

УДК 544.723:546.732,766: 547-304.2

Н. В. Жданюк

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра хімічної технології кераміки та скла, Пр. Перемоги, 8, Київ, 03056, Україна
e-mail: zhdanyukn.kpi@gmail.com

АДСОРБЦІЯ ІОНІВ Cr (VI) ТА Co (II) ПАЛИГОРСЬКІТОМ, МОДИФІКОВАНИМ КАТІОННИМИ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ

Досліджено вплив алкіламонійних солей з різною довжиною алкільного радикалу на флокуляцію суспензій органопалигорськиту та адсорбційні властивості отриманих композитів. Доведено, що при збільшенні довжини гідрофобної частини поверхнево-активної речовини, взятої для синтезу композитів на основі шарувато-стрічкових силікатів, зростає адсорбція аніонів важких металів. Обґрунтовано використання гексадецилтриметиламоній броміду в якості модифікатора глинистих мінералів.

Ключові слова: палигорськит, адсорбція, хром, кобальт, поверхнево-активні речовини.

ВСТУП

Природні силікати широко застосовуються у якості сорбентів для вилучення катіонів важких металів, так як поверхня мінералів заряджена негативно. Але вилучення аніонних форм важких металів та радіонуклідів за їх допомогою практично неможливе.

Тому процес зміни поверхні природних силікатів, з метою отримання матеріалів з новими властивостями, викликає науковий та практичний інтерес. Одним із способів підвищення сорбційних властивостей глинистих мінералів є модифікація їх поверхні катіонними поверхнево-активними речовинами (ПАР) [1]. Даний метод дає можливість спрямовано змінювати ліофільність та заряд поверхні силікатів і таким чином, підвищувати їх сорбційну здатність щодо аніонів, у тому числі хроматів і біхроматів [2].

В залежності від довжини ланцюга катіонної ПАР та ступеня модифікації поверхні силікату, можна отримати нові композити, що відрізняються за своєю будовою та поверхневими властивостями.

Дослідження літературних джерел показало, що вивчення сорбції катіонних ПАР на глинистих мінералах було зосереджене на шаруватих силікатах, а саме на монтморилоніті [3] та вермикуліті [4]. На їх основі були синтезовані органоглини з високою спорідненістю до аніонів, які успішно використовувалися в якості сорбентів для вилучення сполук важких металів і радіонуклідів.

Під час модифікування поверхні силікату амонійні групи катіонного ПАР електростатично притягуються до негативно зарядженої поверхні глинистого мінералу, а алкільні ланцюги орієнтуються від поверхні [5]. Таким чином, катіонні ПАР займають катіонообмінні позиції на поверхні мінералу. Збільшення кількості ПАР дає можливість отримати на поверхні силікату щільний моношар з її молекул. При внесенні ПАР з алкільним радикалом, що містить від 12 до 18 груп (-CH₂) понад еквівалентну кількість, на поверхні мінералу утворюється бішарове або

мозаїчне покриття. Формування таких структур можливе за рахунок взаємодії між вуглеводневими радикалами молекул ПАР [4]. При модифікуванні смектитів можна отримати композити з псевдо-тришаровою структурою [6]. При модифікації монтморилоніту коротколанцюговими катіонними ПАР на поверхні силікату утворюється тільки моношар із молекул ПАР [7]. У роботі [8] описано синтез органіцеоліту, для модифікації якого використано гексадецилтриметиламоній бромід (ГДТМА). Синтезовані матеріали мали спорідненість до аніонів Cr(VI).

Властивості органопалигорскітів вивчено недостатньо. У роботі [9] підтверджено здатність палигорськіту сорбувати катіонні ПАР та утворювати композити, які здатні вилучати аніонні форми неорганічних сполук, у тому числі, хромати і дихромати.

Проте в оглянутих публікаціях до цього часу не було систематизовано та комплексно вивчено структуру поверхні органопалигорскітів, отриманих модифікуванням алкіламонійними солями з різною довжиною їх ланцюгів. А також не досліджено адсорбційні властивості відносно аніонів та катіонів важких металів.

