

ОБРАЗОВАНИЕ «ТРЕТЬЕЙ ФАЗЫ» В ЭКСТРАКЦИОННО-ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИХ КОЛОНКАХ С Д2ЭГФК ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ИТТЕРБИЯ

© 2022 г. К. С. Бобровская, Р. А. Кузнецов*, А. Н. Фомин

Научно-исследовательский технологический институт им С.П. Капицы Ульяновского государственного университета, 432000, Ульяновск, ул. Университетская Набережная, д. 1., корп. 4

*e-mail: rostislavkuznetsov@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.11.2021, после доработки 24.01.2022, принята к публикации 31.01.2022

В связи с задачей отделения ^{177}Lu от макроколичеств Yb изучено образование гелеобразных солей («третьей фазы»), существенно уменьшающее эффективность хроматографии при выделении радионуклидов РЗЭ без носителя. Методом ИК Фурье-спектроскопии в работе показано образование полимерных гелеобразных солей ди(2-этилгексил)фосфата иттербия («третьей фазы») в динамических условиях в системе $\text{Yb}(\text{NO}_3)_3\text{--HNO}_3\text{--Д2ЭГФК}$ (сорбент – LN Resin). Эксперимент заключался в послонном анализе сорбента, спектры образцов сравнивали со спектрами специально подготовленного референтного образца соли.

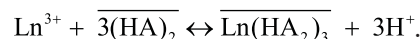
Ключевые слова: экстракция, экстракционная хроматография, Д2ЭГФК, третья фаза, иттербий

DOI: 10.31857/S0033831122050069, **EDN:** JCIVQH

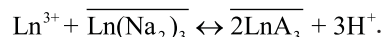
ВВЕДЕНИЕ

В практике выделения и очистки радионуклидов РЗЭ, таких, например, как ^{153}Gd , ^{177}Lu , ^{161}Tb и др., часто применяются экстракция или экстракционная хроматография с использованием в качестве экстрагентов фосфорорганических кислот или их эфиров. При этом задача выделения целевого радионуклида заключается в их отделении от макроколичеств стартового мишенного материала. В этом случае одной из проблем при экстракции макрокомпонента фосфорорганическими кислотами, в частности Д2ЭГФК, является образование на границе раздела водной и органической фаз так называемой «третьей фазы» – полимерных гелеобразных соединений, малорастворимых как в водной, так и в органической фазах [1–3]. Образование третьей фазы изменяет кинетику экстракции, приводит к снижению скорости расслаивания фаз, нарушая, таким образом, режим работы экстракционных аппаратов, снижая их производительность и эффективность работы.

При экстракции РЗЭ происходит образование экстрагируемого комплекса $\text{Ln}(\text{HA}_2)_3$:



Ввиду того, что экстракцию обычно проводят в условиях избытка экстрагента, экстрагируемый комплекс максимально сольватирован молекулами экстрагента, что обеспечивает его хорошую растворимость в органической фазе. Если концентрация лантанида в водной фазе достаточна для практически полного насыщения экстрагента, то создаются условия для образования координационного полимера состава $(\text{LnA}_3)_n$ малорастворимого как в органической, так и в водной фазе [2]:



Согласно Пеппарду [1], условие образования гелеобразного осадка на границе раздела фаз записывается в виде

$$[\text{HA}]/[\text{Ln}^{3+}] \leq 6,$$

где $[\text{HA}]$ – концентрация Д2ЭГФК в органической фазе, $[\text{Ln}^{3+}]$ – концентрация лантанида в водной

фазе. Данное условие было сформулировано для однократного контакта фаз. Для многоступенчатых процессов, например противоточной или полупротивоточной экстракции, даже при концентрации металла в водной фазе, не обеспечивающей выполнение вышеприведенного условия, после пропускания через экстракционную ячейку нескольких порций водной фазы возможно накопление металла в органической фазе с постепенным истощением ее емкости. Аналогично металл может накапливаться в колонке при проведении экстракционной хроматографии.

Закономерности образования третьей фазы при экстракции РЗЭ растворами ДЭГФК в статических условиях исследовались достаточно подробно [1–4]. В зависимости от начальной концентрации извлекаемого металла, типа используемого растворителя, кислотности среды при экстракции в ДЭГФК в межфазном слое может накапливаться до 30% от первоначального количества экстрагируемого элемента в водной фазе [4].

