

— ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЯ —

Научная статья

УДК 534.344

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-3-81-89>

**Закономерности извлечения железа (III) в системах
высаливатель – бис(алкилполиоксиэтилен)фосфат калия – вода**

Александр Михайлович Елохов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Аннотация. Исследованы закономерности распределения железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в присутствии неорганических кислот и дополнительного высаливателя – хлорида натрия. Установлено, что при низкой кислотности железо (III) извлекается по катионообменному механизму, а в присутствии хлорид-ионов из кислых сред возможно извлечение железа по гидратно-сolvатному механизму. Установлено, что при кислотности более 3,5 моль/л HCl железо (III) извлекается по гидратно-сolvатному механизму в форме соединения $H_2[FeCl_5]$. Доказано, что при одновременном присутствии серной кислоты и хлорида натрия извлечение железа (III) протекает одновременно по катионообменному и гидратно-сolvатному механизмам.

Ключевые слова: оксиполитированные ПАВ, жидкостная экстракция, гидратно-сolvатный механизм, катионообменный механизм, железо (III)

Для цитирования: Елохов А.М. Закономерности извлечения железа (III) в системах высаливатель – бис(алкилполиоксиэтилен)фосфат калия – вода // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2024. Т. 14, № 3. С. 81–89. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-3-81-89>

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-3-81-89>

**Regularities of iron (III) extraction in systems
Salting-out agent – potassium bis(alkylpolyoxyethylene)phosphate – water**

Aleksandr M. Elokhov

Perm State University, Perm, Russia

Abstract. The regularities of iron (III) distribution in the ammonium sulfate – oxyphos B – water system in the presence of inorganic acids and an additional salting-out agent – sodium chloride have been studied. It has been established that at low acidity, iron (III) is extracted by the cation-exchange mechanism, and in the presence of chloride ions, iron can be extracted from acidic media by the hydrate-solvate mechanism. It has been established that at acidity above 3.5 mol/l HCl, iron (III) is extracted by the hydrate-solvate mechanism in the form of the compound $H_2[FeCl_5]$. It has been proven that in the simultaneous presence of sulfuric acid and sodium chloride, iron (III) extraction occurs simultaneously by the cation-exchange and hydrate-solvate mechanisms.

Keywords: oxyethylated surfactants, liquid extraction, hydrate-solvate mechanism, cation exchange mechanism, iron (III)

For citation: Elokhov, A.M. (2024) “Regularities of iron (III) extraction in systems salting-out agent – potassium bis(alkylpolyoxyethylene)phosphate – water”, *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 14, no. 3, pp. 81–89. (In Russ.). <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-3-81-89>.

Ионные поверхностно-активные вещества широко используются в аналитической химии, в том числе в методах экстракционного концентрирования. Катионные поверхностно-активные вещества, являясь аналогами солей четвертичных аммониевых оснований, могут выступать эффективными анионообменными экстрагентами, извлечение металлов в этом случае происходит в виде различных анионных ацидокомплексов [1, 2]. Введение КПАВ в растворы, содержащие хелаты металлов с хромофорными кислотными реагентами, позволяет в ряде случаев улучшить аналитические характеристики фотометрических реакций [3, 4]. При этом для получения расслаивающихся систем с катионными ПАВ может использоваться высаливание неорганическими солями или кислотами, использование для экстракции смесей катионных ПАВ с неионными или анионными ПАВ [5, 6], что позволяет осуществлять расслаивание без использования дополнительных высаливателей.

Наиболее простым и удобным способом получения расслаивающихся систем с АПАВ является высаливание кислотами – кислотнo-индуцированная экстракция [7–9]. Другим способом расслаивания анионных ПАВ является высаливание неорганическими солями при комнатной или более высокой температуре [10, 11], а также использование смесей анионных ПАВ и ионных жидкостей [12, 13].

