



УДК 546.723: 54-414

Извлечение кобальта, европия, церия, стронция и меди частицами Fe_2O_3 и Fe_3O_4 из водных растворов

Однoволова А.М.¹, Софронов Д.С.¹, Брылева Е.Ю.¹, Баумер В.Н.¹,
Матейченко П.В.², Десенко С.М.¹, Беда А.А.³

¹ ГНУ НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков

² «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков

³ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, Киев

Поступила в редакцию 15.12.2014 г.

Исследовано извлечение кобальта, европия, церия и меди частицами оксидов железа Fe_2O_3 ($S_{\text{уд}} 150 \text{ м}^2/\text{г}$) и Fe_3O_4 ($S_{\text{уд}} 130 \text{ м}^2/\text{г}$). Показано, что частицы оксидов железа способны полностью (95-97%) извлекать медь, европий и церий в интервале pH 5-9 из водных растворов. Сорбционная емкость Fe_2O_3 при pH 5 по отношению к европию, церию и меди составляет 21.3, 9.2 и 15.7 мг/г соответственно; а для частиц Fe_3O_4 – 19.7, 7.5 и 11.6 мг/г, соответственно.

Ключевые слова: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , извлечение, наночастицы.

Removal of cobalt, europium, cerium, strontium and copper by Fe_2O_3 and Fe_3O_4 particles from aqueous solutions

Odnovolova A.M.¹, Sofronov D.S.¹, Bryleva E.Yu.¹, Baumer V.N.¹,
Mateichenko P.V.², Desenko S.M.¹, Beda A.A.³

¹ SSI «Institute for single crystals» NAS of Ukraine, Kharkiv

² «Institute for single crystals» NAS of Ukraine, Kharkiv

³ Taras Shevchenko Kiev National University, Kiev

Fe_2O_3 and Fe_3O_4 oxides are promising materials for removal of heavy metals and radionuclides from water. The purpose of this paper is to study the influence of pH on efficiency of metal removal and to determine the sorption capacity of Fe_2O_3 and Fe_3O_4 with respect to cerium, europium, and copper. Fe_2O_3 particles were obtained by thermal annealing (450°C) of preliminary precipitated iron (III) hydroxide from iron salts at pH 9; Fe_3O_4 particles were obtained by precipitation of iron hydroxides from FeCl_3 and FeSO_4 in the ratio 2:1 at pH 9. The values of specific surface area were 150 m^2/g and 130 m^2/g for Fe_2O_3 and Fe_3O_4 , respectively. It was established that iron oxide particles remove europium, cerium, and copper most effectively (the extent of removal 92-97%) in the pH range 4-9. The efficiency of removal of cobalt and strontium grows with increasing pH and reaches maximum values at pH 9. Obtained oxides are characterized by the following values of the sorption capacity at pH 5: europium 21.3 mg/g, cerium 9.2 mg/g, copper 15.7 mg/g – for Fe_2O_3 ; europium 19.7 mg/g, cerium 7.5 mg/g, copper 11.6 mg/g – for Fe_3O_4 .

Keywords: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , metal ion removal, nanoparticles.

Введение

Сорбционные процессы широко используются для очистки водных объектов от ионов тяжелых металлов и радионуклидов [1, 2]. В качестве сорбентов применяются различные материалы, выбор которых обусловлен целым рядом факторов: эффективностью извлечения, химической стойкостью, стоимостью, возможностью регенерации и др. [1-4]. Известно, что сорбционные свойства в значительной мере зависят от морфологических характеристик материала. Поэтому значительное внимание уделяется разработке мелкодисперсных сорбционных систем, особенностью которых является большое соотношение между площадью поверхности и объемом, что позволяет значительно повысить их сорбционную емкость [5,6].

