕКСАНДР АФАНАСЬЕВИЧ АБРАМОВ — доктор химических наук, профессор кафедры радиохимии Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: закономерности протекания экстракционных процессов, выделение радионуклидов без носителей экстракционными методами, определение осколочных радионуклидов в растительных объектах, в лекарственном сырье. E-mail aaa@radio.chem.msu.ru

ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ ФЕДОСЕЕВ — доктор химических наук, заведующий кафедрой радиохимии Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный профессор Московского университета, заместитель председателя Научного совета по радиохимии при президиуме РАН и Росатоме РФ. Область научных интересов: радиохимия, механизмы химических реакций, проблемы образования. E-mail fedoseev@radio.chem.msu.ru

119992 Москва, ГСП-2, Ленинские горы, Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра радиохимии, тел. (095)939-31-87, факс (095)939-31-87.

Введение

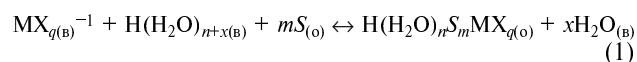
Выделение радиоактивных изотопов без носителя из мишеней, облученных на ядерных установках, или из природных объектов экспрессными экстракционными методами позволяет широко варьировать условия разделения и поддается дистанционному автоматическому оформлению. На ускорителях заряженных частиц облучают мишени, изготовленные обычно из металлов (или их сплавов), так как в данном случае можно легко отводить тепло, выделяемое при поглощении мишенью заряженных частиц и, следовательно, получать радиоактивные изотопы с большими выходами [1, 2]. Облученную мишень растворяют в подходящем растворе кислоты или щелочи часто в присутствии окислителей или под действием электрического тока, возможно сплавлением мишени с необходимым реагентом с последующим переводом сплава в раствор.

Целевой изотоп без носителя экстрагируют обычно из раствора, полученного после растворения мишени. Этот прием предпочтительнее, чем предварительный сброс или полное отделение материала мишени. Принципиально общее для этих двух приемов — концентрационная зависимость коэффициентов распределения элементов и взаимное влияние элементов на их экстракцию.

Механизм взаимного влияния элементов при их совместной экстракции

Наиболее детально взаимное влияние элементов на их экстракцию было исследовано на примере экстракции комплексных галогеноводородных кислот кислородосодержащими растворителями в работах Ю. А. Золотова, А. Т. Карабаша, Л. И. Мосеева, Б. З. Иофа и других авторов. Детально эти процессы рассмотрены в монографии [3] и нашли свое логическое подтверждение как научное открытие [4].

При экстракции галогенидных комплексов металлов из кислых растворов экстракция обычно протекает по гидратно-сольватному механизму. Для одноосновной кислоты уравнение экстракции имеет следующий вид:



где S — экстрагент; X — лиганд (галоген); q — координационное число металла M ; n , x , m — соответственно индексы и коэффициенты в уравнении реакции экстракции; (в) — водная фаза; (о) — органическая фаза.

Коэффициент распределения D элемента M равен:

$$D = K_{экс} \alpha [H^+]_{(в)} S_{(о)}^m \frac{f_{\pm(в)}^2 f_{S(о)}^m}{f_{(о)}} \quad (2)$$

где $K_{экс}$ — константа экстракции; α — доля экстрагируемого комплексного аниона в водном растворе; f — коэффициенты активности компонентов.

Таким образом, при фиксированной концентрации галогеноводородной кислоты (HX) коэффициент распределения элемента не зависит от концентрации металла.

При избытке экстрагента влияние второго элемента на экстракцию первого в данной системе может быть обусловлено только изменением коэффициентов активности компонентов. При экстракции с использованием высокоосновных и (или) полярных растворителей может происходить диссоциация экстрагируемых соединений в органической фазе, а при использовании малополярных растворителей (экстрагентов) возможна ассоциация экстрагируемых комплексов. Поэтому при экстракции одного или нескольких металлов по гидратно-сольватному механизму коэффици-

циент распределения металла будет иметь следующий вид:

$$D_{M_1} = A + \frac{B}{\sqrt{\sum_{i=1}^i C[M_i] + F}} \quad (3)$$

в случае диссоциации экстрагируемого комплекса.