Среди технических ионных ПАВ, нашедших применение в экстракции ионов металлов в присутствии высаливателя наибольший интерес вызывает анионное оксиэтилированное ПАВ бис(алкилполиоксиэтилен)фосфат калия (оксифос Б), являющееся бифункциональным экстракционным реагентом, способным извлекать

ионы металлов из нейтральных и слабокислых растворов по катионообменному механизму, а из сильноокислых, в присутствии анионо-комплексобразователей – по анионообменному [14–16]. Влияние различных факторов, в том числе температуры, природы высаливателя, неорганической кислоты и дополнительных комплексобразователей на извлечение ионов металлов оксифосом Б исследовано достаточно подробно, однако состав экстрагируемых соединений, необходимый для подтверждения механизмов экстракции, остается неизученным. Поэтому целью настоящей работы стало установление состава экстрагируемых соединений железа (III) в системах высаливатель – бис(алкилполиоксиэтилен)фосфат калия – вода.

Объекты и методы исследования

В работе использованы: оксифос Б (бис(алкилполиоксиэтилен)фосфат калия, содержание основного вещества 98%); неорганические соли квалификации ч.д.а. (сульфат аммония и хлорид натрия); неорганические кислоты (хлороводородная, серная, азотная, хлорная), дистиллированная вода.

Экстракцию осуществляли в градуированных пробирках, в которые помещали 2,0 г сульфата аммония, 2,0 г оксифоса Б, 0,5 мл 0,4 моль/л раствора железа (III), и расчетный объем 5 моль/л хлороводородной (серной, азотной, хлорной) кислот или концентрированной хлороводородной кислоты, расчетный объем 5,0 моль/л хлорида натрия (если требовалось) и доводили дистиллированной водой до объема 20 мл. Смесь встряхивали в течение 1 мин и оставляли пробирки до просветления фаз. После чего водную фазу отделяли и определяли в ней содержание железа (III) комплексонометрическим титрованием после нейтрализации

раствора до $\text{pH} = 2-3$ с использованием сульфосалициловой кислоты в качестве индикатора.

3. Результаты и их обсуждение

В системе сульфат аммония – оксифос Б – вода исследовано распределение 0,01 моль/л ионов железа (III) в зависимости от концентрации хлороводородной, азотной, серной и хлорной кислот (рис. 1).

В отсутствие кислот железо извлекается более чем на 99 %. Введение кислот приводит к постепенному падению степени извлечения. В случае серной кислоты до 60%, хлороводородной – до 75%, азотной – до 85%, в присутствии хлорной кислоты степень извлечения практически не меняется.

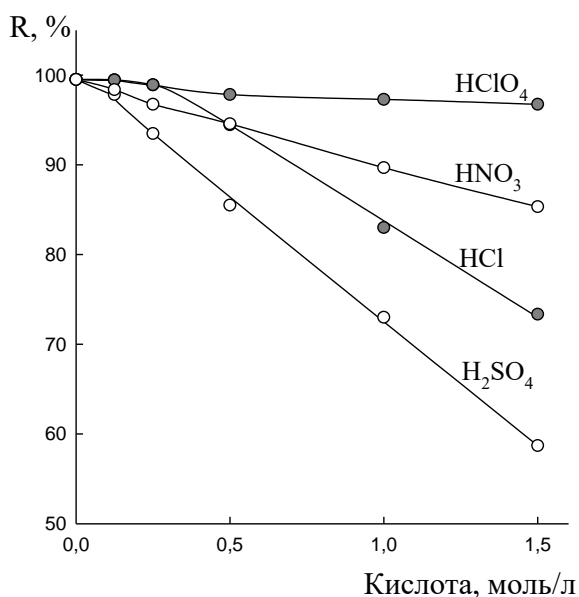
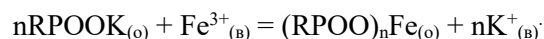
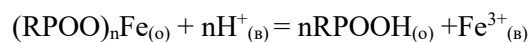