Основною метою даної роботи було вивчення впливу катіонних ПАР з різною довжиною алкільного радикалу на флокуляцію суспензій органопалигорськіту та адсорбційні властивості отриманих композитів.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі:

- дослідження флокуляції дисперсій органоглин;
- вивчення впливу ступеня модифікації палигорськіту катіонними ПАР на сорбцію катіонів та аніонів важких металів на прикладі Cr (VI) та Co (II).

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості об'єкту дослідження був вибраний палигорськіт $(Mg_5(H_2O)_4(OH)_2[Si_4O_{10}] \cdot 4H_2O)$ [10] Черкаського родовища (Україна), з катіонною обмінною ємністю (КОЄ) 0,25 ммоль/г [11]. Мінерал за своєю структурою займає проміжний тип між стрічковими та шаруватими силікатами. Характеризується наявністю цеолітних каналів та розвиненою вторинною пористою структурою. Схема будови палигорськіту зображена на рис. 1.

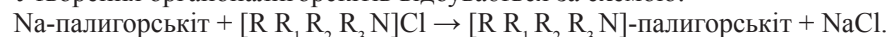
Для експериментів природний палигорськіт був очищений методом седиментації і переведений у Na-форму за методикою, описаною у статті [12]. Матеріал подрібнювали, просіювали, відбирати фракцію 0,1-0,2 мм, яку використовували для подальших досліджень.

Для модифікування поверхні палигорськіту використовували тетраметиламоній хлорид (ТМА) від виробника Fluka, додецилтриметиламоній бромід (ДДТМА), алкілбензилдиметиламоній хлорид (АБДМА) та гексадецилтриметиламоній бромід (ГДТМА) компанії Merck.

Структура катіонних ПАР зображена на рис. 2.

Синтез органопалигорськіту проводили за методикою, описаною у роботі [14]. Для досліджень процесів флокуляції готували 1% водну суспензію палигорськіту, яку обробляли за допомогою ультразвукового диспергатора УЗДН-2Т протягом 5 хв. До підготованої таким чином суспензії глинистого мінералу додавали розчин ПАР у діапазоні співвідношень 0,25–2,5 ПАР/КОЄ.

Утворення органопалигорскітів відбувається за схемою:



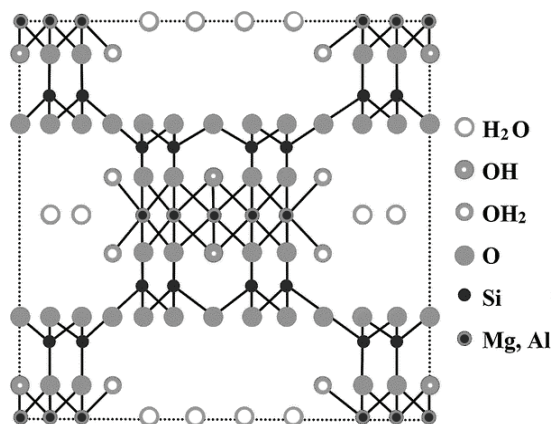


Рис. 1. Схема будови палигорськіту по П.В. Харбену і Р.Л. Бейтсу [13].

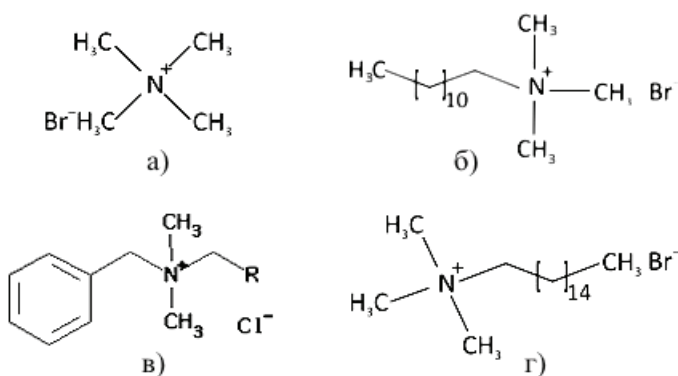


Рис. 2. Структурні формули катіонних ПАА: а) ТМА; б) ДДТМА; в) АБДМА; г) ГДТМА.