Механизм экстракции РЗЭ и образования третьей фазы в рассматриваемых системах подробно изучался еще в 1960–1990-х гг. Детальные же исследования вопроса образования третьей фазы в хроматографическом варианте разделения, скорее всего, не проводились, поскольку их результаты в доступной нам литературе отсутствуют. Лишь в отдельных работах (например, [5]) высказывались предположения о возможности образования полимерных осадков при экстракционно-хроматографическом разделении в системах с фосфорорганическими экстрагентами. Вместе с тем, результаты исследований кинетики образования/разрушения полимерных соединений, формирующих третью фазу в статических условиях [4], позволяют предположить, что третья фаза, сформировавшаяся в сорбенте экстракционно-хроматографической колонки, может являться одной из причин образования «хвостов» на выходных кривых. В свою очередь, ее образование может привести к резкому снижению селективности разделения близких по свойствам элементов. Так, в работе [6] отмечалось резкое уменьшение коэффициентов очистки гадолиния от тербия при росте содержания в колонке с ДЭГФК экстрагируемой формы GdA_3 из-за медленной кинетики обмена РЗЭ между фазами. Аналогичное снижение эффективности разделения Yb и Lu при

разделении на ДЭГФК, вызванное образованием хвостов Yb, было продемонстрировано в работе [7]. Эффективность разделения Yb и Lu на смоле LN2, содержащей в качестве экстрагента НЕНЕНР, также резко падает при увеличении содержания Yb в колонке [8] на фоне резко увеличивающегося «хвоста» на выходной кривой Yb. Характерным для всех этих публикаций является отсутствие прямых экспериментальных доказательств образования полимерных солей в колонке и связи с этим процессом изменений в хроматографическом поведении разделяемых элементов.

В рамках настоящей работы нами была предпринята попытка доказать образование полимерных гелеобразных соединений РЗЭ (на примере иттербия) при экстракционно-хроматографическом выделении. Объектом исследования являлась экстракционно-хроматографическая смола LN Resin, в которой ДЭГФК нанесена на носитель AmberChrom CG71. Интерес к данному сорбенту обусловлен его применением в технологии разделения РЗЭ, в частности для отделения ^{177}Lu от макроколичеств облученного ^{176}Yb [7]. Суть эксперимента заключалась в пропускании азотнокислого раствора нитрата иттербия через смолу LN Resin и последующем анализе образцов сорбента, отобранных из разных областей колонки, методом ИК Фурье-спектроскопии. Спектры образцов сорбента сравнивали с ИК спектром специально синтезированного референтного образца ди(2-этилгексил)фосфата иттербия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы и оборудование. Все использованные в работе реактивы имели квалификацию х.ч. и применялись без дополнительной очистки. Чистоту ДЭГФК подтверждали потенциометрическим титрованием. Воду, применяемую для приготовления растворов, очищали с использованием системы очистки воды Arrium mini (Sartorius, Германия). Нитрат иттербия получали растворением оксида иттербия в разбавленной (1 : 1) азотной кислоте с последующим упариванием и растворением сухого остатка в 0.1 М HNO_3 . Концентрацию иттербия в растворе определяли спектрофотометрически с применением Арсеназо III [9].

Регистрацию спектров производили на ИК Фурье-спектрометре Agilent Cary 660 FTIR.

Образцы для регистрации спектров твердых веществ подготавливали прессованием таблеток с КВг. Для регистрации спектров жидких образцов использовали метод жидкой пленки. Обработку спектров производили в программе Agilent Resolution Pro.

Синтез референтного образца ди(2-этилгексил)фосфата иттербия. В стеклянную пробирку вместимостью 15 мл вносили 0.59 г Д2ЭГФК, затем добавляли 10 мл раствора нитрата иттербия в 0.1 М HNO_3 с концентрацией иттербия 5 г/л. Содержимое пробирки периодически встряхивали до образования гелеобразного осадка. Водную фазу удаляли из пробирки, полученный осадок диспергировали в декане и переносили на бумажный фильтр. Осадок на фильтре дополнительно промывали деканом и сушили на воздухе в течение суток.