Рис. 1. Распределение 0,01 моль/л железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в присутствии неорганических кислот

В отсутствие кислот железо (III) образует хорошо извлекаемое малорастворимое координационное соединение с оксифосом Б. Вероятнее всего, железо (III) извлекается по катионообменному механизму, который может быть описан уравнением:



Введение кислоты приводит к увеличению конкуренции между ионами железа (III) и катиона водорода за оксифос Б, в результате чего наблюдается разрушение экстрагируемого комплекса и степень извлечения падает:



Природа кислоты оказывает существенное влияние на экстракцию. Так как серная кислота является двухосновной, то при равной концентрации всех кислот концентрация ионов водорода в растворах серной кислоты выше и, следовательно, она большей степени сказывается на извлечении железа (III). Для остальных кислот, определяющую роль играет устойчивость образующегося анионного комплекса катиона железа (III) и аниона кислоты – чем он более устойчив, тем быстрее падает извлечение.

Так как хлорид-ионы являются хорошими комплексообразователями для ионов железа (III), можно предположить, что в присутствии высоких концентраций хлороводородной кислоты возможно извлечение железа (III) по гидратно-сольватному механизму. Было изучено распределение 0,01 моль/л ионов железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в зависимости от содержания хлороводородной кислоты (рис. 2).

При содержании хлороводородной кислоты в экстракционной системе до 3,0 моль/л наблюдается падение степени извлечения, что указывает на то, что железо (III) извлекается по катионообменному механизму (как было описано ранее). Введение хлороводородной кислоты в концентрации более 3,5 моль/л степень извлечения начинает увеличиваться, при этом при концентрации хлороводородной кислоты

более 7,0 моль/л железа (III) извлекается количественно.

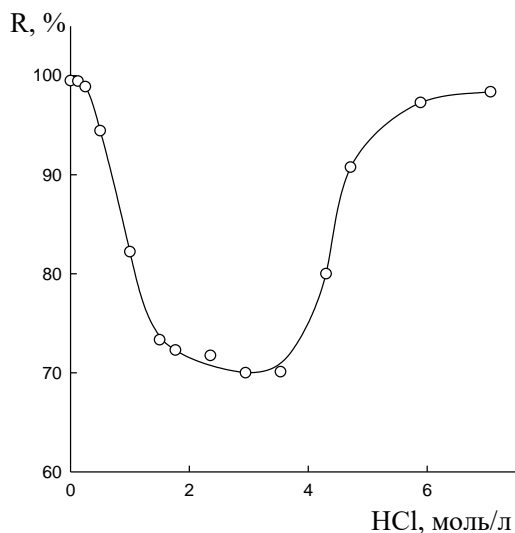
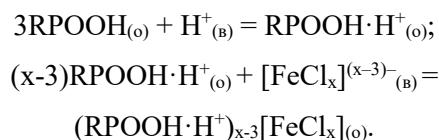


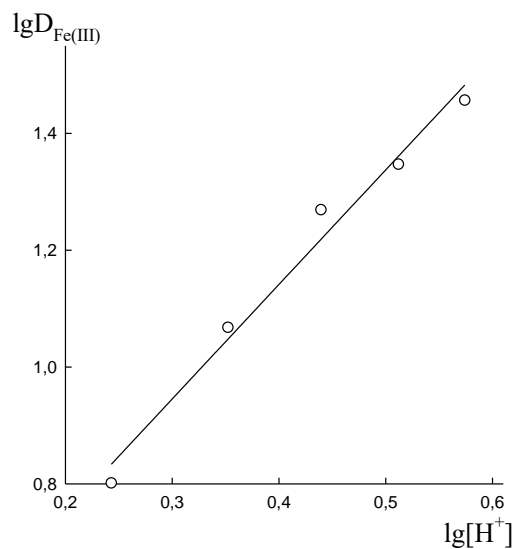
Рис. 2. Распределение 0,01 моль/л железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в присутствии хлороводородной кислоты