Після модифікування зразки витримували протягом 2 годин, вимірювали висоту осаду. Ступінь флокуляції системи розраховували за формулою (1)

$$f = \frac{h - h_{oc}}{h - h_{min}} \quad (1)$$

де h – висота стовпа початкової суспензії, h_{oc} – висота осаду для експериментальної точки, h_{min} – висота осаду у точці з максимальною флокуляцією системи.

Потім зразки центрифугували (Centrifuge type MPW-340, Poland) протягом 10 хв., промивали від надлишку ПАА та висушували при температурі 105 °С.

В сорбційних експериментах використовували розчини дихромат калію $K_2Cr_2O_7$, гексагідрат хлориду кобальту $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ та наважки синтезованих композитів. Сорбцію проводили в статичних умовах, в терморегульованому

боксі при температурі 25 °С та безперервному струшуванні зразків на шейкері (Biosan OS-20, Latvia) протягом 1 години до встановлення адсорбційної рівноваги. Співвідношення твердої і рідкої фази під час адсорбційного експерименту складало 1/500. Концентрація Cr (VI) та Co (II) складала 10 мг/дм³. Іонну силу розчинів (0,01 М) створювали за допомогою NaCl.

Після встановлення адсорбційної рівноваги водну фазу відділяли центрифугуванням (4500 об.·хв⁻¹) та визначали в ній рівноважну концентрацію хрому (VI) та кобальту (II) спектрофотометричним методом (UNICO 2100UV) за методиками [15, 16] з використанням реагентів дифенілкарбазиду та нітритро-*R*-солі при довжині хвилі 540 та 520 нм для хрому та кобальту, відповідно.

Величину сорбції металів розраховували за формулою (2):

$$a = \frac{(C_0 - C_p)V}{m}, \text{ мг/г}, \quad (2)$$

де C_0 та C_p – вихідна та рівноважна концентрація металу, мг/дм³; V – об'єм розчину, дм³, m – маса наважки сорбенту, г.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Флокуляція дисперсій катіонними ПАР

Розшарування суспензії і утворення нещільних флокул спостерігали при внесенні у дисперсії палигорськіту навіть невеликої кількості органічних катіонів [7]. Для водної суспензії палигорськіту з концентрацією твердої фази 1 % спостерігаємо утворення флокул при внесенні у систему ПАР 0,625 ммоль на 1 дм³. Залежність ступеня флокуляції модифікованих дисперсій від співвідношення ПАР/КОЄ показана на рис. 3.

Для зразків палигорськіту, модифікованого ПАР, що мають у своєму алкільному ланцюгу 16 та 14 груп (-CH₂-), спостерігається дзвіноподібна залежність ступеня флокуляції від КОЄ/ПАР.

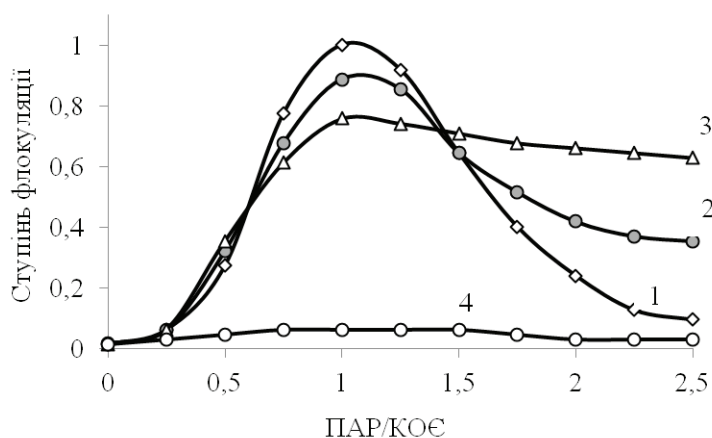


Рис. 3. Залежність ступеня флокуляції від співвідношення ПАР/КОЄ для палигорськіту, модифікованого: 1 – ГДТМА; 2 – АБТМА; 3 – ДДТМА; 4 – ТМА.

При невеликих значеннях ПАР/КОЄ (до 0,5) відбувається поступова гідрофобізація поверхні та флокуляція системи внаслідок компенсування заряду частинок глинистого мінералу. При ПАР/КОЄ = 1 отримано максимальну ступінь флокуляції системи, що свідчить про максимальну гідрофобізацію поверхні сорбенту. При збільшенні вмісту ПАР в системі починається адсорбція другого шару ПАР на поверхні глинистого мінералу з поступовою гідрофілізацією поверхні. Таке пояснення узгоджується з попередніми дослідженнями інших авторів, що наведені в [17].