Частицы оксидов железа Fe_2O_3 и Fe_3O_4 являются одними из наиболее перспективных неорганических материалов для извлечения ионов тяжелых металлов и радионуклидов из водных объектов [2-9]. Их преимущество перед другими соединениями заключается в отсутствии токсического влияния на организм человека, дешевизне прекурсоров и простоте получения [10]. Частицы Fe_2O_3 и Fe_3O_4 характеризуются относительно невысокими значениями сорбционной емкости по отношению к ионам тяжелых металлов. Так, сорбционная емкость для частиц Fe_3O_4 по отношению к кобальту и стронцию, составляет 0.25 мг/г (рН 7) и 0.69 мг/г (рН 7) соответственно [11]. Ранее для частиц Fe_2O_3 при рН 7 была получена величина сорбционной емкости 33.5 мг/г, по отношению к меди [7]. Авторами работы [12] также был исследован процесс извлечения ионов меди. Согласно этим данным, сорбционная емкость материала на основе Fe_2O_3 составляет 10.58 мг/г при рН 6.

Несмотря на то, что сорбционные свойства оксидов железа достаточно широко изучены, в литературе встречаются противоречивые данные по эффективности извлечения. Так, было установлено, что частицы Fe_3O_4 эффективно извлекают ионы меди из водных растворов в интервале рН 2-2.5 [13]. По данным работы [14], медь в кислой среде не сорбируется, а степень извлечения 50% достигается только при рН 7. В работе [15] параметр pH_{50} для ионов меди составляет 5.5. Также вызывает интерес изучение возможности использования оксидов железа для извлечения из водных растворов кобальта, европия и церия, обладающих радиоактивными изотопами. Однако обнаружить литературные данные по сорбционной емкости оксидов железа по отношению к церию и европию не удалось.

Таким образом, целью данной работы является изучение влияния рН на эффективность извлечения металлов из водных растворов, а также определение сорбционной емкости частиц Fe_2O_3 и Fe_3O_4 по отношению к церию, европию и меди.

Эксперимент

Для синтеза использовали железную стружку, 25% водный раствор аммиака, азотную кислоту (36.46 г/моль, пл. 1.513 г/см³), $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$, NH_4Cl , Eu_2O_3 , CeO_2 фирмы Reachim. Квалификация всех реагентов – х.ч. Все растворы готовились на дистиллированной воде. Для приготовления стандартных растворов использовали следующие стандарты: Co^{2+} - 1 мг/см³, ДСЗУ 022.78-98; Cu^{2+} - 1 мг/см³, ДСЗУ 022.47-96; Sr^{2+} - 1 мг/см³, ДСЗУ 022.18-96.

Стандартный раствор Eu^{3+} готовили следующим образом: навеску порошка Eu_2O_3 , предварительно прокаленного до постоянной массы при 700 °С, массой 0.2219 г растворяли в азотной кислоте, затем доводили до 100 мл дистиллированной

водой. Стандартный раствор Ce^{3+} готовили растворением навески CeO_2 массой 0.1230 г в 10 мл смеси азотной кислоты с пероксидом водорода и после полного растворения доводили до метки 100 мл дистиллированной водой.

Синтез частиц Fe_2O_3 осуществляли из нитратных растворов по следующей методике: 0.7 г железной стружки растворяли в 5 мл азотной кислоты. После полного растворения металла к образовавшемуся раствору приливали 60 мл дистиллированной воды и 10 мл 25% водного раствора аммиака при постоянном перемешивании на магнитной мешалке. Полученный осадок отфильтровывали, промывали несколько раз дистиллированной водой и сушили на воздухе в течение 24 часов, а затем прокаливали при 450-500 °С в течение 1 часа.

Синтез частиц Fe_3O_4 проводили осаждением из водного раствора по известной методике [12]: 5.99 г $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и 10.79 г $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ растворили в 40 мл дистиллированной воды. Полученный раствор нагревали до 60 °С и добавляли 10 мл 25% водного раствора аммиака при постоянном перемешивании на магнитной мешалке. Полученный осадок отфильтровывали и промывали дистиллированной водой. Затем сушили на воздухе в течение 24 часов.

Сорбцию проводили из модельных растворов, содержащих ионы металлов. Концентрация металла в исходном растворе составляла 1 мг/л. Эксперименты проводили по следующей схеме. В стакан объемом 100 мл приливали 50 мл модельного раствора и устанавливали рН раствора добавлением азотной кислоты или водного раствора аммиака до заданного значения в пределах от 3 до 9. Затем добавляли 0.1 г сорбента и выдерживали при перемешивании в течение 40 минут. В процессе сорбции каждые 10 минут проводили измерение рН и в случае отклонения более 0.1 единицы рН, проводилась соответствующая корректировка до заданного значения. После сорбции сорбент отфильтровывали и определяли содержание металлов в фильтрате.