В присутствии кислот оксиэтиленовые фрагменты оксифоса Б способны взаимодействовать с ионами водорода (протонироваться), полученные катионные ПАВ могут извлекать железо (III) в виде галогенидных ацидокомплексов. Таким образом, при содержании хлороводородной кислоты более 3,5 моль/л возможна реализация гидратно-сольватного механизма экстракции, который может быть описан уравнениями:



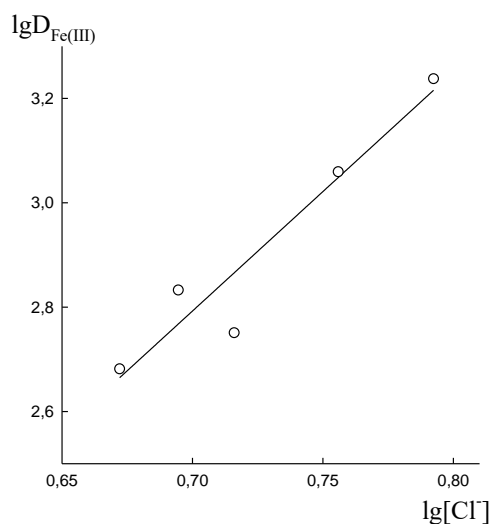
Железо (III) извлекается при этом в форме комплексной кислоты состава $\text{H}_{\text{x}-3}\text{FeCl}_x$, где $\text{x} = 4$ и более. С целью определения соотношения компонентов в извлекаемом соединении железа (III) использован метод билогарифмических зависимостей. Для определения соотношения катион водорода : железо в экстрагируемом соединении осуществляли экстракцию

0,01 моль/л железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в присутствии 4,7 моль/л хлороводородной кислоты и возрастающей концентрации серной кислоты. Таким образом, в экстракционной системе поддерживали постоянную концентрацию хлорид-ионов (4,7 моль/л) и переменную концентрацию ионов водорода.



$$\lg D = 1,916 \lg [\text{H}^+] + 0,356$$

а



$$\lg D = 4,579 \lg [\text{Cl}^-] - 0,413$$

б

Рис. 3. Определение соотношения Н : Fe (а) и Fe : Cl (б) при экстракции железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – HCl – вода

Полученные данные представленные в логарифмических координатах представлены на рис. 3а. Как видно из полученного уравнения, соотношение $N : Fe$ в извлекаемом соединении близко $2 : 1$.

Для определения соотношения хлорид-ион : железо в экстрагируемом соединении осуществляли экстракцию $0,01$ моль/л железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в присутствии $4,7$ моль/л хлороводородной кислоты и возрастающей концентрации хлорида натрия. Таким образом, в экстракционной системе поддерживали постоянную концентрацию ионов водорода ($4,7$ моль/л) и переменную концентрацию хлорид-ионов. Полученные данные представленные в логарифмических координатах представлены на рис. 3б. Как видно из полученного уравнения, соотношение $Cl : Fe$ в извлекаемом соединении близко $5 : 1$. Из полученных данных следует, что железо (III) извлекается в виде пентахлороферрата (III) водорода $H_2[FeCl_5]$.

Еще одним вариантом управления экстракционной способностью оксифоса Б является использование смесей серной кислоты и хлоридов металлов, что позволяет более точно контролировать концентрацию как ионов водорода, так и хлорид-ионов, что в конечном счете позволяет повысить селективность при разделении многокомпонентных смесей.

