

## ЭКСТРАКЦИЯ РЗЭ(III) ИЗ ХЛОРНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ДИФЕНИЛФОСФИНИЛАЦЕТАМИДАМИ

© 2021 г. А. Н. Туранов<sup>а, \*</sup>, В. К. Карандашев<sup>б</sup>, А. Н. Яркевич<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Институт физики твердого тела РАН, ул. Академика Осипьяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

<sup>б</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,  
ул. Академика Осипьяна, 6, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

<sup>с</sup>Институт физиологически активных веществ РАН,  
Северный пр-д, 1, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

\*e-mail: turanov@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 05.11.2020 г.

Принята к публикации 09.11.2020 г.

Установлено, что объединение в одной молекуле двух бидентатных фрагментов  $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{N}(\text{Alk})-$  через амидный атом азота алкиленовым мостиком приводит к заметному увеличению экстракции РЗЭ(III) из хлорнокислых растворов. Определена стехиометрия извлекаемых комплексов. Рассмотрено влияние строения экстрагента, концентрации  $\text{HClO}_4$  в водной фазе и природы органического растворителя на эффективность извлечения ионов РЗЭ(III) в органическую фазу.

**Ключевые слова:** экстракция, РЗЭ(III), хлорная кислота, карбамоилметилфосфиноксиды

**DOI:** 10.31857/S0044457X21040243

### ВВЕДЕНИЕ

Экстракционные методы широко используются для извлечения и концентрирования ионов редкоземельных элементов (РЗЭ) из растворов минеральных кислот [1–4]. Известно, что бидентатные нейтральные фосфорорганические соединения (БНФОС), в частности диарил(диалкилкарбамоилметил)фосфиноксиды (КМФО), обладают в азотнокислых средах существенно более высокой экстракционной способностью по отношению к актинидам и РЗЭ(III), чем монодентатные фосфорорганические соединения [5]. Влияние строения КМФО на их экстракционную способность и селективность изучено достаточно подробно [6–10]. В последнее время возрос интерес к использованию в экстракционной практике полифункциональных фосфорорганических реагентов [11–15]. Показано, что лиганды, полученные присоединением нескольких КМФО-групп к пространственно предорганизованной структурной основе, обладают более высокой экстракционной способностью по отношению к ионам актинидов и РЗЭ(III), чем сами КМФО [16].

Отмечена определенная зависимость экстракционной способности соединений с двумя КМФО-фрагментами от характера и способа соединения этих фрагментов. Показано, что в азотнокислых средах 1,7-бис(дибутилкарбамоил)-1,7-

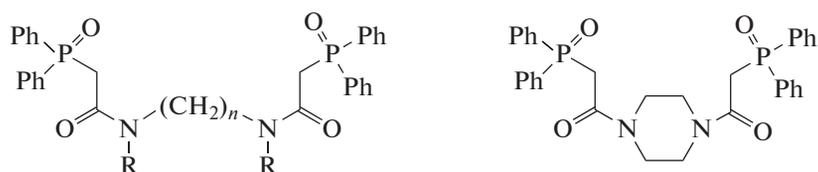
(дифенилфосфинил)гептан, молекула которого содержит две координирующие группы  $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NBu}_2$ , соединенные через метиленовые группы пентаметиленовой цепочкой, мало отличается по своей экстракционной способности по отношению к Am(III) [17] и РЗЭ(III) [18] от КМФО  $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NBu}_2$ . С другой стороны, объединение в одной молекуле двух бидентатных фрагментов  $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NH}-$  через амидный атом азота ди- или триэтиленгликолевой цепочкой [19], а также алкиленовым [20] или ариленовым мостиком [21] приводит к заметному увеличению экстракции U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) из азотнокислых растворов.

При переходе от азотнокислых к хлорнокислым средам экстракция U(VI), Am(III) и РЗЭ(III) растворами БНФОС [22–27], а также замещенных дигликольамидов [28] и дипиколинамидов [29] значительно возрастает. Возможные причины такого “перхлоратного” эффекта обсуждались в работах [22, 23, 30, 31]. Этот эффект использован для увеличения эффективности концентрирования U(VI), Am(III) и РЗЭ(III) из растворов азотной и фосфорной кислот при добавлении небольших количеств  $\text{HClO}_4$  или перхлоратов щелочных металлов в водную фазу [24, 25].