Для построения изотерм сорбцию на частицах Fe_2O_3 и Fe_3O_4 проводили из однокомпонентных растворов при рН 5, варьируя концентрацию меди, европия и церия в пределах 1-200 мг/л. В стакан объемом 100 мл приливали 50 мл модельного раствора и устанавливали рН 5 добавлением азотной кислоты или водного раствора аммиака. Затем добавляли 0.1 г сорбента и выдерживали при перемешивании в течение 40 минут. В процессе сорбции каждые 10 минут проводили измерение рН и в случае отклонения более 0.1 единицы рН, проводилась соответствующая корректировка до заданного значения. После сорбции сорбент отфильтровывали и определяли содержание металлов в фильтрате.

ИК спектры получены в таблетках KBr на Фурье ИК-спектрофотометре SPECTRUM ONE (PerkinElmer). Рентгенофазовый анализ порошков проводился на порошковом дифрактометре Siemens D500 в медном излучении с графитовым монохроматором на вторичном пучке. Полнопрофильные рентгенограммы измерены в интервале углов $10 < 2\theta < 90^\circ$ с шагом 0.02 и временем накопления 10 секунд в каждой точке. Исследование морфологии поверхности полученных порошков проводили с использованием сканирующего микроскопа (SEM) JSM-6390LV. рН измеряли с помощью рН-метра-милливольтметра рН-150 со стеклянным электродом ЭСЛ-43-11 и хлорсеребряным электродом ЭВЛ1МЗ сравнения. Определение концентрации металлов до и после сорбции проводили на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой TRACE SCAN Advantage фирмы Thermo Jarrell Ash (США). Величину удельной поверхности определяли по BET на сорбтометре.

Обсуждение результатов

Получение частиц оксидов железа. В результате синтеза получены черные порошки. Рентгеноструктурный анализ образца Fe_2O_3 показал, что после отжига при 450°C формируется фаза $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематит), что хорошо согласуется с литературными данными [10, 16]. В отличие от образцов Fe_2O_3 , образцы Fe_3O_4 , по данным рентгеноструктурного анализа, являлись многофазными и содержали: магнетит (Fe_3O_4) – 70%, маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) – 25% и гетит (FeOOH) – 5%. Присутствие примесных фаз маггемита и гетита в образцах Fe_3O_4 связано с процессами старения и характерно для порошков, полученных из водных растворов [17].

Микрофотографии полученных частиц представлены на рис. 1. Порошок Fe_2O_3 сформирован крупными бесформенными агломератами с размерами от нескольких десятков до нескольких сотен микрон, состоящими из мелких частиц субмикронного размера (рис. 1а). В отличие от Fe_2O_3 , в Fe_3O_4 не наблюдается образования крупных агломератов, а порошок состоит из сферических с размерами от 0.5 мкм до нескольких микрон (рис. 1б). Величина удельной поверхности для Fe_2O_3 составила $150 \text{ м}^2/\text{г}$, а для Fe_3O_4 – $130 \text{ м}^2/\text{г}$.

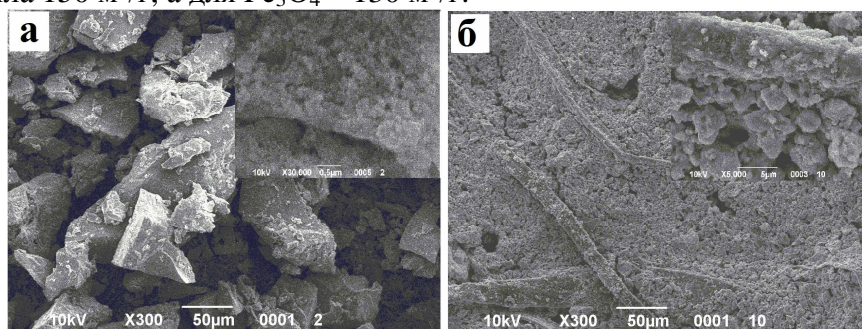


Рис. 1. Микрофотографии частиц Fe_2O_3 (а) и Fe_3O_4 (б), синтезированных из водных растворов