Синтез ди(2-этилгексил)фосфата иттербия в статических условиях. Навески смолы LN Resin массой 50 мг вносили в пробирку вместимостью 15 мл и суспендировали в 0.1 М HNO_3 , затем дегазировали в ультразвуковой ванне в течение 30 мин. Содержимое пробирок центрифугировали, затем декантировали раствор кислоты. Для получения образца № 1 вносили в пробирку с подготовленной смолой 10 мл раствора нитрата иттербия в 0.1 М HNO_3 с концентрацией иттербия 0.1 мг/мл. Содержимое пробирки перемешивали периодическим встряхиванием в течение 30 мин, затем содержимое пробирки переносили на бумажный фильтр. Образец № 2 готовили аналогичным образом, используя раствор нитрата иттербия с концентрацией 0.5 мг/мл. После высыхания смолы отбирали пробы для регистрации ИК спектров.

Синтез ди(2-этилгексил)фосфата иттербия в динамических условиях. Навеску смолы LN Resin массой 380 мг суспендировали в 0.1 М HNO_3 , дегазировали в ультразвуковой ванне в течение 30 мин и переносили в полипропиленовую колонку вместимостью 1 мл. Высота слоя сорбента составляла 90 мм, диаметр колонки – 3.5 мм. Через колонку пропустили 10 мл раствора нитрата иттербия в 0.1 М HNO_3 с концентрацией иттербия 0.5 мг/мл со скоростью 0.5 мл/мин. Для контроля проскока иттербия элюат собирали порциями по 1 мл. Содержание иттербия в отобранных порциях определяли по методике [9].

После пропускания раствора колонку сушили и разделяли на слои высотой около 10 мм, разрезав скальпелем. От каждого слоя сорбента отбирали образцы массой 0.3–0.5 мг для регистрации ИК спектра. Перед проведением измерений отобранные образцы смолы высушивали на воздухе при комнатной температуре для минимизации пика воды в ИК спектре.

Количество сорбированного иттербия в каждом слое определяли путем его десорбции, для чего образцы смолы переносили в полипропиленовые пробирки вместимостью 10 мл, затем в каждую пробирку вносили по 5 мл 4 М HNO_3 . Содержимое пробирок перемешивали периодическим встряхиванием в течение 30 мин, затем центрифугировали. Водную фазу пропускали через тефлоновый фильтр с размером пор 0.45 мкм и отбирали от фильтрата аликвоты, которые упаривали, сухой остаток растворяли в 0.1 М HNO_3 . В полученном растворе определяли содержание иттербия по методике [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известны несколько способов синтеза ди(2-этилгексил)фосфатов лантанидов. Один из распространенных способов предусматривает синтез натриевой соли Д2ЭГФК, которую растворяют в подходящем растворителе, а затем приводят в контакт с эквивалентным количеством водного раствора соли РЗЭ [10]. В другом способе синтез проводят в межфазной области при экстракции металла из водного раствора его соли раствором Д2ЭГФК в разбавителе [3, 11]. Состав и свойства образуемых соединений могут зависеть от способа их синтеза и состава используемой в процессе органической фазы, в частности растворителя. Это подтверждается различиями в ИК-спектрах солей, представленных в цитированных работах. Важно, что сорбенты, применяемые в экстракционной хроматографии, в частности смола LN Resin, не содержат растворителя. Поэтому для корректного сравнения ИК спектров ди(2-этилгексил)фосфатов необходимо, чтобы условия их синтеза «в пробирке» и образования в экстракционно-хроматографической колонке были одинаковыми. Поэтому нами был осуществлен синтез референтного образца ди(2-этилгексил)фосфата иттербия при экстракции иттербия из раствора азотной кислоты чистой Д2ЭГФК без добавле-

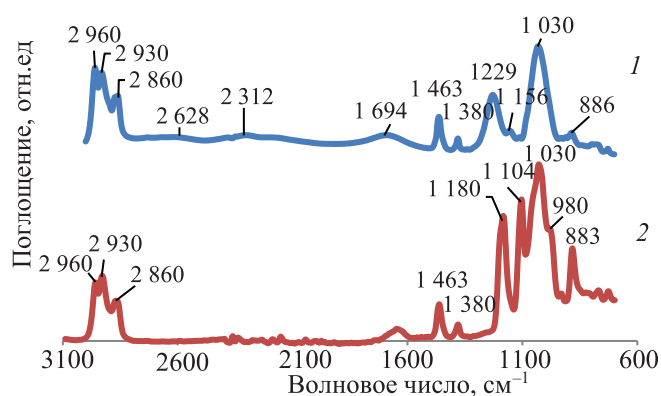


Рис. 1. ИК-спектр Д2ЭГФК (1) и ди(2-этилгексил) фосфата иттербия (2)