Сведения об экстракции ионов РЗЭ(III) из перхлоратных сред соединениями, содержащими два КМФО-фрагмента, ограничены [20, 32].

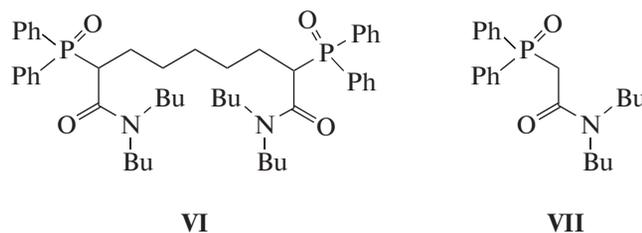
Цель настоящей работы – исследование влияния характера соединения КМФО-фрагментов в молекуле экстрагента на эффективность экстракции РЗЭ(III) из хлорнокислых растворов. Для этого рассмотрено межфазное распределение РЗЭ(III) между растворами  $\text{HClO}_4$  и органической фазой, содержащей соединения I–III, различающиеся длиной алкиленового мостика между координирующими фрагментами, а также со-

единение V с пиперазиновым фрагментом между фрагментами КМФО и соединение VI, молекула которого содержит две координирующие КМФО-группы, соединенные через метиновые группы пентаметиленовой цепочкой. Эффективность экстракции ионов РЗЭ(III) этими экстрагентами сопоставлена с эффективностью их экстракции монофосфорильным аналогом VII, а также с литературными данными по экстракции ионов РЗЭ(III) соединением IV [33] в сопоставимых условиях.



I (R =  $\text{C}_3\text{H}_7$ ,  $n = 2$ ); II (R =  $\text{C}_8\text{H}_{17}$ ,  $n = 4$ );

III (R =  $\text{C}_8\text{H}_{17}$ ,  $n = 6$ ); IV (R =  $\text{C}_6\text{H}_{13}$ ,  $n = 5$ ) [33]



VI

VII

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединения I–III, V [34], VI, VII [35] получены известными методами.

Распределение РЗЭ(III) в экстракционных системах изучали на модельных растворах 0.03–5.0 моль/л  $\text{HClO}_4$ . Исходные водные растворы с концентрацией каждого элемента  $2 \times 10^{-6}$  моль/л готовили растворением соответствующих перхлоратов в воде с последующим добавлением  $\text{HClO}_4$  до требуемой концентрации. Используемые реактивы соответствовали марке “х. ч.” В качестве органических растворителей использовали 1,2-дихлорэтан, нитробензол, хлороформ и *o*-ксилол марки “х. ч.” без дополнительной очистки. Растворы экстрагентов в органических растворителях готовили по точным навескам.

Опыты по экстракции проводили в пробирках с притертыми пробками при температуре  $21 \pm 1^\circ\text{C}$  и соотношении объемов органической и водной фаз 1 : 1. Контакт фаз осуществляли на роторном аппарате для перемешивания со скоростью 60 об/мин

в течение 1 ч. Предварительно установлено, что этого времени достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения ( $D_{Ln}$ ).

Содержание РЗЭ(III) в исходных и равновесных водных растворах определяли методом масс-спектрометрии с ионизацией пробы в индуктивно связанной плазме с использованием масс-спектрометра X-7 (Thermo Electron, США). Содержание элементов в органической фазе определяли после реэкстракции раствором 0.1 моль/л оксиэтилидендифосфоновой кислоты. Коэффициенты распределения элементов рассчитывали как отношение их концентраций в равновесных фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 5%. Концентрацию  $\text{HClO}_4$  в равновесных водных фазах находили потенциометрическим титрованием раствором  $\text{NaOH}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