В системе сульфат аммония – оксифос Б – вода исследовано распределение $0,01$ моль/л ионов железа (III) в зависимости от концентрации хлорида натрия в присутствии $0,5$ моль/л серной кислоты (рис. 4). Вид кривой извлечения железа (III) подобен кривой, описанной ранее для экстракции железа (III) в присутствии хлороводородной кислоты. Однако, в данном

случае экстракция осуществляется при постоянной кислотности и возрастающей концентрации ионов-комплексобразователей – хлорид ионов. При содержании хлорид-ионов в системе менее $0,5$ моль/л извлечение железа (III) осуществляется по катионообменному механизму, степень извлечения при этом падает за счёт связывания железа (III) в анионные комплексы. При увеличении концентрации хлорида натрия в интервале от $0,5$ до 4 моль/л происходит постепенный рост степени извлечения, что может быть связано с извлечением железа (III) по гидратно-сольватному механизму.

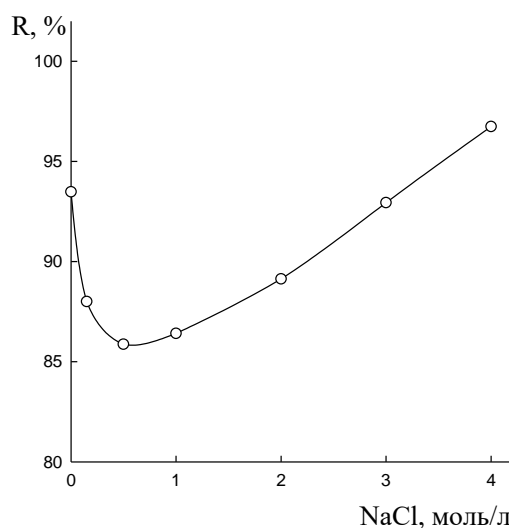


Рис. 4. Распределение $0,01$ моль/л железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в зависимости от содержания хлорида натрия:

$$C_{H_2SO_4} = 0,5 \text{ моль/л}$$

С целью определения соотношения компонентов в извлекаемом по гидратно-сольватному механизму соединении железа (III) использован метод билогарифмических зависимостей.

Для определения соотношения катион водорода : железо в экстрагируемом соединении осуществляли экстракцию $0,01$ моль/л железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в присутствии $1,0$ моль/л хлорида натрия и

возрастающем содержании серной кислоты. Таким образом, в экстракционной системе поддерживали постоянную концентрацию хлорид-ионов (1,0 моль/л) и переменную концентрацию ионов водорода. Полученные данные представленные в логарифмических координатах представлены на рис. 5а. Как видно из полученного уравнения, соотношение Н : Fe в извлекаемом соединении близко 2 : 1.

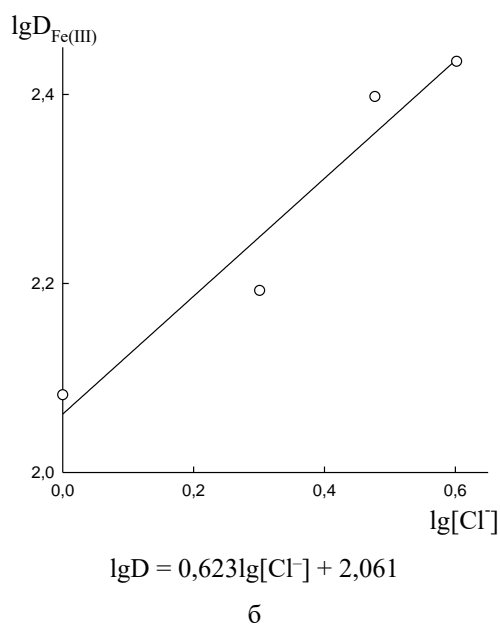
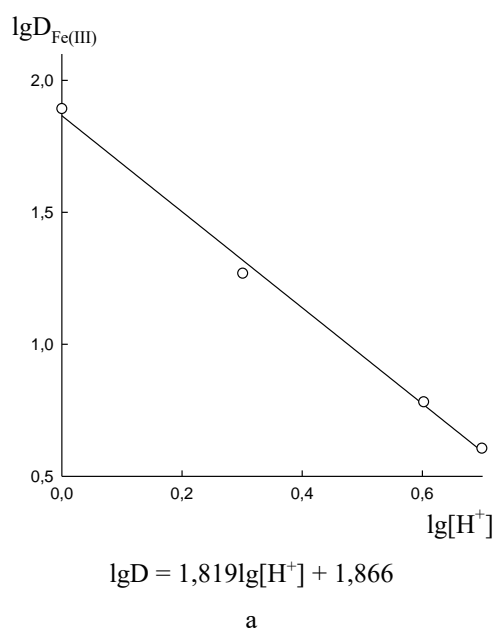