ния растворителей (на стадии синтеза). Поскольку синтезированная соль может содержать некоторое количество Д2ЭГФК в составе сольватного окружения образующихся полимеров $(LnA_3)_n$, полного удаления растворителя из выбранной схемы синтеза добиться, по видимому, невозможно. Для удаления этой части Д2ЭГФК осадок промывали деканом. Все остальные условия синтеза, в первую очередь кислотность растворов, при синтезе референтного образца и экстракционной хроматографии были одинаковыми.

На рис. 1 приведены ИК Фурье-спектры Д2ЭГФК и синтезированного нами ди(2-этилгексил)фосфата иттербия (для наглядности спектры разнесены по высоте). Полосы поглощения Д2ЭГФК при частотах 1380, 1463, 2860, 2930, 2960 cm^{-1} обусловлены валентными и деформационными колебаниями алкильных радикалов [5, 6, 11–13]. Линии 1694, 2312 cm^{-1} соответствуют деформационным колебаниям, а линия 2628 cm^{-1} – валентным колебаниям группы P–O–H [3, 12, 14], линии 1156, 1229 cm^{-1} соответствуют валентным колебаниям связи P=O [2, 3, 11, 12], линия 1030 cm^{-1} соответствует связи P–O–C [2, 3, 11–14]. По мнению авторов работ [2, 3, 10], образование полимера происходит за счет разрушения связи P=O и возникновения на ее месте новой мостиковой связи -O-(PR₂)-O-. При этом в ИК спектрах ди(2-этилгексил)фосфатов лантанидов не должны наблюдаться линии, относимые к связи P=O (1156 и 1229 cm^{-1}), а об образовании полимерной связи свидетельствует появление в спектре линий 1100 и 1180 cm^{-1} .

В спектре ди(2-этилгексил)фосфата иттербия в отличие от спектра Д2ЭГФК отсутствуют линии,

соответствующие колебаниям групп P–O–H. Это свидетельствует о замещении водорода на металл и образовании соли. Отсутствуют и линии 1156, 1229 cm^{-1} , соответствующие колебаниям связи P=O. При этом в спектре обнаруживаются линии 1180 и 1104 cm^{-1} , соответствующие колебаниям мостиковых групп -O-(PR₂)-O-, что подтверждает полимерную природу синтезированного соединения и может быть использовано для идентификации полимерной «третьей фазы» в экстракционно-хроматографической смоле. Помимо этого происходит уширение пика при 1030 cm^{-1} и появление линии 980 cm^{-1} , свидетельствующие об образовании связей P–O–P и P–O–C.

При отработке методики эксперимента нами была подтверждена возможность использования ИК Фурье-спектроскопии для идентификации полимерного ди(2-этилгексил)фосфата иттербия непосредственно на смоле LN Resin, в которой экстрагент (Д2ЭГФК) нанесен на инертный носитель AmberChrom CG71 [15]. Для этого мы сравнивали спектры образцов смолы LN Resin до и после насыщения иттербием в статических условиях. Образец смолы № 1 готовился путем контакта смолы с раствором иттербия, количество которого (1 мг) исключало образование «третьей фазы», поскольку мольное количество металла в этом случае было много меньше мольного количества экстрагента. Количество иттербия в растворе при подготовке образца смолы № 2 (5 мг) существенно превышало емкость смолы по данному элементу [15] при выбранной кислотности раствора ($[HNO_3] = 0.1$ моль/л).