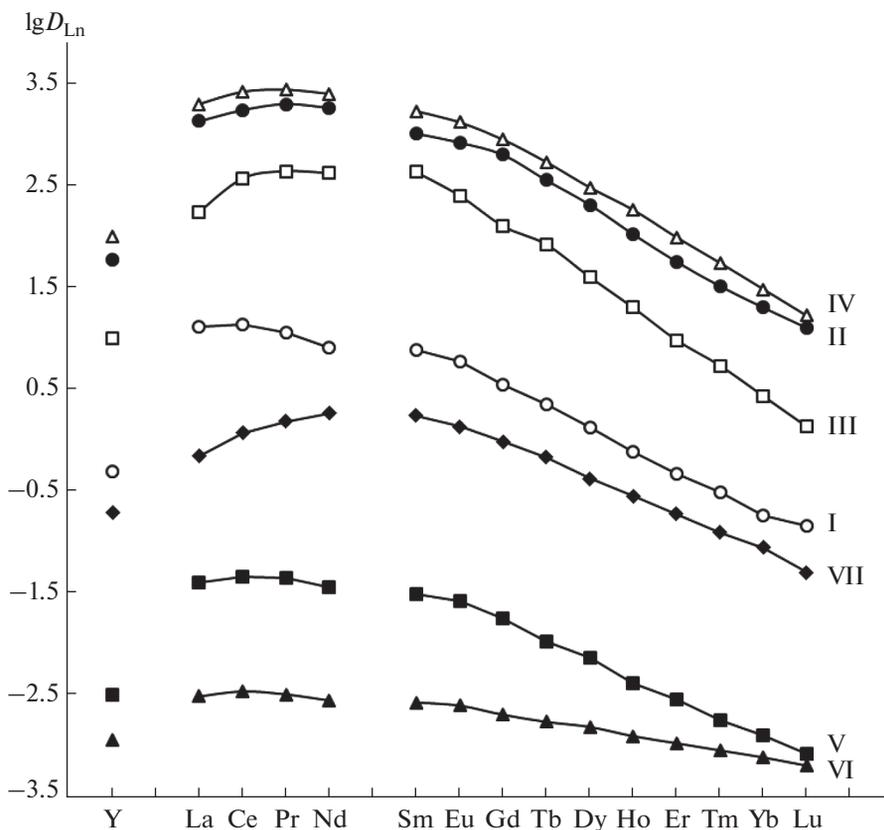
Изучена экстракция РЗЭ(III) растворами соединений I–VII в дихлорэтане с одинаковой концентрацией КМФО-групп из раствора 1 моль/л  $\text{HClO}_4$ . Результаты сравнительного анализа величин коэффициентов распределения РЗЭ(III) ( $D_{Ln}$ ) для изученных соединений представлены на рис. 1. Видно, что характер объединения координирующих фрагментов в молекуле экстрагентов I–VI существенно влияет на эффективность экстракции РЗЭ(III). Реагент VI, в молекуле которого две координирующие КМФО-группы соединены через метиновые группы пентаметиленовой цепочкой, практически не экстрагирует РЗЭ(III) в этих условиях ( $\lg D < -2$ ). Это может быть связано с увеличением конформационной жесткости метиновых мостиков между P=O- и C=O-группами, препятствующим бидентатной координации с ионами РЗЭ(III) [17]. Высказывалось также предположение, что уменьшение числа атомов водорода в мостике между P=O- и C=O-группами лиганда препятствует образованию системы водородных связей с молекулами органического растворителя, сольватирующего экстрагируемый комплекс [36]. Экстракционная способность *bis*-КМФО V, в молекуле которого координирующие карбамоильные группы заблокированы жестким пиперазиновым фрагментом, значительно снижается по сравнению с его моноаналогом VII. Соединения I–IV экстрагируют РЗЭ(III) более эффективно, чем их моноаналог VII. Одной из причин этого может быть участие дополнительной координирующей группы в комплексообразовании с ионами  $\text{Ln}^{3+}$ . Однако это предположение требует подтверждения путем проведения структурных исследований экстрагируемых комплексов. Зависимость  $D_{Ln}$  от числа метиленовых групп ( $n$ ) в алкиленовом мостике между двумя координирующими группами  $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{Nalk}$  носит немонотонный характер. Наибольшие значения  $D_{Ln}$  наблюдаются при  $n = 4$  и  $5$  (соединения II и IV). Уменьшение длины алкиленового мостика в молекуле соединения I сопровождается снижением  $D_{Ln}$  (рис. 1). Это может быть связано как с наличием стерических препятствий для комплексообразования с участием связанных через атом азота карбамоильных фрагментов, так и со снижением донорной способности координирующих групп экстрагента I вследствие действия индукционного эффекта. С увеличением  $n$  от 2 до 4 это действие ослабляется, и величина  $D_{Ln}$  резко возрастает. Снижение  $D_{Ln}$  при увеличении  $n$  от 5 до 6 (соединение III) может быть связано как с увеличением расстояния между координирующими центрами молекулы экстрагента, что препятствует полидентатной координации с ионом металла, так и с увеличением размера алкильного радикала R.