На рис. 2 приведены ИК-спектры синтезированных образцов. В спектрах наблюдается интенсивная полоса поглощения в области $500\text{-}1000 \text{ см}^{-1}$ с максимумами при 525 см^{-1} (рис. 2а) и 575 см^{-1} (рис. 2б), связанными с колебаниями связи Fe-O в оксидах Fe_2O_3 и Fe_3O_4 соответственно [18, 19].

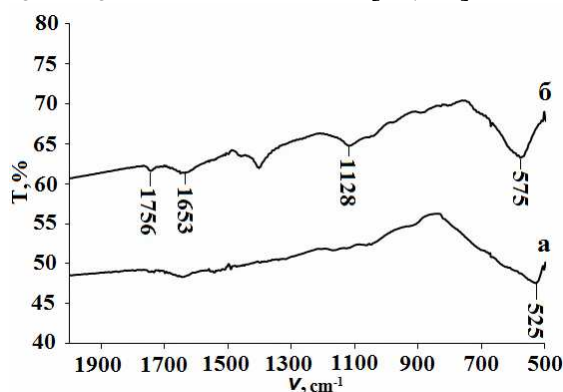


Рис. 2. ИК-спектры частиц Fe_2O_3 (а) и Fe_3O_4 (б), синтезированных из водных растворов

Кроме того, наблюдается полоса поглощения в области $1600\text{-}1680 \text{ см}^{-1}$ с максимумом при 1653 см^{-1} , соответствующая деформационным колебаниям молекул

воды, адсорбированных на поверхности частиц [18]. На рис. 2б также присутствует полоса поглощения при 1128 см^{-1} . Наличие в ИК спектре полосы 1128 см^{-1} связано с колебаниями иона SO_4^{2-} [20], присутствие которого обусловлено использованием сульфата железа в качестве прекурсора для синтеза порошка Fe_3O_4 .

Синтезированные образцы Fe_2O_3 и Fe_3O_4 использовали для изучения сорбционных свойств.

Эффективность извлечения металлов частицами Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . На рис. 3 приведена зависимость степени извлечения металлов от pH частицами Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . Как видно из рис. 3 а, б, частицы оксидов железа эффективно извлекают европий (97%), церий (97%) и медь (92%). Однако в кислой среде использование частиц Fe_2O_3 в качестве сорбентов позволяют достичь больших степеней извлечения указанных металлов по сравнению с частицами Fe_3O_4 . При этом максимум извлечения для Fe_2O_3 наблюдается уже при pH 5.5, а для Fe_3O_4 оптимальным является pH 6.5. Эффективность извлечения кобальта и стронция возрастает при увеличении pH и достигает максимальных значений при pH 9. При этом наибольшая эффективность извлечения наблюдается на частицах Fe_3O_4 и составляет 95% для кобальта и 68% для стронция. Кроме того, для стронция в интервале pH 4-7 наблюдается дополнительный максимум зависимости степени извлечения в диапазоне pH 5.2-5.7, который в большей степени проявляется на частицах Fe_2O_3 (рис. 3 а). В случае использования NaOH вместо водного раствора аммиака для корректировки pH раствора наблюдается аналогичная зависимость степени извлечения от pH (рис 3 в, г). Однако при использовании NaOH дополнительного максимума для стронция в диапазоне pH 4-7 не наблюдается.

Немаловажной характеристикой сорбционного материала является его химическая устойчивость. На рис. 4 приведена зависимость выщелачивания железа из изучаемых сорбентов в зависимости от pH среды. Известно, что Fe_3O_4 лучше растворяется в кислой среде, чем Fe_2O_3 . Как показали результаты измерений, концентрация железа в растворах после сорбции для обоих оксидов при pH 5 не превышает ПДК $_{\text{Fe}^{3+}}$ (0.3 мг/л для питьевых вод, ГОСТ 2874-82). Таким образом, частицы оксидов железа могут быть использованы для извлечения металлов при pH выше 5.