В ИК спектре LN Resin, представленном на рис. 2, основные линии поглощения имеют максимумы при 2960, 2930, 2875, 1736, 1639, 1466, 1385, 1236, 1150, 1033 и 885 cm^{-1} . Эти линии поглощения полностью совпадают с линиями AmberChrom CG71 [16]. Линии, относящиеся к полосам поглощения Д2ЭГФК (1229, 1156, 1030 cm^{-1}) ввиду близости полос поглощения связей P=O и C–O перекрываются с линиями носителя и не могут быть идентифицированы отдельно. При этом данное положение полос поглощения не мешает идентифицировать линии, относящиеся к колебаниям связи -O-(PR₂)-O-. Спектр образца № 1, содержащего малое количество металла, практически идентичен спектру смолы LN Resin, т.е. образование полимер-

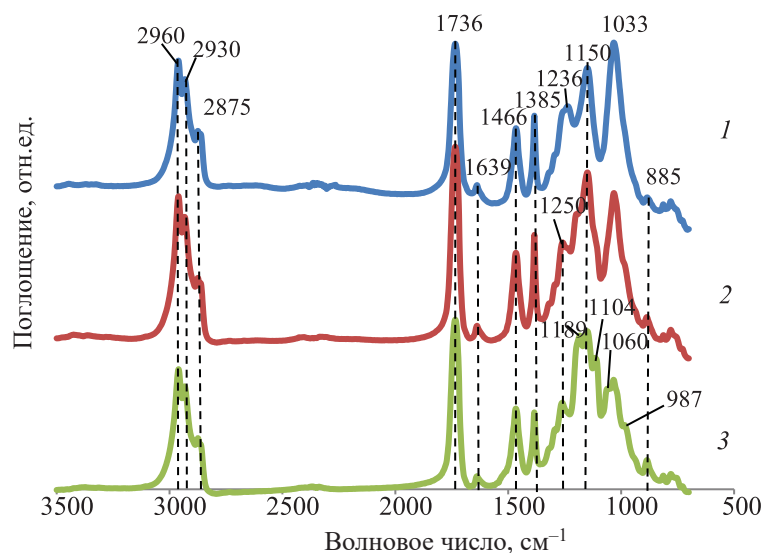


Рис. 2. ИК спектры смолы LN Resin до насыщения иттербием (1), образца смолы № 1 (2) и образца смолы № 2 (3).

ного соединения при данной загрузке сорбента не происходит, чего нельзя сказать об образце с большим содержанием иттербия. Об образовании полимера в образце № 2 можно судить на основании следующих фактов. Во-первых, линия 1236 см^{-1} претерпевает сдвиг в сторону больших частот. Такой сдвиг может возникать в результате смещения электронной плотности при замещении водорода на менее электроотрицательный иттербий. Во-вторых, в спектре видны линии 1189 и 1108 см^{-1} , подобные линиям 1180 и 1104 см^{-1} , наблюдаемым нами ранее в спектре ди(2-этилгексил)фосфата иттербия. Кроме того, отчетливо прослеживаются линии 1060 и 987 см^{-1} , указывающие на образование связей P–O–P и P–O–C [11].

Таким образом, метод ИК Фурье-спектроскопии позволяет идентифицировать образование полимерных соединений ди(2-этилгексил)фосфата иттербия в фазе сорбента при его высокой загрузке, которая неизбежно достигается в процессе пропускания раствора через хроматографическую колонку.

Извлечение РЗЭ в фазу ДЭГФК при низкой кислотности водной фазы ($0.1\text{--}0.5$ моль/л) характеризуется высокими значениями коэффициентов распределения D . Для смолы LN Resin в данных условиях коэффициент распределения иттербия составляет $10^4\text{--}10^5$. Это приводит к неравномерному распределению металла по длине (высоте) слоя сорбента. Верхние слои сорбента могут насытиться металлом практически до исчерпания емкости

сорбента, поскольку при достаточно высокой концентрации металла в водной фазе обеспечивается условие образования комплексов полимера состава $(\text{LnA}_3)_n$, малорастворимого как в органической, так и в водной фазе. Характерно, что даже если не выполняется приведенное выше условие образования «третьей фазы» Пеппарда, многоступенчатость процесса хроматографирования, т.е. многократное повторение актов сорбции–десорбции (экстракции–реэкстракции) в объеме одной ступени разделения, приведут к накоплению металла в первых слоях колонки, контактирующих с подвижной водной фазой. Динамика такого накопления описана, например, в работе Гуреева [17].