При экстракции соединениями I–VII из растворов  $\text{HClO}_4$  наблюдается тенденция уменьшения  $D_{Ln}$  с увеличением атомного номера ( $Z$ ) РЗЭ (рис. 1). Положение Y(III) в ряду РЗЭ(III) между Ho(III) и Er(III) соответствует близости их ионных радиусов [37]. Такой же характер зависимости  $D_{Ln}-Z$  отмечался ранее при экстракции РЗЭ(III) растворами КМФО из азотнокислых растворов [8, 38] и был объяснен увеличением энергии гидратации ионов  $\text{Ln}^{3+}$  вследствие уменьшения их ионных радиусов с возрастанием  $Z$  [8]. Величины фактора разделения La(III) и Lu(III) ( $\beta_{\text{La/Lu}} = D_{\text{La}}/D_{\text{Lu}}$ ) при экстракции соединениями I–IV в дихлорэтане ( $\beta_{\text{La/Lu}} = 89.1, 107, 129, 120$  для соединений I, II, III и IV соответственно) существенно выше, чем при экстракции КМФО VII ( $\beta_{\text{La/Lu}} = 13.8$ ). Это свидетельствует о значительном повышении селективности экстракции РЗЭ(III) из хлорнокислых растворов растворами *bis*-КМФО I–IV по сравнению с их моноаналогом VII.

Рассмотрено влияние концентрации  $\text{HClO}_4$  в равновесной водной фазе на изменение коэффициентов распределения РЗЭ(III) при экстракции растворами соединений I–III и VII в дихлорэтане. Увеличение концентрации  $\text{HClO}_4$  сопровождается ростом  $D_{Ln}$  во всем исследованном интервале концентраций  $\text{HClO}_4$  (рис. 2), несмотря на значительную соэкстракцию  $\text{HClO}_4$ , приводящую к снижению концентрации свободного экстрагента в органической фазе. Высказывалось предположение, что протонирование экстрагента в системе с  $\text{HClO}_4$  приводит к образованию предорганизованной структуры лиганда, что способствует увеличению его экстракционной способности [31].

Методом сдвига равновесия определено стехиометрическое соотношение  $\text{Ln}(\text{III})$  : экстрагент I–III в экстрагируемых комплексах, свидетельствующее о том, что соединения I–III в дихлорэтане экстрагируют РЗЭ(III) из хлорнокислых растворов в форме дисольватов. В частности, на рис. 3 представлен угловой наклон зависимости  $\lg D_{Ln} - \lg [L]$  для соединения II, который равен  $2.0 \pm 0.1$ . В аналогичных условиях БНФОС экстрагируют РЗЭ(III) в форме три- и тетра сольватов [23, 27].

Природа органического растворителя оказывает существенное влияние на эффективность экстракции РЗЭ(III) соединениями I–III из хлорнокислых растворов. Так, при экстракции из раствора 1 моль/л  $\text{HClO}_4$  растворами 0.001 моль/л соединения III значения  $\lg D_{Eu}$  возрастают в ряду *o*-ксилол (1.77) < дихлорэтан (2.38) < нитробензол (>3.7) по мере увеличения их полярности и сольватирующей способности. Подобные зависимости наблюдались и при экстракции РЗЭ(III) рас-



**Рис. 1.** Экстракция РЗЭ(III) и Y(III) растворами 0.001 моль/л соединений I–III, IV [30], V и 0.002 моль/л соединения VII в дихлорэтано из растворов 1 моль/л HClO<sub>4</sub>.