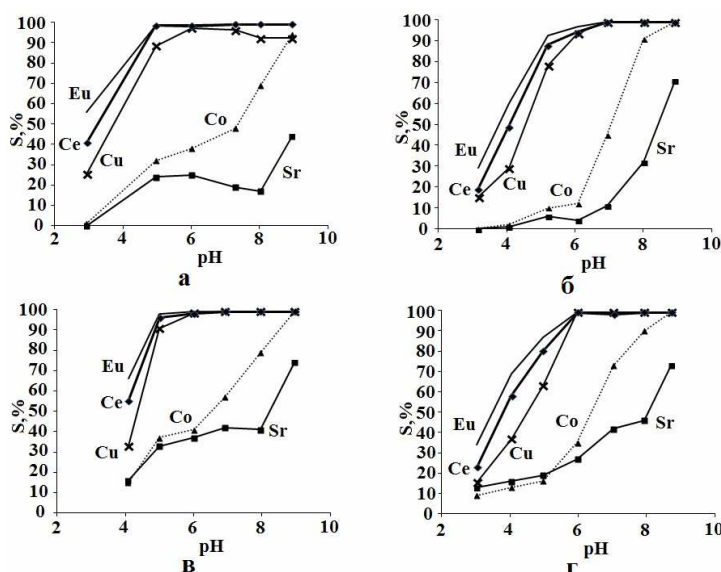


Рис. 3. Зависимость степени извлечения металлов от pH частицами Fe_2O_3 (а, в) и Fe_3O_4 (б, г) при использовании 25% водного раствора аммиака (а, б) и 0.1 М раствора NaOH (в, г) для создания pH раствора.

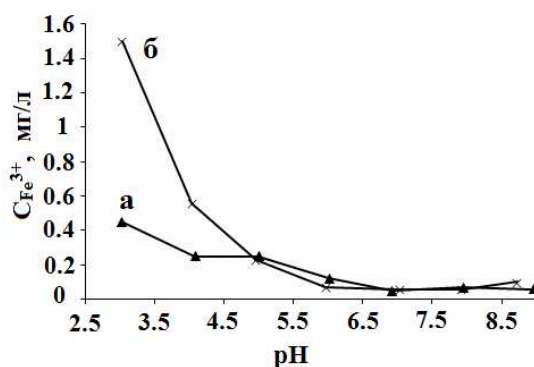


Рис. 4. Зависимость концентрации железа в растворе после контакта с частицами Fe_2O_3 (а) и Fe_3O_4 (б) от pH

Изотермы сорбции. Сорбционная емкость является одним из ключевых критериев эффективности сорбционного материала. С целью ее определения были построены изотермы сорбции, различные участки которых описали при помощи уравнения Ленгмюра. В качестве объектов исследования были выбраны европий, церий и медь поскольку для этих элементов эффективность извлечения исследуемыми частицами максимальна. На рис. 5 представлены изотермы адсорбции для изучаемых металлов. Изотермы относятся к S-типу для европия и меди, и к L-типу для церия. Такой вид изотерм свидетельствует о неоднородности поверхности сорбента. Выход на плато является характерным для образования монослоя. При концентрациях выше 90 мг/л для $\text{Eu}(\text{III})$ и 70 мг/л для $\text{Cu}(\text{II})$ избыточная адсорбция связана уже с другим, более сложным механизмом [21].