Для зразків суспензій палигорськіту, модифікованих ТМА, не спостерігається гідрофілізації поверхні при надлишкових концентраціях ПАР, що обумовлено вищою критичною концентрацією міцелотворення. Отже, і меншою стійкістю міцел ПАР, що складаються з коротких гідрофобних ланцюгів [18]. Присутність ТМА у суспензії палигорськіту в інтервалі досліджуваних ПАР/КОЄ сприяє стійкості дисперсії.

Адсорбція важких металів модифікованим палигорськітом

Для дослідження адсорбційних властивостей синтезованих матеріалів по відношенню до катіонів і аніонів важких металів були використані сполуки кобальту (II) та хрому (VI), які при рН = 6 знаходяться в розчині у вигляді катіонів Co^{2+} та аніонів CrO_4^{2-} . Результати досліджень адсорбційних властивостей отриманих матеріалів стосовно Cr(VI) та Co (II) представлені на рис. 4. Природний палигорськіт має спорідненість до йонів Co (II), але практично не сорбує Cr (VI).

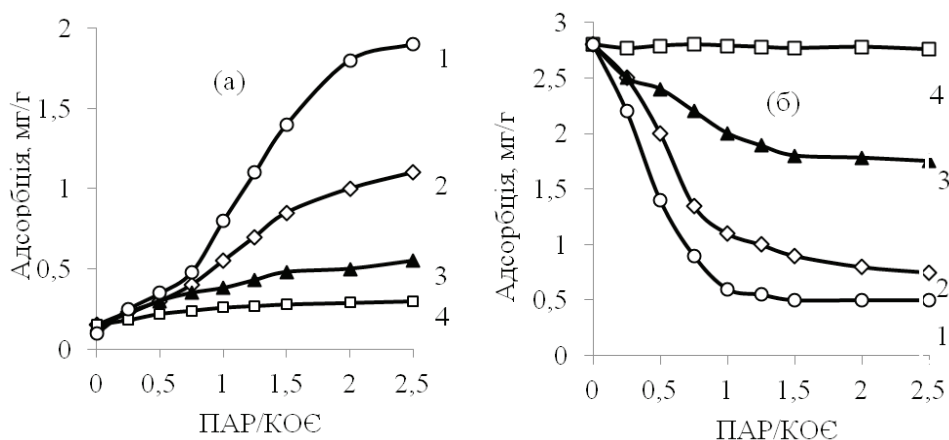


Рис. 4. Адсорбція йонів Cr (VI) (а) та Co (II) (б) для палигорськіту модифікованого: 1- ГДТМА; 2 – АБТМА; 3 – ДДТМА; 4 – ТМА.

При збільшенні концентрації ПАР у системах на поверхні мінералу утворюються геміміцели, які починають зростати у розмірах, і перекривати поверхню силікату, що суттєво знижує адсорбцію Co(II). Внаслідок заповнення ПАР поверхні мінералу відбувається поступове перезарядження його поверхні та підвищення адсорбції Cr(VI). Такі механізми характерні для довголанцюгових катіонних ПАР.

Адсорбція хрому і кобальту на палигорськітi, модифікованому ТМА, не зазнає значних змін порівняно з вихідним значеннями. ТМА у суспензії палигорськіту виконує роль стабілізатора.

ВИСНОВКИ

Експериментально доведена закономірність зміни структури дисперсій палигорськіту, модифікованого катіонними ПАР з різною довжиною алкільних ланцюгів. При внесенні у суспензії палигорськіту довголанцюгових ПАР (ГДТМА, АБДМА, ДДТМА) у кількостях ПАР/КОЄ > 0,25 спостерігається флокуляція систем, внаслідок гідрофобізації поверхні та її перезарядження. При збільшенні вмісту ПАР у дисперсії мінералу до ПАР/КОЄ = 1 відбувається утворення геміміцел та перезарядження поверхні. Проте, найвищу здатність до зміни поверхні мінералу із розглянутих ПАР може забезпечити тільки ГДТМА. У випадку АБТМА та ДДТМА при КОЄ/ПАР > 1 спостерігається часткова гідрофобізація поверхні, що знижує здатність до іонообмінних реакцій. Що стосується використання ТМА для синтезу органопалигорськіту, то можна стверджувати, що введення коротколанцюгових алкіламонійних солей при синтезі сорбентів майже не впливає на флокуляцію суспензії, але додавання даної ПАР доцільне в якості стабілізатору дисперсій.