творами БНФОС [36, 39]. При использовании хлороформа в качестве разбавителя экстракция РЗЭ(III) резко снижается ( $\lg D_{Eu} < -1.2$ ), что может быть связано с уменьшением активности экстрагента в органической фазе вследствие образования водородных связей P=O...HCCl<sub>3</sub> [36].

Сопоставление значений  $D_{Ln}$  при экстракции РЗЭ(III) соединениями I–III из растворов HClO<sub>4</sub> и HNO<sub>3</sub> (табл. 1) показало, что из растворов хлорной кислоты РЗЭ(III) экстрагируются более эффективно, чем из растворов азотной кислоты. Величина “перхлоратного” эффекта, обычно выражаемая как отношение коэффициентов распределения ионов

**Таблица 1.** Коэффициенты распределения Eu(III) при экстракции растворами 0.001 моль/л соединений I–III в дихлорэтано из растворов 3 моль/л HClO<sub>4</sub> и HNO<sub>3</sub>

Соединение	$D_{Eu}(HClO_4)$	$D_{Eu}(HNO_3)$
I	15.8	0.0095
II	2400	0.035
III	549	0.013

металлов при экстракции из растворов, содержащих ионы ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, в сопоставимых условиях ( $K_{ClO_4^-/NO_3^-} = D_{Ln}(ClO_4^-)/D_{Ln}(NO_3^-)$ ), составляет  $6.8 \times 10^4$  при экстракции Eu(III) растворами 0.001 моль/л соединения II в дихлорэтано из растворов 3 моль/л HClO<sub>4</sub> и HNO<sub>3</sub>. Кроме того, при переходе от азотнокислых сред к хлорноокислым значительно повышается селективность экстракции РЗЭ(III): величины  $\beta_{La/Lu}$  составляют 18.2 и 245 соответственно.

Поскольку ионы РЗЭ(III) практически не экстрагируются соединениями I–III из растворов соляной, серной и фосфорной кислот, исследовано влияние добавки HClO<sub>4</sub> в водную фазу на эффективность экстракции. Установлено, что добавка 0.1 моль/л HClO<sub>4</sub> в растворы 3 моль/л HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> или H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> позволяет практически количественно извлекать микроколичества РЗЭ(III) раствором 0.01 моль/л соединения II в дихлорэтано. Это позволяет использовать данное соединение для концентрирования ионов РЗЭ(III) из растворов сложного солевого состава в присутствии перхлорат-ионов.