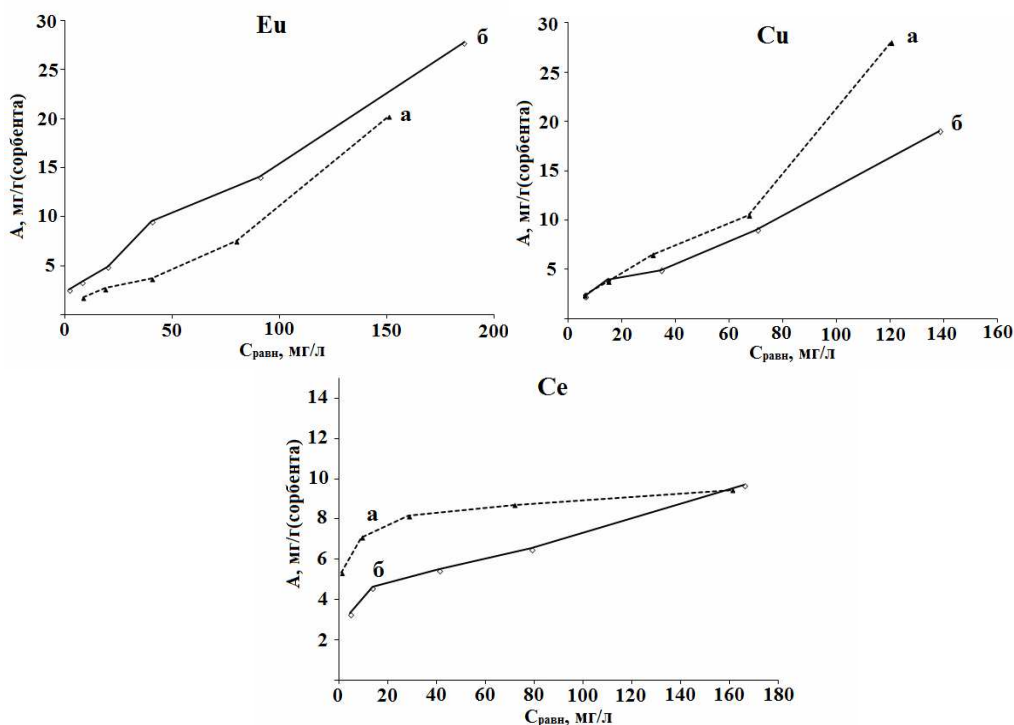


Рис. 5. Изотермы сорбции европия, меди и церия по теории Ленгмюра на частицах: а – Fe_2O_3 ; б – Fe_3O_4 .

Таблица. Параметры изотерм сорбции европия, церия и меди частицами Fe_2O_3 и Fe_3O_4 .

Металл	Fe_2O_3			Fe_3O_4		
	K	A_∞ , мг/г	R^2 , %	K	A_∞ , мг/г	R^2 , %
Eu	0.007	21.3	89.85	0.024	19.7	92.97
Ce	0.346	9.2	94.83	0.162	7.5	90.52
Cu	0.029	15.7	94.12	0.039	11.6	93.57

Результаты расчета по методу Ленгмюра (предельная адсорбция (A_∞), константа Ленгмюра (K), коэффициент корреляции (R^2)) представлены в таблице. Как видно из полученных данных, величина сорбционной емкости частиц Fe_2O_3 с удельной поверхностью $150 \text{ м}^2/\text{г}$ для всех исследуемых металлов выше, чем для сорбентов на основе Fe_3O_4 с удельной поверхностью $130 \text{ м}^2/\text{г}$. Наибольшая сорбционная емкость наблюдается для европия – 21.3 и 19.7 мг/г на частицах Fe_2O_3 и Fe_3O_4 соответственно, а наименьшая – для церия на частицах Fe_2O_3 (9.2 мг/г) и на частицах Fe_3O_4 (7.5 мг/г).

Константа уравнения Ленгмюра (K) показывает, что для сорбента Fe_3O_4 сродство к европию и меди выше, чем для сорбента Fe_2O_3 , а сродство к церию наоборот.

Заключение

Исследован процесс извлечения кобальта, европия, церия и меди синтетическими оксидами железа Fe_2O_3 ($S_{\text{уд}} 150 \text{ м}^2/\text{г}$) и Fe_3O_4 ($S_{\text{уд}} 130 \text{ м}^2/\text{г}$). Установлено, что наиболее эффективно (степень извлечения 92-97%) частицы оксидов железа извлекают европий, церий и медь при pH 4-9. Эффективность извлечения кобальта и стронция возрастает при увеличении pH и достигает максимальных значений при pH 9.