При ассоциации в органической фазе

$$D_{M_1} = A + \sum_{i=1}^i B_i[M_i] + \sum_{i=1}^i C_i[M_i]^2 + \dots \quad (4)$$

где A, B, C, F — постоянные при фиксированных концентрациях кислоты; i — количество экстрагируемых элементов в системе [3].

В течение длительного времени явления соэкстракции элементов и подавления экстракции рассматривались только при экстракции металлгалогенидных комплексов по гидратно-сольватному механизму. В конце прошлого века появилось несколько работ [5—7], авторы которых наблюдали диссоциацию экстрагируемых комплексов металлов с краун-эфирами в полярных растворителях, а в работе [8] отмечалось взаимное влияние щелочных металлов при их экстракции производными 18-краун-6.

Мы исследовали экстракцию щелочных, щелочно-земельных металлов и серебра(I) краун-эфирами в различных растворителях из растворов пикрата лития ($LiPi$) [9, 10]. Выбор пикрата лития был обусловлен, во-первых, полной диссоциацией в водном растворе, что позволяло контролировать концентрации пикрат-иона (противоиона), во-вторых, как показали предварительные исследования, ион лития практически не экстрагируется исследуемыми экстрагентами и не является конкурентом для экстрагируемых катионов металлов. Было показано, что при использовании

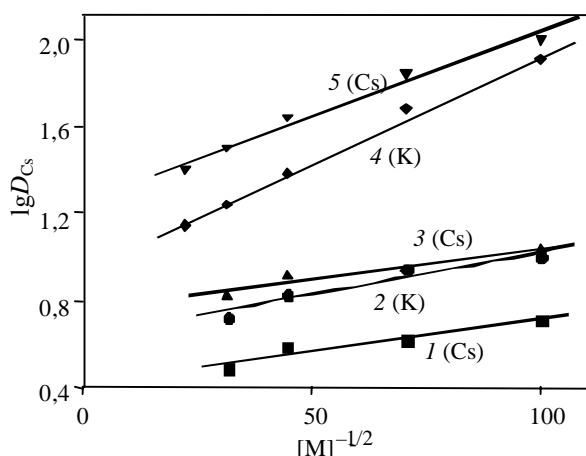


Рис. 1. Зависимость коэффициентов распределения цезия от собственной концентрации (Cs) или от концентрации KNO_3 (K) при экстракции 18-краун-6 ($C = 10^{-2}$ моль/л) из пикратных растворов ($C_{LiPi} = 10^{-2}$ моль/л) в различных растворителях:

1 — метилбутилкетон; 2, 3 — дихлорэтан; 4, 5 — нитробензол

растворителей с высокой диэлектрической проницаемостью (нитробензол, дихлорэтан, кетоны) наблюдается как концентрационная зависимость коэффициентов распределения отдельных элементов, так и их взаимное влияние при совместной экстракции (рис. 1, 2). Экспериментами по электропроводности экстрактов мы подтвердили диссоциацию экстрагируемых соединений в органической фазе и рассчитали по экспериментальным данным константы диссоциации экстрагируемых пикратных комплексов металлов с макроциклическими экстрагентами [10].

Таким образом, при совместной экстракции металлов макроциклическими экстрагентами также наблюдается подавление экстракции одного элемента другим и оно связано с эффектом общего иона. Если при экстракции металлгалогенидных комплексов это общий катион — гидратированный и сольватированный протон, то при экстракции металлов макроциклическими экстрагентами это общий анион — противоион.

Математические выражения для коэффициентов распределения металла при индивидуальной и совместной экстракции с другими элементами представлены в работах [9, 10], и в общем виде они аналогичны уравнению (3).

При изучении экстракции анионов солями четвертичных аммониевых оснований (ЧАО) мы также обнаружили подавление экстракции одних анионов другими [11—13]. На основании данных по электропроводности экстрактов солей ЧАО мы рассчитали значения констант диссоциации солей ЧАО с анионами Br^- , TcO_4^- , ClO_4^- , ReO_4^- , MnO_4^- в дихлорэтане, нитробензоле и его растворах в бензоле.