Выполненный нами колоночный эксперимент показал, что в выбранных условиях сорбции проскока иттербия в элюат не наблюдалось и он весь был сорбирован в колонке. Последующий анализ содержания иттербия в слоях сорбента показал,

Таблица 1. Результаты послойного определения иттербия в колонке

Слой колонки	Масса иттербия, мг	$[\text{HA}]/[\text{Ln}^{3+}]$
1	2.2	3.5
2	1.7	4.5
3	0.9	8.5
4	Н.о.	–
5	Н.о.	–
6	Н.о.	–

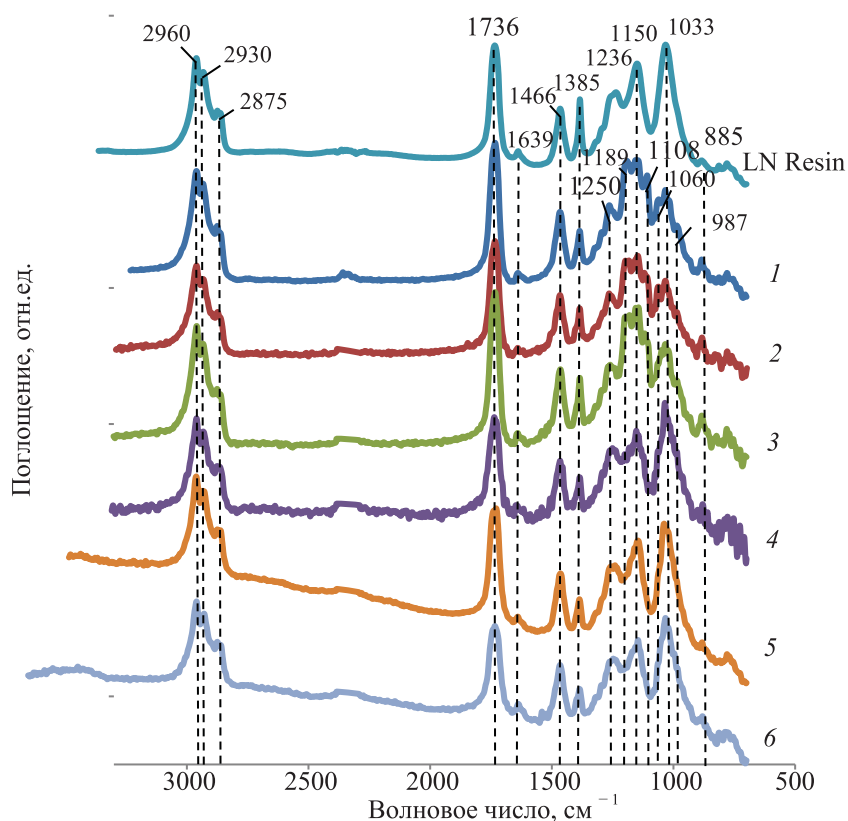


Рис. 3. ИК спектры образцов смолы из разных участков колонки. Номера на рисунке соответствуют номеру слоя сорбента. Для сравнения приведен спектр смолы LN Resin.

что иттербий обнаруживался лишь в трех верхних отобранных слоях. Обнаруженное количество иттербия составило 4.8 мг, что несколько отличается от массы иттербия, введенного в колонку (5 мг). Незначительный дебаланс массы металла обусловлен частичной потерей с пробами, отобранными для ИК Фурье-спектроскопии, а также заметным уровнем погрешности определения (10–15%), связанным с многостадийностью аналитической процедуры (отбор порошкообразной пробы–десорбция–упаривание–растворение–определение).

В нашем случае количество сорбента, приходящееся на один участок колонки, составляет примерно 36 мг. По данным работы [15], смола LN Resin содержит 40% Д2ЭГФК, т.е. ее масса составляет около 14 мг. Результаты определения содержания иттербия, приведенные в табл. 1, показывают, что в первых двух участках колонки соблюдается соотношение $[HA]/[Ln^{3+}] < 6$, являющееся условием образования полимера. Анализ ИК спектров образцов смолы после насыщения иттербием (рис. 3) показал, что изменения в спектрах LN Resin наблюдаются в

пробах, отобранных со всех трех участков колонки, содержащих иттербий, несмотря на несоблюдение указанного выше условия для третьего участка, что объясняется условностью выбора высоты участка колонки, которую при более точных оценках можно скорректировать. ИК спектры проб, отобранных на остальных участках, идентичны ИК спектрам LN Resin. В любом случае полученные результаты подтверждают факт образования полимерной фазы в верхней части колонки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований с использованием метода ИК Фурье-спектроскопии экспериментально подтвержден факт образования «третьей фазы» при пропускании азотнокислого раствора иттербия через экстракционно-хроматографическую колонку с сорбентом LN Resin.