Полученные оксиды характеризуется следующими значениями сорбционной емкости при pH 5: для Fe_2O_3 европий – 21.3 мг/г, церий – 9.2 мг/г, медь, – 15.7 мг/г; для Fe_3O_4 европий – 19.7 мг/г, церий – 7.5 мг/г, медь, - 11.6 мг/г.

Список литературы

1. Мясоедова Г.В., Никашина В.А. // Рос. хим. ж. 2006. Т.1, № 5. С. 55-63.
2. Ambashta Ritu D., Sillanpaa Mika. // Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol.180, pp. 38-49.
3. Красноперова А.П., Беликов К.Н., Софронов Д.С. и др. // Методы и объекты химического анализа. 2013. Т. 8, № 4. С. 194-198.
4. Софронов Д.С., Беликов К.Н., Камнева Н.Н. и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14, Вып. 1. С. 159-165.
5. Lujaniene G., Meleshevych S., Kanibolotsky V. // Lithuanian Journal of Physics. 2008. Vol. 48, No 1. pp. 107-114.
6. Lujaniene G., Meleshevych S., Kanibolotsky V. // J Radioanal Nucl Chem. 2009. Vol. 282. No 3. pp. 787-791.
7. White Brianna R., Stackhouse Brandon T., Holcombe James A. // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 161. pp. 848-853.
8. Cowan Ch.E., Zachara J.M., Resch Ch.T. // Environ. Sci. Technol. 1991. Vol. 25. pp. 437-446.
9. Powell B.A., Fjeld R.A., Kaplan D.I et al. // Environ. Sci. Technol. 2004. Vol. 38, No 22. pp. 6016-6024.
10. Mohapatra M., Anand S. // International Journal of Engineering, Science and Technology. 2010. Vol. 2, No 8. pp. 127-146.

11. Ebner A.D., Ritter J.A., Navratil J.D. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2001. Vol. 40, No 7. pp. 1615-1623.
12. Huang Yao-Hui, Hsueh Chan-Li, Cheng Hui-Pin et al. // *Journal of Hazardous Materials.* 2007. Vol. 144. pp. 406-411.
13. Shen Y.F., Tang J., Nie Z.H. et al. // *Separation and Purification Technology.* 2009. Vol. 68. pp. 312-319.
14. Mahdavi Sh., Jalali M., Afkhami A. // *J Nanopart Res.* 2012. Vol. 14. pp. 846-864.
15. Davis J.A., Lecke J.O. // *Journal of Colloid and Interface Science.* 1978. Vol. 67, No 1. pp. 90-107.
16. Bang Jin Ho, Suslick K.S. // *J. Am. Chem. Soc.* 2007. Vol. 129, No 8. pp. 2242-2243.
17. Wei Wu., Quanguo He., Changzhong Jiang. // *Nanoscale Res. Lett.* 2008. Vol. 3. pp. 397-415.
18. Odnovolova A.M., Sofronov D.S., Mateichenko P.V. et al. // *Russian Journal of Applied Chemistry.* 2014. Vol. 87, No 8. pp. 1060-1064.
19. Zhihui Ai, Ying Cheng, Lizhi Zhang, Jianrong Qiu. // *Environ. Sci. Technol.* 2008. Vol. 42, No 18. pp. 6955-6960.
20. Saha J.K., Podder J. // *Journal of Bangladesh Academy of Sciences.* 2011. Vol. 35, No 2. pp. 203-210.
21. Park S.W., Huang C.P. // *Journal of Colloid and Interface Science.* 1989. Vol. 128, No 1. pp. 245-257.