Анализируя полученные данные, а также данные по константам обмена (экстракции) анионов, полученные в работах [14, 15], можно предположить, что

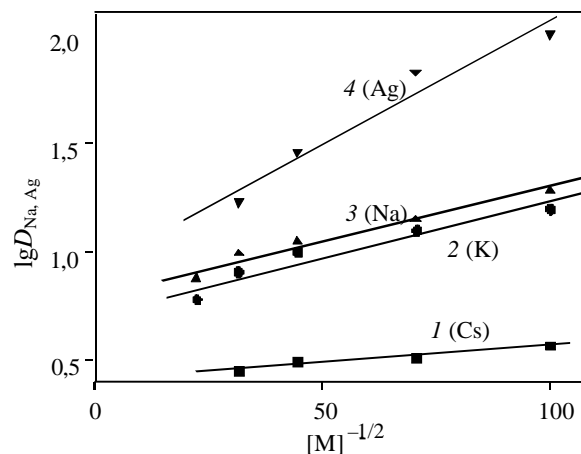


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения натрия и серебра(I) от собственной концентрации (Na, Ag) или концентрации солей щелочных металлов (K, Cs) при экстракции из пикратных растворов ($C_{LiPi} = 10^{-2}$ моль/л):

1, 2, 3 — экстракция натрия 15-краун-5 ($C = 0,05$ моль/л) в дихлорэтане (1) и нитробензоле (2, 3), 4 — экстракция серебра(I) раствором дициклогексантетраэтилен-12-краун-4 ($C = 10^{-2}$ моль/л) в нитробензоле

взаимное влияние ионов при анионообменной экстракции анионов является многофункциональной зависимостью, значительно более сложной, чем в ранее рассмотренных системах. Во-первых, константы обмена конкурирующих анионов и противоиона соли ЧАО различаются, причем иногда на несколько порядков. Во-вторых, изменения констант диссоциации этих солей в растворителях не только не имеют столь сильного различия, но и их изменение не симбатно константам обмена. В-третьих, изменение концентраций любых компонентов в системе взаимосвязано, что не позволяет значительно упростить исследуемые системы.

Для исключения хотя бы одного фактора, а именно влияния аниона соли ЧАО, мы провели систематическое изучение экстракционных систем, используя в качестве экстрагента соль ЧАО с одним из анионов с концентрацией 10^{-3} моль/л. В качестве водной фазы мы использовали смесь солей двух анионов, одним из которых был анион входящий в экстрагент. Состав водной фазы подбирали таким образом, чтобы концентрации каждого из анионов в ней изменялись в пределах от 0 до 10^{-3} моль/л при суммарной концентрации 10^{-3} моль/л, т.е. в системе всегда было эквимолярное соотношение экстрагента и обменивающихся анионов.

На рис. 3 представлены данные по реэкстракции ReO_4^- из раствора перрената метилтриоктиламмония в нитробензоле смесью анионов, одним из которых является перренат. Видно, что в полярных растворителях зависимость коэффициентов распределения от концентрации обусловлена не только разницей в константах диссоциации, но и нивелируется в ряде систем ($\text{R}_4\text{NReO}_4-\text{KTcO}_4$) разницей в константах обмена. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что взаимное влияние анионов наблюдается и при анионообменной экстракции анионов солями ЧАО, но описывается значительно большим количеством параметров, чем для предыдущих систем, и не столь наглядно как в экстракционных системах, рассмотренных ранее.

Здесь можно провести аналогию с экстракцией комплексных галогенидных кислот спиртами [16–19]. В таких системах присутствие в органической фазе галогеноводородной кислоты приводит к «маскировке» взаимного влияния комплексных кислот на их экстракцию. По нашему мнению, остается бесспорным тот факт, что при анионообменной экстракции анио-