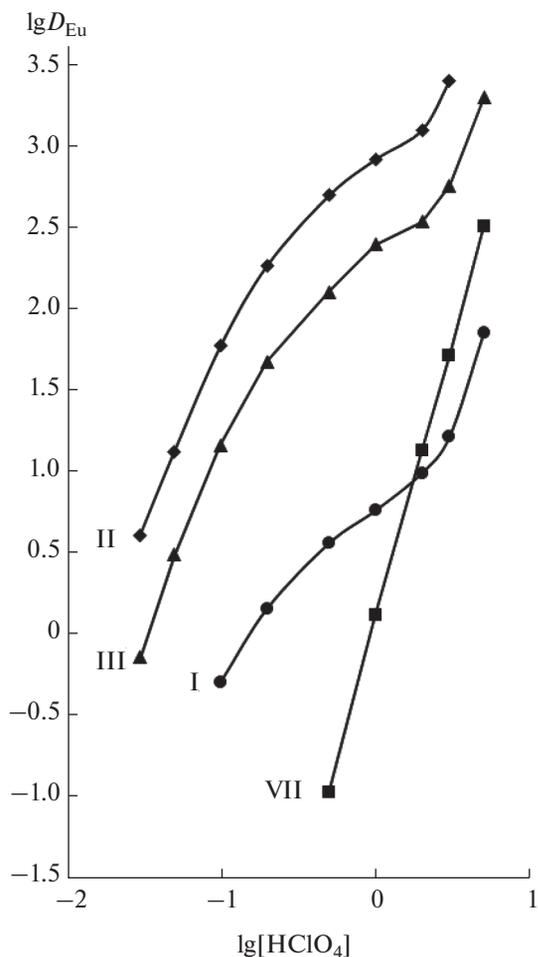


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения Eu(III) от концентрации  $\text{HClO}_4$  в водной фазе при экстракции растворами 0.001 моль/л соединений I–III и 0.002 моль/л соединения VII в дихлорэтане.

Полученные результаты показали, что объединение в одной молекуле двух бидентатных фрагментов  $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NAlk-}$  через амидный атом азота алкиленовым мостиком приводит к заметному увеличению эффективности и селективности экстракции РЗЭ(III) из хлорноокислых растворов. Экстракционная способность соединения V, в молекуле которого координирующие группы соединены жестким пиперазиновым фрагментом, значительно снижается по сравнению с его моноаналогом VII. Зависимость  $D_{Ln}$  от числа метиленовых групп ( $n$ ) в алкиленовом мостике между двумя координирующими группами  $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{N}(\text{R})$  носит немонотонный характер и может зависеть также от природы алкильного заместителя R. Максимальные значения  $D_{Ln}$  наблюдаются при  $n = 5$ . Ионы РЗЭ(III) экстрагируются соединениями I–III из растворов хлорной кислоты более эффективно и селективно, чем из растворов азотной кислоты.

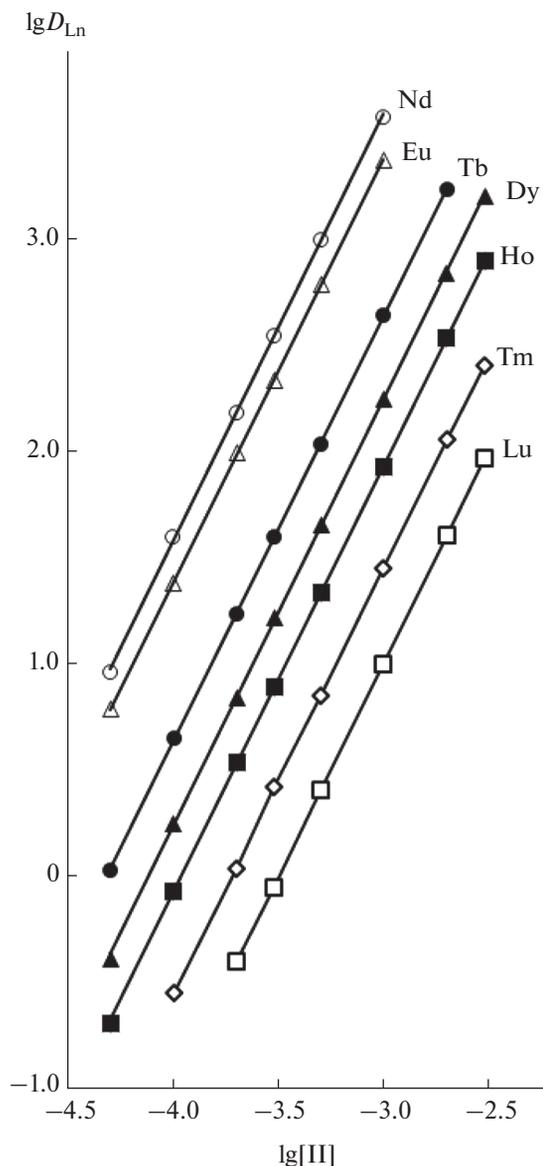


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распределения РЗЭ(III) от концентрации соединения II в дихлорэтане при экстракции из раствора 3 моль/л  $\text{HClO}_4$ .