Очевидно, что локализация третьей фазы в колонке будет зависеть от условий ее формирования, в

частности концентрации кислоты и металла. Размер зоны сорбции и зоны третьей фазы будет определяться факторами, влияющими на кинетику сорбции, такими как скорость движения водной фазы, температура и др. При использовании экстракционной хроматографии в аналитических приложениях для выделения/разделения малых (часто следовых) количеств элементов эффект третьей фазы, как правило, не наблюдается, и поведение элемента может быть удовлетворительно описано в рамках известных моделей, например [17].

В случае препаративного применения экстракционной хроматографии, в частности для выделения/очистки радионуклидов без носителя из массивных облученных мишеней, условия образования полимерных солей в колонке создаются весьма часто. Как мы указывали выше, это может быть одним из основных факторов снижения эффективности экстракционной хроматографии, особенно, при разделении близких по свойствам элементов. В этом случае необходима оптимизация условий разделения, позволяющих управлять процессом образования и поведением третьей фазы. Разработка таких условий требует более детального изучения процессов образования полимерных солей в динамических условиях и их поведения на разных стадиях экстракционно-хроматографического процесса (сорбция–промывка–элюирование–десорбция). Вопросы о том, что происходит с полимером при десорбции, как ведет себя экстрагент при более низких коэффициентах распределения и можно ли избежать полимеризации, пока остаются открытыми и, безусловно, нуждаются в рассмотрении.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект фундаментальных исследований № 18-48-730040 «Исследование закономерностей экстракционного и экстракционно-хроматографического разделения иттербия и лютеция из растворов минеральных кислот с использованием фосфорорганических экстрагентов»).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peppard D.F., Mason G.W., Driscoll W.J., Sironen R.J.* // J. Inorg. Nucl. Chem. 1958. Vol. 7. P. 276.
2. *Трифонов Ю.И., Легин Е.К., Суглобов Д.Н.* // Радиохимия. 1992. Т. 34, № 3. С. 138.
3. *Мельник М.И., Спирыков В.И., Филимонов В.Т., Карелин Е.А.* // Радиохимия. 1997. Т. 39, № 5. С. 431.
4. *Кизим Н.Ф., Голубина Е.Н.* // Радиохимия. 2016. Т. 58, № 3. С. 248–254.
5. Экстракционная хроматография / Под ред. Т. Брауна и Г. Герсини. М.: Мир, 1978. 627 с.
6. *Мельник М.И., Кузнецов Р.А., Филимонов В.Т.* // Радиохимия. 1992. Т. 34, № 6. С. 72.
7. *Mirzadeh S., Du M., Beets A.L., Knapp F.F.* Patent US 6716353 B1. 2004.
8. *Horwitz E.P., McAlister D.R., Bond A.H., Barrans R.E., Williamson J.M.* // Appl. Radiat. Isot. 2005. Vol. 63. P. 23.
9. *Саввин С.Б.* Арсеназо III. Методы фотометрического определения редких и актинидных элементов. М.: Атомиздат, 1966. 256 с.
10. *Трифонов Ю.И., Легин Е.К., Суглобов Д.Н.* // Радиохимия. 1985. Т. 27, №4. С. 422
11. *Lumetta G.J., Sinkov S.I., Krause J.A., Sweet L.E.* // J. Inorg. Chem. 2016. Vol. 55, N 4. P. 1633.
12. *Ferraro J.R., Peppard D.F.* // J. Nucl. Sci. Eng. 1963. Vol. 16. P. 389.
13. *Grimes T.S., Tian G., Rao L., Nash K.L.* // Inorg. Chem. 2012. Vol. 51. P. 6299.
14. *Shu Q., Khayambashi A., Wang X., Wei Y.* // J. Adsorp. Sci. Technol. 2018. Vol. 36. P. 1049.
15. *McAlister D.R., Horwitz E.P.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2007. Vol. 25. P. 757.
16. AmberchromCG71 Technical Data Sheet. <http://www.prep-hplc.com/Uploads/ueditor/file/20190724/5d-37f7ea7787a.pdf>
17. *Гуреев Е.С., Нуштаева Л.Б., Гуламова Л.М.* // Радиохимия. 1993. Т. 35, № 2. С. 91.