Експериментально доведено, що найвищі значення сорбції Со(II) характерні для природного палигорськіту, а Cr(VI) – для палигорськіту, модифікованого ГДТМА у кількостях, що відповідають ПАР/КОЄ = 2,5. Отримані результати досліджень підтверджують можливість використання органопалигорськіту для вилучення аніонних форм забрудників, зокрема, іонів Cr(VI).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G.* Developments in clay science. Vol. 1. Handbook of clay science – Amsterdam: Elsevier, 2006. – P. 1224.
2. *Krishna B.S., Murty D.S.R., Jai Prakash B.S.* Thermodynamics of chromium (VI) anionic species sorption onto surfactant-modified montmorillonite clay // *J. Colloid Interface Sci.* – 2000. – N 229. – P. 230–236, <http://dx.doi.org/10.1006/jcis.2000.7015>.
3. *Anderson M.A., Trouw F.R., Tam C.N.* Properties of water in calcium- and hexadecyltrimethylammonium-exchanged bentonite // *Clays and Clay Minerals.* – 1999. – Vol. 47, N 1. – P. 28–35. <http://www.clays.org/journal/archive/volume%2047/47-1-28.pdf>
4. *Shihe Xu, Boyd S.A.* Cationic surfactant sorption to avermiculitic subsoil via hydrophobic bonding // *Environmental science and Technology.* – 1995. Vol. 29, N 2. – P. 312–320.
5. *Mittal V., Herle V.* Physical adsorption of organic molecules on the surface of layered silicate clay platelets: A thermogravimetric study // *J. Colloid Interface Science.* – 2008. – Vol. 327, N 2. – P. 295–301, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2008.08.036>.
6. *Hu Z., He G., Liu Y., Dong C., Wu X., Zhao W.* Effects of surfactant concentration on alkyl chain arrangements in dry and swollen organic montmorillonite // *Applied Clay Science.* – 2013. – Vol. 75–76. – P. 134–140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.03.004>.
7. *Голембіовський А.О., Брезицька А.М., Спасьонова Л.М.* Зміна структури поверхні монтморилоніту при адсорбції катіонних поверхнево активних речовин // *Восточно-Європейський журнал передових технологій.* – 2014. – No 4(6). – С. 53–57. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26043>.
8. *Swarnakar V., Agrawal N., Tomar R.* Sorption of Cr (VI) & As (V) on HDTMA – Modified Zeolites Removal of anionic contaminants using surfactant-modified palygorskite and sepiolite // *International Journal of Scientific & Engineering Research.* – 2011. – Vol. 2, N 5. – P. 1–9.
9. *Li Z., Willms C.A., Kniola K.* Removal of anionic contaminants using surfactant-modified palygorskite and sepiolite // *Clays and Clay Minerals.* – 2003. – Vol. 51, N 4. – P. 445–451. <http://dx.doi.org/10.1346/CCMN.2003.0510411>.

10. Васильев Н.Г., Гончарук В.В. Природные силикаты: строение свойства, реакционная способность. – К., 1992. – 176 с.
11. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. – Киев.: Наукова Думка, 1981. – 208 с.
12. Zhdanyuk N., Kovalchuk I., Kornilovych B. Obtaining stabilized nanodispersed iron based on organophilized montmorillonite // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 5(6). – P. 23–28, <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79452>.
13. Ерёмин Н. И. Неметаллические полезные ископаемые / Н. И. Ерёмин. – Москва: Издательство Московского Университета, 2004. – 459 с.
14. Zhdanyuk N. Research of chromium (VI) ion adsorption by montmorillonite modified by cationic surfactants // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – No 5(3). – P. 11–15. <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81015>.
15. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод / Ю. Ю. Лурье. – М.: Химия, 1989. – 448 с.
16. Марченко З. Фотометрическое определение элементов / З. Марченко. – М.: Мир, 1971. – 547 с.
17. Jiang N., Li P., Wang Y., Wang Y., Wang J., Yan H., Thomas R. Aggregation behavior of hexadecyltrimethylammonium surfactants with various counterions in aqueous solution // Journal of Colloid and Interface Science. – 2005. – Vol. 286, N 2. – P. 755–760, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2005.01.064>.
18. Rubingh D.N., Holland P.M. Cationic Surfactants: Physical Chemistry. – Boca Raton: CRC Press, 1991. – P. 544 p.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2017