Рис. 4. Определение соотношения Н : Fe (а) и Fe : Cl (б) при экстракции железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в присутствии хлорида натрия

Для определения соотношения железо : хлорид-ион обрабатывали возрастающий участок кривой извлечения (рис. 4). Таким образом, в экстракционной системе поддерживали постоянную концентрацию ионов водорода (1,0 моль/л) и переменную концентрацию хлорид-ионов. Полученные данные представлены в логарифмических координатах представлены на рис. 5б. Как видно из полученного уравнения, соотношение Cl : Fe в извлекаемом соединении близко к 1 : 1.

Таким образом, соотношение Н : Fe : Cl в экстрагируемом соединении равно 2 : 1 : 0,6. Очевидно, в определенном подобным образом составе соединения наблюдается дефицит хлорид-ионов для образования анионного комплекса (или избыток железа (III) в расчете на хлорид-ионы), что может свидетельствовать об одновременной реализации как катионообменного, так и анионообменного механизмов экстракции.

Заключение

Изучение распределения железа (III) в системе сульфат аммония – оксифос Б – вода в присутствии неорганических кислот позволило установить, что при низкой кислотности железо (III) извлекается по катионообменному механизму, а при кислотности более 3,5 моль/л HCl железо (III) извлекается по гидратно-сольватному механизму в форме соединения $H_2[FeCl_5]$.

В качестве общего заключения следует отметить, что сложность экстракционных систем и сопутствующее влияние высаливающей способности вводимых кислот и солей усложняет применение классических методов исследования экстракционных равновесий.

Список источников

1. Исаева Ю.И., Елохов А.М., Денисова С.А., и др. Растворимость и экстракция ионов металлов в системах неорганическая кислота – хлорид алкилбензилдиметиламмония – вода // Журнал физической химии. 2019. Т. 93, №. 2. С. 220–224.
2. Кудряшова О.С., Бортник К.А., Чухланцева Е.Ю., и др. Растворимость в системах вода – катамин АБ – хлориды щелочных металлов или аммония // Журнал неорганической химии. 2013. Т. 58, №. 2. С. 290–290.
3. Altunay N., Gürkan R., Yıldırım E. A new ultrasound assisted-cloud point extraction method for the determination of trace levels of tin and antimony in food and beverages by flame atomic absorption spectrometry // Food analytical methods. 2016. V. 9, № 10. P. 2960–2971.
4. El-Hay S.S.A., Gouda A.A. Determination of thorium (IV) in real samples by spectrophotometry after micelle-mediated cloud point extraction // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2016. V. 310, № 1. P. 191–200.
5. Денисова С. А., Елохов А.М., Исаева Ю.И. и др. Экстракция тиоцианатных комплексов металлов в системах на основе бис (алкилполиоксиэтилен) фосфата калия и хлорида алкилбензилдиметиламмония // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. Т. 27. №. 4. С. 353–357.
6. Chen D., Zhang P., Mei Z. et al. Hexafluoroisopropanol-induced coacervation in aqueous mixed systems of cationic and anionic surfactants for the extraction of sulfonamides from water samples // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2014. V. 406. P. 6051–6060.
7. Santalad A., Srijaranai S., Burakham R. et al. Acid-induced cloud-point extraction coupled to spectrophotometry for the determination of carbaryl residues in waters and vegetables // Microchemical journal. 2008. V. 90. №. 1. P. 50–55.
8. Jia G., Li L., Qiu J. et al. Determination of carbaryl and its metabolite 1-naphthol in water samples by fluorescence spectrophotometer after anionic surfactant micelle-mediated extraction with sodium dodecylsulfate // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2007. V. 67. №. 2. P. 460–464.
9. Старова В.С., Куличенко С.А. Кислотно-индуцированные мицеллярные фазы додецилсульфата натрия для концентрирования органических субстратов. // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2008. Т. 52. №. 11. С. 74–78.
10. Денисова С. А., Останина Н.Н., Леснов А.Е. и др. Экстракционные возможности расслаивающейся системы вода – оксифос Б – сульфат натрия. Химия в интересах устойчивого развития. 2013. Т. 21. №. 5. С. 475-478.
11. Денисова С.А., Леснов А.Е., Кудряшова О.С. и др. Экстракция тиоцианатных комплексов металлов в расслаивающейся системе вода – калий бис(алкилполиоксиэтилен) фосфат – сульфат аммония // Журнал неорганической химии. 2015. Т. 60. №. 8. С. 1124–1124.
12. Yang X., Zhang S., Yu W. et al. Ionic liquid-anionic surfactant based aqueous two-phase extraction for determination of antibiotics in honey by high-performance liquid chromatography // Talanta. 2014. V. 124. P. 1–6.