References

1. Myasoedova G.V., Nikashina V.A., *Ros. khim. zh.*, 2006, Vol.1, No 5, pp. 55-63.
2. Ambashta R.D., Sillanpaa M., *Journal of Hazardous Materials*, 2010, Vol.180, pp. 38-49.
3. Krasnoperova A.P., Belikov K.N., Sofronov D.S. et al., *Metody i ob"ekty khimicheskogo analiza*, 2013, Vol. 8, No 4, pp. 194-198.
4. Sofronov D.S., Belikov K.N., Kamneva N.N. et al., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2014, vol.14, No 1, pp. 159-165.
5. Lujaniene G., Meleshevych S., Kanibolotsky V., *Lithuanian Journal of Physics*, 2008, Vol. 48, No 1, pp. 107-114.
6. Lujaniene G., Meleshevych S., Kanibolotsky V., *J Radioanal Nucl Chem.*, 2009, Vol. 282, No 3, pp. 787-791.
7. White B.R., Stackhouse B.T., Holcombe J.A., *Journal of Hazardous Materials*, 2009, Vol.161, pp. 848-853.
8. Cowan Ch.E., Zachara J.M., Resch Ch. T., *Environ. Sci. Technol.*, 1991, Vol.25, pp. 437-446.
9. Powell B.A., Fjeld R.A., Kaplan D.I. et al., *Environ. Sci. Technol.*, 2004, Vol.38, No 22, pp. 6016-6024.
10. Mohapatra M. Anand S., *International Journal of Engineering, Science and Technology.*, 2010, Vol. 2, No 8. pp. 127-146.
11. Ebner A.D., Ritter J.A., Navratil J.D., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2001, Vol. 40, No 7, pp. 1615-1623.
12. Huang Yao-Hui, Hsueh Chan-Li, Cheng Hui-Pin et al., *Journal of Hazardous Materials.*, 2007, Vol.144, pp. 406-411.
13. Shen Y.F., Tang J., Nie Z.H. et al., *Separation and Purification Technology.*, 2009, Vol. 68, pp. 312-319.
14. Mahdavi Sh., Jalali M., Afkhami A., *J Nanopart Res.*, 2012, Vol.14, pp. 846-864.
15. Davis J.A., Lecke J.O., *Journal of Colloid and Interface Science*, 1978, Vol. 67, No 1, pp. 90-107.
16. Bang Jin Ho, Suslick Kenneth S., *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, Vol. 129, No 8, pp. 2242-2243.
17. Wei Wu., Quanguo He., Changzhong Jiang, *Nanoscale Res. Lett.*, 2008, Vol. 3, pp. 397-415.
18. Odnovolova A.M., Sofronov D.S., Mateichenko P.V. et al., *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, Vol. 87, No 8, pp. 1060-1064.
19. Zhihui Ai, Ying Cheng, Lizhi Zhang, Jianrong Qiu, *Environ. Sci. Technol.*, 2008, Vol. 42, No 18, pp. 6955-6960.
20. Saha J.K., Podder J., *Journal of Bangladesh Academy of Sciences*, 2011, Vol. 35, No 2, pp. 203-210.
21. Park S.W., Huang C.P., *Journal of Colloid and Interface Science*, 1989, Vol. 128, No 1, pp. 245-257.

Одноволова Александра Михайловна – аспирант, ГНУ НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков, тел. +38(093)26-27-507

Софронов Дмитрий Семенович – к.х.н., н.с., ГНУ «НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков

Брылёва Екатерина Юрьевна – к.х.н., и.о. с.н.с., ГНУ «НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков

Баумер Вячеслав Николаевич – с.н.с., ГНУ «НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков

Матейченко Павел Викторович – н.с., «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков

Десенко Сергей Михайлович – д.х.н., проф., ГНУ «НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков

Беда Александр Андреевич – м.н.с., Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, Киев

Odnovolova Alexandra M. – PhD student of the Institute for Single Crystals, Kharkov, e-mail: sashka-2012@mail.ru

Sofronov Dmitry S. – Ph.D. in chemistry, scientific associate, SSI «Institute for single crystals» NAS of Ukraine, Kharkiv

Bryleva Ekaterina Yu. – Ph.D. in chemistry. Senior researcher, SSI «Institute for single crystals» NAS of Ukraine, Kharkiv

Baumer Vyacheslav N. – Senior researcher, SSI «Institute for single crystals» NAS of Ukraine, Kharkiv

Mateichenko Pavel V. – Scientific associate, «Institute for single crystals» NAS of Ukraine, Kharkiv

Desenko Sergij M. – Doctor of Science, Professor, SSI «Institute for single crystals» NAS of Ukraine, Kharkiv

Beda Alexander A. – Scientific associate, Taras Shevchenko Kiev National University, Kiev