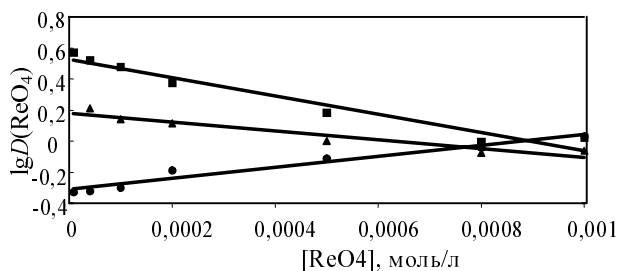


Рис. 3. Взаимное влияние анионов при реэкстракции ReO_4^- из 10^{-3} моль/л раствора перрената метилтриоктиламмония в нитробензоле в водные растворы смеси анионов (суммарная концентрация анионов 10^{-3} моль/л):

● — MnO_4^- ; ▲ — ClO_4^- ; ■ — TcO_4^-

нов солями ЧАО наблюдается диссоциация ионных пар в полярных растворителях и связанное с этим взаимное влияние анионов (и анионов солей ЧАО) на их экстракцию.

Прикладные аспекты взаимного влияния элементов при их экстракционном выделении и концентрировании

Мы кратко рассмотрели различные системы, в которых наблюдается взаимное влияние элементов на их экстракцию. В радиохимической практике при переработке ядерных мишеней или природных объектов присутствует макрокомпонент (или несколько макрокомпонентов), выделяемый (целевой) радионуклид и примесные радионуклиды без носителей (микрокомпоненты). При разделении и концентрировании радионуклидов в подобных объектах необходимо учитывать следующие особенности.

1. Наличие достоверной информации о составе экстрагируемого соединения и механизме экстракции, а также о зависимости коэффициентов распределения от собственной концентрации металла и концентраций присутствующих элементов во всем диапазоне содержания компонентов в процессе разделения.

2. При наличии концентрационной зависимости коэффициентов распределения в данных системах это необходимо учитывать при оценке коэффициентов разделения и выходов целевых радионуклидов.

3. Поскольку взаимное влияние элементов — многопараметрическая функция экстракционных систем (концентрации элементов и электролитов в водном растворе, природы растворителя, температуры и т.д.), то необходимо на первом этапе спрогнозировать параметры экстракционных систем, при которых наблюдается взаимное влияние элементов.

4. В зависимости от поставленных задач необходимо оценить все преимущества и недостатки разделения элементов в том диапазоне параметров экстракционных систем, где наблюдается взаимное влияние элементов. Особенно это актуально при промышленной переработке мишеней или природных объектов, поскольку небольшое изменение в условиях разделения, выпаривания, разделения фаз и других стандартных, но не автоматизированных операциях, могут привести к плохой воспроизводимости методик разделения радионуклидов.

Экстракционное выделение радионуклидов

Некоторый опыт работы по выделению радионуклидов без носителей позволяет нам высказать свое мнение: экстракционные системы, в которых наблюдается взаимное влияние элементов, можно и нужно применять в радиохимической практике, но только в тех случаях, когда эффект от их использования превосходит возможные осложнения и неудобства. Иногда мы разделяли элементы в области, близкой к границе взаимного влияния элементов, и эти условия были оправданными.

Выделение натрия-22 без носителя из облученных магниевых мишеней. Ранее была предложена экстракционная методика выделения ^{22}Na без носителя путем отделения его от материала мишени — магния экстракцией раствором 15-краун-5 в хлороформе из пикратных растворов [20]. Позже было выяснено [10, 21], что среди инертных растворителей краун-

эфиров предпочтительнее использовать растворители с относительно высокими значениями диэлектрической проницаемости ϵ , обеспечивающими частичную диссоциацию экстрагируемой ионной пары и, как следствие, повышение коэффициентов распределения (табл. 1).

Таблица 1

Значения $K_{\text{экс}}$ пикрата натрия при извлечении его 15-краун-5 в различных растворителях

Растворитель	ϵ	$\lg K_{\text{экс}}$	$K_{\text{экс}}$
Бензол	2,4	$2,65 \pm 0,20$	$(4,5 \pm 1,0) \cdot 10^2$
Толуол	2,5	$2,70 \pm 0,20$	$(5,0 \pm 1,0) \cdot 10^2$
Хлороформ	4,8	$3,95 \pm 0,20$	$(8,9 \pm 0,4) \cdot 10^3$
Метилхлорид	8,9	$4,18 \pm 0,13$	$(1,5 \pm 0,6) \cdot 10^4$
1,2-Дихлорэтан	10,4	$4,35 \pm 0,14$	$(2,2 \pm 0,8) \cdot 10^4$