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания 2020 г. ИФТТ РАН, ИПТМ РАН и ИФАВ РАН (тема № 0090-2019-0008).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nash K.L., Jensen M.P. // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths / Eds. Gschneidner K.A., Eyring L. Elsevier Science B.V., 2000. V. 28. P. 311.

2. Сафиулина А.М., Иванец Д.В., Кудрявцев Е.М. и др. // Журн. неорган. химии. 2019. Т. 64. № 4. С. 430. [Safiliulina A.M., Ivanets D.V., Kudryavtsev E.M. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 4. P. 536. <https://doi.org/10.1134/S0036023619040181> <https://doi.org/10.1134/S0044457X19040184>
3. Торгов В.Г., Ткачёв С.В., Ус Т.В. // Журн. неорган. химии. 2019. Т. 64. № 4. С. 438. [Torgov V.G., Tkachev S.V., Us T.V. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 4. P. 543. <https://doi.org/10.1134/S0036023619040193> <https://doi.org/10.1134/S0044457X19040196>
4. Иванова И.С., Криворотко Е.С., Илюхин А.В. и др. // Журн. неорган. химии. 2019. Т. 64. № 5. С. 538. [Ivanova I.S., Krivorotko E.S., Ilyukhin A.V. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 5. P. 666. <https://doi.org/10.1134/S0036023619050097> <https://doi.org/10.1134/S0044457X1905009X>
5. Розен А.М., Крупнов Б.В. // Успехи химии. 1996. Т. 65. № 11. С. 1052.
6. Медведь Т.Я., Чмутова М.К., Нестерова Н.П. и др. // Изв. АН СССР. Сер. химическая. 1981. № 9. С. 2121.
7. Мысоедов В.Ф., Чмутова М.К., Kochetkova N.E. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 1986. V. 4. № 1. P. 61.
8. Horwitz E.P., Martin K.A., Diamond H., Kaplan L. // Solvent Extr. Ion Exch. 1986. V. 4. № 3. P. 449. <https://doi.org/10.1080/07366298608917877>
9. Чмутова М.К., Иванова Л.А., Кочеткова Н.Е. и др. // Радиохимия. 1995. Т. 37. № 5. С. 422.
10. Чмутова М.К., Литвина М.Н., Прибылова Г.А. и др. // Радиохимия. 1995. Т. 37. № 5. С. 430.
11. Leoncini A., Huskens J., Verboom W. // Chem. Soc. Rev. 2017. V. 46. № 23. P. 7229. <https://doi.org/10.1039/c7cs00574a>
12. Wilson A.M., Bailey P.J., Tasker P.A. // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. P. 123. <https://doi.org/10.1039/c3cs60275c>
13. Werner E.J., Biers S.M. // Org. Chem. Front. 2019. V. 6. № 12. P. 2067.
14. Аляпышев М.Ю., Бабаин В.А., Устынюк Ю.А. // Успехи химии. 2016. Т. 85. № 9. С. 943. [Alyapyshev M.Yu., Babain V.A., Ustynyuk Yu.A. // Russ. Chem. Rev. 2016. V. 85. № 9. P. 943. <https://doi.org/10.1070/RCR4589>
15. Мастрюкова Т.А., Артюшин О.И., Одинец И.Л., Тананаев И.Г. // Рос. хим. журн. 2005. Т. 49. № 2. С. 86.
16. Arnand-New F., Bohmer V., Dozol J.F. et al. // J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1996. V. 2. P. 1175.
17. Кочеткова Н.Е., Койро О.Э., Нестерова Н.П. и др. // Радиохимия. 1986. Т. 28. № 3. С. 338.
18. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Радиохимия. 2012. Т. 54. № 5. С. 439. [Turanov A.N., Karandashev V.K., Yarkevich A.N. // Radiochemistry. 2012. V. 54. № 5. P. 477. <https://doi.org/10.1134/S1066362212050104>
19. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Бондаренко Н.А. // Радиохимия. 2006. Т. 48. № 2. С. 158. [Turanov A.N., Karandashev V.K., Bondarenko N.A. // Radiochemistry. 2006. V. 48. № 2. P. 175. <https://doi.org/10.1134/S1066362206020147>
20. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Шарова Е.В. и др. // Радиохимия. 2010. Т. 52. № 3. С. 219. [Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V. et al. // Radiochemistry. 2010. V. 52. № 3. P. 258. <https://doi.org/10.1134/S1066362210030069>
21. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Шарова Е.В. и др. // Радиохимия. 2012. Т. 54. № 1. С. 47. [Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V. et al. // Radiochemistry. 2012. V. 54. № 1. P. 48. <https://doi.org/10.1134/S1066362212010067>
22. Mrochek J.E., Banks C.V. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1965. V. 27. P. 589.
23. Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А., Большакова А.С. // Радиохимия. 1978. Т. 20. № 5. С. 725.
24. Smirnov I.V., Babain V.A., Shadrin A.Yu. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 2005. V. 23. P. 1. <https://doi.org/10.1081/SEI-200044381>
25. Чмутова М.К., Юссониа М., Литвина М.Н. и др. // Радиохимия. 1990. Т. 32. № 4. С. 56.
26. Чмутова М.К., Литвина М.Н., Нестерова Н.П. и др. // Радиохимия. 1990. Т. 32. № 5. С. 88.
27. Chmutova M.K., Litvina M.N., Nesterova N.P. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 1992. V. 10. № 3. P. 439. <https://doi.org/10.1080/07366299208918114>
28. Tachimori S., Sasaki Y., Suzuki S. // Solvent Extr. Ion Exch. 2002. V. 20. P. 687. <https://doi.org/10.1081/SEI-120016073>
29. Аляпышев М.Ю., Бабаин В.А., Антонов Н.Г., Смирнов И.В. // Журн. прикл. химии. 2006. Т. 79. № 11. С. 1827. [Alyapyshev M.Yu., Babain V.A., Antonov N.G., Smirnov I.V. // Russ. J. Appl. Chem. 2006. V. 79. № 11. P. 1808. <https://doi.org/10.1134/S1070427206110139>
30. Nash K. // Sep. Sci. Technol. 1999. V. 34. P. 911.
31. Смирнов И.В. // Радиохимия. 2007. Т. 49. № 1. С. 40. [Smirnov I.V. // Radiochemistry. 2007. V. 49. № 1. P. 44. <https://doi.org/10.1134/S1066362207010080>
32. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Бондаренко Н.А. // Журн. неорган. химии. 2008. Т. 53. № 11. С. 1923. [Turanov A.N., Karandashev V.K., Bondarenko N.A. // Russ. J. Inorg. Chem. 2008. V. 53. № 11. P. 1801. <https://doi.org/10.1134/S0036023608110223>
33. Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 2012. V. 30. P. 604. <https://doi.org/10.1080/07366299.2012.671117>
34. Яркевич А.Н., Брель В.К., Махаева Г.Ф. и др. // Журн. общей химии. 2015. Т. 85. № 7. С. 1120. [Yarkevich A.N., Brel V.K., Makhaeva G.F. et al. // Russ. J. Gen. Chem. 2015. V. 85. № 7. P. 1644. <https://doi.org/10.1134/S1070363215070129>
35. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Харитонов А.В. и др. // Журн. общей химии. 1999. Т. 69. № 7. С. 1109. [Turanov A.N., Karandashev V.K., Kharitonov A.N. et al. // Russ. J. Gen. Chem. 1999. V. 69. № 7. P. 1068.]
36. Розен А.М., Никифоров А.С., Николотова З.И., Карташева Н.А. // Докл. АН СССР. 1986. Т. 286. № 3. С. 667.
37. Shannon R.D. // Acta Crystallogr. 1976. V. 32. P. 751. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
38. Литвина М.Н., Чмутова М.К., Мысоедов Б.Ф., Кабачник М.И. // Радиохимия. 1996. Т. 38. № 6. С. 525.
39. Шадрин А.Ю., Бабаин В.А., Киселева Р.Н. // Радиохимия. 1993. Т. 35. № 1. С. 45. [Shadrin A.Yu., Babain V.A., Kiseleva R.N. // Radiochemistry. 1993. V. 35. № 1. P. 30.]