Н. В. Жданюк

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», кафедра химической технологии керамики и стекла, пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина
e-mail: zdanyukn.kpi@gmail.com

АДСОРБЦИЯ ИОНОВ Cr (VI) И Co (II) ПАЛЫГОРСКИТОМ, МОДИФИЦИРОВАННЫМ КАТИОННЫМИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Резюме

Исследовано влияние алкиламмонийных солей с разной длиной алкильного радикала на флокуляцию суспензий палыгорскита и адсорбционные свойства полученных композитов. Максимальная флокуляция систем наблюдалась при модификации палыгорскита при ПАВ/КОЕ=1. Экспериментально доказано, что максимальные значения сорбции Cr (VI) характерны для палыгорскита, модифицированного длинноцепочечными катионными ПАВ, а Co (II) для природного палыгорскита. Обсуждено использование в качестве модификатора слоисто-ленточных силикатов гексадецилтриметиламмоний бромид (ГДТМА) в количествах, соответствующих ПАВ/КОЕ = 0,75 и выше. Полученные результаты исследований подтверждают возможность использования органопалягорскита для извлечения анионных форм тяжелых металлов из водных растворов.

Ключевые слова: палыгорскит, адсорбция, хром, кобальт, поверхностно-активные вещества.

N. V. Zhdanyuk

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Department of Chemical Technology of Ceramics and Glass,
Ave. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: zdanyukn.kpi@gmail.com

**ADSORPTION OF Cr (VI) AND Co (II) BY PALYGORSKITE
MODIFIED WITH CATIONIC SURFACTANTS**

Summary

The effect of cationic surfactants with different lengths of alkyl radical on the flocculation of suspensions of palygorskite as well as the adsorption properties of synthesized composites has been tested. Palygorskite of the Cherkassy (Ukraine), having cationic exchange capacity (CEC) of 0.25 mmol / g was chosen as an object of the study. For modification of palygorskite surface the following surfactants (S) have been used: hexadecyltrimethylammonium bromide, alkylbenzyltrimethylammonium chloride, dodecyltrimethylammonium bromide, tetramethylammonium chloride.

The pattern of changing the structure of palygorskite dispersions modified by cationic surfactants with alkyl chains of different length has been experimentally proven. The maximum flocculation of the systems has been observed at the modification of palygorskite with surfactant/cation exchange capacity ratio (S / CEC) = 1. With increasing of S / CEC the surface gradually becomes hydrophilic. However, only one from tested surfactants: hexadecyltrimethylammonium bromide can provide the highest ability to change the surface of the mineral. For alkylbenzyltrimethylammonium chloride and dodecyltrimethylammonium bromide only partial change of surface hydrophobicity has been observed.

Regarding the use of tetramethylammonium chloride for synthesis of organo-palygorskite, it could be argued that the introduction of surfactants with short length radical in the modification of sorbents has little effect on flocculation of the suspension. More probably the addition of such surfactant stabilizes the dispersions.

It has been experimentally proven that the maximum values of sorption of Cr (VI) are observed at palygorskite modified with long chain cationic surfactants, whereas Co (II) has been better extracted with natural palygorskite. The use of hexadecyltrimethylammonium bromide as the modifier of phyllosilicates at surfactant/cation exchange capacity ratio (S/CEC) = 0,75 and more is justified. The obtained results confirmed the possibility of using organo-palygorskite to extract anionic form of heavy metals.

Keywords: palygorskite, adsorption, chromium, cobalt, surfactant.