В дальнейшем при разработке методики выделения натрия-22 без носителя мы проводили исследования, используя два растворителя — дихлорэтан и хлороформ. Выбор этих растворителей был обусловлен тем, что при диссоциации экстрагируемых соединений в органической фазе (дихлорэтан) возможно подавление экстракции натрия магнием или катионом, связанным с пикратом. Поэтому нельзя было *a priori* предположить, что более эффективная (индивидуально) экстракция натрия растворами 15-краун-5 в дихлорэтано будет наблюдаться и при совместной экстракции с магнием.

Мы изучали экстракцию натрия и магния из растворов пикрата аммония. Как показали предварительные исследования, катион аммония не оказывает влияния на экстракцию натрия. Коэффициенты распределения магния при экстракции из растворов пикрата аммония с концентрацией 0,2 моль/л раствором 15-краун-5 в диапазоне концентрации хлорида магния от $2 \cdot 10^{-3}$ до 2,2 моль/л изменялись от $2 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-5}$. Также было исследовано влияние магния на экстракцию натрия. Несмотря на то, что коэффициенты распределения натрия при его экстракции в присутствии магния 15-краун-5 в дихлорэтано уменьшались при высоких концентрациях магния примерно на 30%, они были тем не менее больше, чем при экстракции хлороформными растворами 15-краун-5. Тем более, что это различие возрастало при каждой промывке комплексов натрия с 15-краун-5 в дихлорэтано, по мере уменьшения содержания магния.

На основании полученных данных была разработана экстракционная методика получения натрия-22 без носителя экстракцией его 15-краун-5 в дихлорэтано из растворов пикрата аммония. Трехкратная экстракция обеспечивала выход натрия-22 на уровне 96—98%. Методика была апробирована на промышленных мишенях [22].

Выделение радиоактивных изотопов олова без носителей из облученных сурьмяных мишеней. При облучении сурьмы α -частицами на циклотроне происходят следующие ядерные реакции $\text{Sb}(\alpha, \text{pxn})^*\text{Te}$ и $\text{Sb}(\alpha, \text{xp}, \text{n})^*\text{Sn}$, в результате которых получаются различные

радиоактивные (*) изотопы теллура и олова. Более сложная смесь радионуклидов получается при облучении сурьмяной мишени протонами с энергией 40—70 мэВ на линейном ускорителе, так как дополнительно на ядрах атомов сурьмы протекают так называемые реакции «скальвания». В этом случае в мишени образуются более 20 радионуклидов сурьмы, олова, индия, серебра, кадмия, теллура и в меньших количествах других элементов, причем содержание целевого изотопа — $^{117\text{m}}\text{Sn}$ составляет примерно 10% от суммарной активности смеси. Олово-117m — перспективный радионуклид для производства радиофармпрепаратов вследствие небольшого периода его полураспада (13,6 сут.), низкой энергии электронов конверсии (130 и 150 кэВ) и испускаемых γ -квантов с энергией 159 кэВ [1]. Ведутся исследования по использованию комплекса олова-117m с диэтилентриаминпентауксусной кислотой для паллиативного (обезболивающего) лечения онкологических больных с костными метастазами [23—26].

Для переработки сурьмяной мишени мы использовали многостадийную экстракционную методику. Остановимся только на ее первой стадии, так как именно здесь мы реально разграничиваем области, в которых наблюдается и не наблюдается взаимное влияние элементов на их экстракцию.

Трудности в разработке методики в первую очередь были связаны с тем, что нужно было перевести и удержать в достаточно компактном растворе 20—50 г облученной сурьмы или композитного материала мишени на основе сурьмы. Мы отдали предпочтение на этой стадии растворению сурьмы в концентрированной соляной кислоте в присутствии окислителей (Cl_2 или азотная кислота). Объем полученного раствора составляет от 200 до 1000 мл (в зависимости от массы мишени), большинство из перечисленных элементов образуют анионные металлогалогенидные комплексы [3]. Причем, сурьма и олово находятся в высшей степени окисления +5 и +4 соответственно.