13. Gong A., Zhu X. Surfactant/ionic liquid aqueous two-phase system extraction coupled with spectrofluorimetry for the determination of dutasteride in pharmaceutical formulation and biological samples // *Fluid Phase Equilibria*. 2014. V. 374. P. 70–78.

14. Елохов А.М., Леснов А.Е., Кудряшова О.С. Высаливание бис(алкилполиоксиэтилен)фосфата калия солями аммония как основа разработки процессов мицеллярной экстракции // *Журнал общей химии*. 2015. N.85, № 11. С. 1918–1924.

15. Кудряшова О.С., Мохнаткина Н.Н., Леснов А.Е. Фазовые равновесия в системах вода – сульфаты щелочных металлов или аммония – оксифос Б // *Журнал неорганической химии*. 2010. Т. 55, № 10. С. 1712–1714.

16. Денисова С.А., Свежов Д.А., Елохов А.М. Растворимость и экстракция ионов металлов в системах неорганическая кислота – бис (алкилполиоксиэтилен) фосфат калия – вода // *Журнал физической химии*. 2023. Т. 97, № 2. С. 241–246.

Информация об авторах

Александр Михайлович Елохов, кандидат химических наук, доцент, кафедра неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15), elhalex@yandex.ru.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила 11 ноября 2024 г.; принята к публикации 25 ноября 2024 г.

References

1. Isaeva, Y. I., Elokhov, A.M., Denisova, S.A., Kudryashova, O.S., and Lesnov, A.E. (2019) Solubility and extraction of metal ions in inorganic acid – alkylbenzyltrimethylammonium chloride – water systems, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, vol. 93, pp 255–259.

2. Kudryashova, O.S., Bortnik, K.A., Chukhlantseva, E.Y., Denisova, S.A., and Lesnov, A.E. (2013) Solubility in the water – Catamine AB – (alkali metal or ammonium chloride) systems, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 58, pp. 250–252.

3. Altunay, N., Gürkan, R. and Yıldırım, E. (2016) A new ultrasound assisted-cloud point extraction method for the determination of trace levels of tin and antimony in food and beverages by flame atomic absorption spectrometry, *Food Analytical Methods*, vol. 9, pp. 2960–2971.

4. El-Hay, S.S.A. and Gouda, A.A. (2016) Determination of thorium (IV) in real samples by spectrophotometry after micelle-mediated cloud point extraction, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 310, pp. 191–200.