REFERENCES

1. Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G. *Developments in clay science*, vol. 1. Handbook of clay science, Amsterdam: Elsevier, 2006. pp. 1224.
2. Krishna B.S., Murty D.S.R., Jai Prakash B.S. *Thermodynamics of chromium (VI) anionic species sorption onto surfactant-modified montmorillonite clay*. J. Colloid Interface Sci, 2000, no 229. pp. 230–236. <http://dx.doi.org/10.1006/jcis.2000.7015>.
3. Anderson M.A., Trouw F. R., Tam C. N. *Properties of water in calcium- and hexadecyltrimethylammonium-exchanged bentonite*. Clays and Clay Minerals, 1999, vol. 47, no 1, pp. 28–35. <http://www.clays.org/journal/archive/volume%2047/47-1-28.pdf>
4. Shihe Xu, Boyd S.A. *Cationic surfactant sorption to avermiculitic subsoil via hydrophobic bonding*. Environmental science and Technology, 1995, vol. 29, no 2, pp. 312–320.
5. Mittal V., Herle V. *Physical adsorption of organic molecules on the surface of layered silicate clay platelets: A thermogravimetric study*. J. Colloid Interface Sci., 2008, vol. 327, no 2, pp. 295–301. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2008.08.036>.

6. Hu Z., He G., Liu Y., Dong C., Wu X., Zhao W. *Effects of surfactant concentration on alkyl chain arrangements in dry and swollen organic montmorillonite*. Applied Clay Science, 2013, vol. 75–76, pp. 134–140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.03.004>.
7. Golembiovskiy A.O., Brezytska A.M., Spasonova L.M. *Zmina struktury poverkhni montmorylonitu pry adsorbtsii kationnykh poverkhnevo aktyvnykh rechovyh*. Vostochno–Evropeiskiy zhurnal peredovukh tekhnolohiyi, 2014, no 4 (6), pp. 53–57, <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26043>. (in Ukraine).
8. Swarnakar V., Agrawal N., Tomar R. *Sorption of Cr (VI) & As (V) on HDTMA – Modified Zeolites Removal of anionic contaminants using surfactant-modified palygorskite and sepiolite*. Internat. J. Sci. Engin. Res., 2011, vol. 2, no 5, pp. 1–9.
9. Li Z., Willms C.A., Kniola K. *Removal of anionic contaminants using surfactant-modified palygorskite and sepiolite*. Clays and Clay Minerals, 2003, vol. 51, no 4, pp. 445–451. <http://dx.doi.org/10.1346/CCMN.2003.0510411>.
10. Vasylev N.H., Honcharuk V.V. *Pryrodnye sylykaty: stroenye svoistva, reaktsyonnaia sposobnost*. Kiev, 1992, 176 p. (in Russian).
11. Tarasevych Yu.Y. *Pryrodnye sorbentu v protsessakh ochystky vodu*. Kiev, Naukova Dumka, 1981, 208 p. (in Russian).
12. Zhdanyuk N., Kovalchuk I., Kornilovych B. *Obtaining stabilized nanodispersed iron based on organophilized montmorillonite*. Vostochno–Evropeiskiy zhurnal peredovukh tekhnolohiyi, 2016, no 5(6), pp. 23–28. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79452>.
13. Erëmyn N. Y. *Nemetallycheskiye poleznye yskoraemye*. Moskva, 2004, 459 p. (in Russian).
14. Zhdanyuk N. *Research of chromium (VI) ion adsorption by montmorillonite modified by cationic surfactants*. Tekhnolohycheskyi audyt y rezervu proyzvodstva, 2016, no 5(3), pp. 11–15. <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81015>.
15. Lur'e Yu. *Analiticheskaya khimiya promyshlennykh vod*. Moscow: Khimiya, 1989, 448 p. (in Russian).
16. Marchenko, Z. *Fotometricheskoe opredelenie elementov*. Moscow: Mir, 1971, 547 p. (in Russian).
17. Jiang N., Li P., Wang Y., Wang Y., Wang J., Yan H., Thomas R. *Aggregation behavior of hexadecyltrimethylammonium surfactants with various counterions in aqueous solution*. J. Colloid Interface Sci., 2005, vol. 286, no 2, pp. 755–760. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2005.01.064>.
18. Rubingh D.N., Holland P.M. *Cationic Surfactants: Physical Chemistry*. Boca Raton, CRC Press, 1991, 544 p.