Большинство экстрагентов, в первую очередь кислородосодержащих, в данных условиях лучше всего экстрагируют именно сурьму [27—30]. Поэтому первая стадия методики выделения заключалась в сбросе материала мишени. С этой целью мы выбрали экстракцию ди-*n*-бутиловым эфиром. При концентрации HCl 12 моль/л и более коэффициенты распределения сурьмы более 100, однако в этих условиях наблюдается соэкстракция с сурьмой и других металлогалогенидных комплексов. Наши исследования показали, что коэффициенты распределения микроколичеств олова(IV) при экстракции ди-*n*-бутиловым эфиром в присутствии макроколичеств сурьмы(V) и коэффициенты распределения самой сурьмы зависят от концентрации HCl (табл. 2). При концентрации HCl 12 моль/л и более наблюдается соэкстракция олова без носителя (и ряда других радионуклидов) с макроколичествами сурьмы. Поэтому мы выбрали для сброса сурьмы концентрацию HCl 10 моль/л, которая позволяет провести очистку от сурьмы более чем на 99% при минимальных потерях на этой стадии изотопов олова. Аналогичные подходы мы использовали при концентрировании ^{210}Pb из природных и ледниковых вод [31—35] и при получении технеция-95m, 96 [2, 36, 37], молибдена-93 [2, 38, 39].

Таблица 2

Коэффициенты распределения сурьмы(V) D_{Sb} и олова(IV) D_{Sn} при экстракции ди-*n*-бутиловым эфиром

C_{HCl}, M	D_{Sb} при $C_{Sb} 0,28$ моль/л	D_{Sn}	
		$C_{Sb} 0,28$ моль/л	$C_{Sn} * < 10^{-7}$ моль/л
6	0,8	0,002	< 0,002
8	12,6	0,02	~ 0,002
10	29	0,03	0,003
12	120	0,12	0,01
13	> 200	0,48	0,02