5. Denisova, S.A., Elokhov, A.M., Isaeva, Yu.I. and Lesnov, A.E. (2019) Extraction of metal thiocyanate complexes in systems based on potassium bis (alkylpolyoxyethylene) phosphate and alkylbenzyltrimethylammonium chloride, *Chemistry for Sustainable Development*, vol. 27, no. 4, pp. 353–357.

6. Chen, D., Zhang, P., Li, Y., Mei, Z., & Xiao, Y. (2014). Hexafluoroisopropanol-induced coacervation in aqueous mixed systems of cationic and anionic surfactants for the extraction of sulfonamides in water samples. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 406, 6051–6060.

7. Santalad, A., Srijaranai, S., Burakham, R., Sakai, T. and Deming, R. L. (2008) Acid-induced cloud-point extraction coupled to spectrophotometry for the determination of carbaryl residues in waters and vegetables, *Microchemical journal*, vol. 90, no. 1, pp. 50–55.
8. Jia, G., Li, L., Qiu, J., Wang, X., Zhu, W., Sun, Y. and Zhou, Z. (2007) Determination of carbaryl and its metabolite 1-naphthol in water samples by fluorescence spectrophotometer after anionic surfactant micelle-mediated extraction with sodium dodecylsulfate, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 67, no. 2, pp. 460–464.
9. Starova, V.S. and Kulichenko, S.A. (2008) Acid-induced micellar phases of sodium dodecyl sulfate for concentrating organic substrates, *ChemChemTech*, vol. 52, no. 11, pp. 74–78. (in Russian).
10. Denisova, S.A., Ostanina, N.N., Lesnov A.E. and Kudryashova, O.S. (2013) Extraction capabilities of the stratifying system water – oxyphos B – sodium sulfate, *Chemistry for Sustainable Development*, vol. 21, no.5, pp. 475–478.
11. Denisova, S.A., Lesnov, A.E., Kudryashova, O.S. and Ostanina, N.N. (2015) Extraction of metal thiocyanate complexes in a water-potassium bis (alkylpolyoxyethylene) phosphate-ammonium sulfate segregating system, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 60, pp. 1022–1026.
12. Yang, X., Zhang, S., Yu, W., Liu, Z., Lei, L., Li, N., ... and Yu, Y. (2014) Ionic liquid-anionic surfactant based aqueous two-phase extraction for determination of antibiotics in honey by high-performance liquid chromatography, *Talanta*, vol. 124, pp. 1–6.
13. Gong, A. and Zhu, X. (2014) Surfactant/ionic liquid aqueous two-phase system extraction coupled with spectrofluorimetry for the determination of dutasteride in pharmaceutical formulation and biological samples, *Fluid Phase Equilibria*, vol. 374, pp. 70–78.
14. Elokhov, A.M., Lesnov, A.E. and Kudryashova, O.S. (2015) Salting Out Of Potassium Bis(Alkylpolyoxyethylene)Phosphate With Ammonium Salts As The Base Of Micellar Extraction Processes Development, *Russian Journal of General Chemistr.*, vol. 85, no. 11, pp. 2657–2662.
15. Kudryashova, O.S., Mokhnatkina, N.N., Lesnov, A.E. and Denisova, S. A. (2010) Phase equilibria in water – alkali metal (ammonium) sulfate – Oxifos B systems, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 55, pp. 1617–1619.
16. Denisova, S.A., Svezhov D.A. and Elokhov, A.M. (2023) Solubility and Extraction of Metal Ions in Inorganic Acid – Potassium Bis (alkylpolyoxyethylene) phosphate – Water Systems, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, vol. 97, no. 2, pp. 357–361.

Information about the authors

Aleksandr M. Elokhov, Candidate of Chemistry Sciences, Associate professor, Department of inorganic chemistry, chemical technology and technosphere safety, Perm State University (15, Bukirev st., Perm, Russia, 614068), elhalex@yandex.ru.

Conflicts of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Submitted 11 November 2024; accepted 25 November 2024