* В отсутствие сурьмы

Заключение

Считаем необходимым еще раз отметить, что явление взаимного влияния элементов на их экстракцию наблюдается достаточно часто в экстракционных системах различного состава с различными механизмами межфазного распределения. Особенно явно это проявляется при совместной экстракции элементов, присутствующих в растворе в макро- и микроконцентрациях. В этих условиях необходимо осторожно и творчески подходить к данным по отдельной экстракции элементов, принимая во внимание концентрации элементов, для которых были получены эти результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изотопы. Свойства, получение, применение. Под ред. В.Ю. Баранова. М.: ИздАТ, 2000, 704 с.
2. Сборник. Получение и выделение радиоактивных изотопов. Ташкент: ФАН, 1983, 280 с.
3. Золотов Ю.А., Иофа Б.З., Чучалин Л.К. Экстракция галогенидных комплексов металлов. М.: Наука, 1973, 380 с.
4. Карабаш А.Т., Золотов Ю.А., Мосеев Л.И. и др. Научное открытие № А-128 от 15.05.1998. Сб. кратких описаний, 1999, вып. 2.
5. Serdic B., Fekete L., Meider H. J. Inorg. Nucl. Chem., 1980, v. 42, № 6, p. 885–893.
6. Беклемишев Н.К., Кузьмин Н.М., Кардиваренко Л.М. Ж. неорган. химии, 1988, т. 33, № 1, с. 185–190.
7. Moyer B.A., Deng Z.I., Sachleben A. Solv. Extr. Ion Exch., 1997, v. 15, № 5, p. 791–800.
8. Talanova G.G., Elkarim N.S.A., Hanes R.E. e.a. Anal. Chem., 1999, v. 71, p. 672–678.
9. Абрамов А.А. Вестн. Моск. ун-та. Химия, 2000, т. 41, № 1, с. 3–13.
10. Абрамов А.А., Волкова С.В., Дубовая О.В. и др. Ж. неорган. химии, 2003, т. 48, № 5, с. 865–869.
11. Abramov A.A., Galunin E.V., Iofa B.Z. Mendeleev Commun., 2002, p. 240–242.
12. Abramov A.A., Galunin E.V., Fedoseev V.M. The Third Russian-Japanese Seminar on Technetium. Dubna, 2002, p. 28.
13. Абрамов А.А., Иофа Б.З., Федосеев В.М. Тез. докл. конф. «Радиохимия-2003», Озерск, 2003, с. 66.
14. Abramov A.A., Dzbigirkhanov M.S.-A., Matyunin Y.I., Iofa B.Z. Mendeleev Commun., 2001, № 3, p. 121–122.
15. Абрамов А.А., Джигирханов М.С.-А., Иофа Б.З. Радиохимия, 2002, т. 43, № 1, с. 14–17.
16. Иофа Б.З., Абрамов А.А., Марков Б.Н. Там же, 1970, т. 12, № 5, с. 751–753.
17. Абрамов А.А., Иофа Б.З. Вестн. Моск. ун-та. Химия, 1970, № 3, с. 324–329.
18. Иофа Б.З., Абрамов А.А., Джавадян В.Г. Изв. ВУЗов, Химия и хим. технол., 1971, т. 14, № 5, с. 990–994.
19. Иофа Б.З., Абрамов А.А. Вестн. Моск. ун-та. Химия, Сер. 2, 1994, т. 35, № 6, с. 497–501.
20. Иофа Б.З., Джигирханов М.С.-А., Маклачков А.Т. и др. Радиохимия, 1987, т. 29, № 5, с. 684–689.
21. Абрамов А.А. Дисс. ... докт. хим. наук. Научный доклад. Москва, 2002, 70 с.
22. Абрамов А.А., Иофа Б.З. Радиохимия, 2002, т. 44, № 1, с. 18–19.
23. McCready V.R. Eur. J. Nucl. Medicine, 2000, v. 27 (Suppl.), p. 49.
24. Wagner Ed. H.N., Scabo Z., Buchanan J.W. Principles of nuclear medicine., v. 1. Second edition. W.B. Saunders Company, 1995, 594 p.
25. Atkins H.L., Shrivastava S.C. J. Nucl. Medicine Technology, 1998, v. 26, p. 80.
26. Atkins H.L., Shrivastava S.C. The Quarterly Journal of Nucl. Med., 1996, v. 40, p. 285.
27. Несмеянов Ан.Н., Дакар Г.М., Иофа Б.З. Радиохимия, 1963, т. 5, № 4, с. 428–436.
28. Дакар Г.М., Иофа Б.З. Там же, 1965, т. 7, № 1, с. 25–31.
29. Дакар Г.М., Иофа Б.З. Там же, 1962, т. 4, № 6, с. 744–746.
30. Дакар Г.М., Иофа Б.З. Там же, 1964, т. 6, № 4, с. 411–419.
31. Архипов А.Ю., Абрамов А.А., Иванова Н.А. и др. Химия гетероцикл. соедин., 1996, № 11/12, с. 1647–1651.
32. Абрамов А.А., Аверина Н.В., Иофа Б.З. и др. Там же, 1997, № 8, с. 1125–1129.
33. Иофа Б.З., Абрамов А.А., Сапожников Ю.А. Вестн. Моск. ун-та. Химия, 1998, т. 39, № 4, с. 285–287.
34. Kalmykov S.N., Arhipov A.V., Abramov A.A. e. a. J. Radioanal. Nucl. Chem., 1998, v. 228, № 1–2, p. 33–35.
35. Абрамов А.А., Анисимов А.В., Бобылева А.А. Химия гетероцикл. соедин., 2002, № 3, с. 291–304.
36. Абрамов А.А., Иофа Б.З., Краснов Н.Н. и др. Авт. свид. СССР № 444464, 1974.
37. Абрамов А.А., Иофа Б.З., Севостьянов Ю.Г. Изотопы в СССР. М.: Атомиздат, 1976, № 46, с. 26–29.
38. Иофа Б.З., Севостьянов Ю.Г. Абрамов А.А. и др. ISEC-1988, Moscow, v. IV, p. 161–164.
39. Джигирханов М.С.-А., Абрамов А.А., Иофа Б.З. Ж. неорган. химии, 2001, т. 46, с. 1049–1055.