

УДК: 544.7:543.5:543.64

**О. М. Гузенко, О. М. Жуковецька, Д. М. Мукієнко, В. В. Шаповаленко,
О. М. Чеботарьов, Д. В. Снігур**Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, Україна, 65082; e-mail: 270892denis@gmail.com**СОРБЦІЯ ЕРИТРОЗИНУ СИЛКАГЕЛЕМ,
МОДИФІКОВАНИМ БРОМІДОМ ЦЕТИЛПІРИДИНІО**

Отримано сорбенти на основі силкагелю L 40/100, модифікованого бромідом цетилпіридинію. Вивчено і оптимізовано умови сорбції еритрози́ну з розбавлених водних розчинів запропонованим сорбентом. Показано, що використання модифікованого силкагелю дозволяє ефективно (>95%) вилучати еритрози́н з водних розчинів. В оптимальних умовах сорбції визначена сорбційна ємність модифікованих сорбентів за еритрози́ном. Досліджено десорбцію еритрози́ну з поверхні силкагелю, модифікованого бромідом цетилпіридинію. Показано, що при використанні розчинів сульфатної кислоти, натрій гідроксиду та дистильованої води, десорбція не відбувається.

Ключові слова: модифіковані силкагелі, бромід цетилпіридинію, еритрози́н, сорбція.

Харчові барвники – це сполуки, які використовуються для придання, підсилення або відновлення забарвлення харчових продуктів. Однак, в залежності від концентрації синтетичні барвники можуть виявляти канцерогенні, мутагенні або алергенні властивості [1-4]. На сьогоднішній день для визначення харчових синтетичних барвників широко застосовують спектрофотометричні, хроматографічні, електрофоретичні та інші методи [5-10]. У свою чергу, основною проблемою при визначенні харчових барвників є складність їх вилучення з аналізованих зразків. Для цього запропоновані різні екстракційні методи, наприклад рідинна екстракція із висоловванням та міцелярна екстракція [11, 12]. На наш погляд, не менш зручним методом виділення цільового компоненту може бути сорбція, яка дозволяє поєднати високу ефективність процесу концентрування з широким вибором сорбентів, їх доступністю та можливістю поєднання з методами детектування аналітичного сигналу, наприклад із спектроскопією дифузного відбиття [13-16].

В продовження наших попередніх досліджень, присвячених сорбційному концентруванню азобарвників (кармаозину, тартазину та інших) [17], а також трифенілметанових барвників (діамантовго синього FCF та патентованого синього V) [18] в представлений роботі розглянуто особливості сорбції ксантенового барвника еритрози́ну силкагелем (СГ), модифікованим бромідом цетилпіридинію (ЦПВr).

РЕАКТИВИ ТА АПАРАТУРА

У роботі використовували вихідні розчини еритрози́ну з концентрацією $1 \cdot 10^{-2}$ моль/л, які отримували шляхом розчинення точної наважки еритрози́ну у дистильованій воді. Робочі розчини з меншими концентраціями готували відповідним розведенням вихідних безпосередньо перед застосуванням. Для отримання модифікованого сорбенту використовували силкагель L 40/100. В якості модифікатору – розчин цетилпіридинію броміду з концентрацією $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л. Електронні

спектри поглинання в області 380÷780 нм реєстрували на спектрофотометрах Specord UV VIS та СФ-56 в кюветах з товщиною поглинаючого шару 1, 2 і 3 см. Спектри дифузного відбиття у інфрачервоній області реєстрували за допомогою спектрофотометру Perkin-Elmer Frontier FT-IR Spectrometer. Кислотність середовища контролювали за допомогою скляного електрода ЕСЛ-63-07 в парі з хлоридсрібним електродом порівняння ЕВЛ-1МЗ на іонімірі І-160, відградуваному за стандартними рН-буферними розчинами.

Методика адсорбційної модифікації СГ L 40/100 бромідом цетилпіридинію. На аналітичних вагах зважують 10 г сорбенту і поміщають в конічну колбу. Додають 100 мл розчину цетилпіридиній броміду з концентрацією $1 \cdot 10^{-3}$ М, закорковують та поміщають в апарат для струшування АБУ-6с на 60 хвилин. Після цього сорбент фільтрують, промивають дистильованою водою до нейтральної реакції, контролюючи індикаторним папером та висушують.

Методика дослідження сорбційного вилучення еритрозину. На аналітичних вагах зважують 0,1 г модифікованого силікагелю і поміщають наважки в конічні колби. В ряд мірних колб місткістю 50 мл вносять по 1,8 мл розчину барвника з концентрацією $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, додають ~10 мл дистильованої води та встановлюють значення рН розчину в діапазоні від 2 до 9 ($\Delta\text{рН} = 1$) та розбавляють до мітки. Розчини кількісно переносять в конічні колби, закорковують та струшують різні часові проміжки (15-60 хвилин).

Після закінчення сорбції сорбент відділяють від рівноважного розчину фільтруванням. Перші порції фільтратів (~2 мл) відкидають. Рівноважну концентрацію еритрозину визначають спектрофотометрично.

Відсоток сорбції розраховують за формулою:

$$S = \frac{c_{\text{вих}} - c_{\text{рівн}}}{c_{\text{вих}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $c_{\text{вих}}$ – концентрація барвника в сорбційному розчині, моль/л; $c_{\text{рівн}}$ – рівноважна концентрація.

Десорбцію еритрозину з поверхні модифікованого сорбенту проводили 1-50 мл розчинів хлороводневої, сульфатної, нітратної і оцтової кислот (0,1-1,0 моль/л), гідроксиду натрію і амонію (0,1-1,0 моль/л), а також водним і аміачним розчинами додецилсульфата натрію (0,001-0,01 моль/л). Розчин десорбата фільтрують крізь тefлоновий фільтр і визначають оптичну густину та концентрацію еритрозину. Ступінь десорбції обчислюють аналогічно ступеню сорбції.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

З метою підтвердження модифікації поверхні вихідного силікагелю ЦПВr, отримано ІЧ-спектри дифузного відбиття зразків не модифікованого і модифікованого сорбентів. Зареєстровані смуги поглинання валентних коливань силікоксанових зв'язків $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ при 1050 см^{-1} та смуги при 3750 см^{-1} , які можна віднести до валентних коливань поверхневих силанольних груп. Додатковим підтвердженням щодо модифікації силікагелю можуть служити смуги поглинання при 750 і 850 см^{-1} , які відповідають деформаційним коливанням СН зв'язків піридинового кільця, а смуга при 1600 см^{-1} – валентним коливанням С = N зв'язків.

Для оптимізації умов сорбційного вилучення еритрози́ну досліджено вплив часу, витрати сорбенту та кислотності середовища на вилучення барвника (рис. 1).

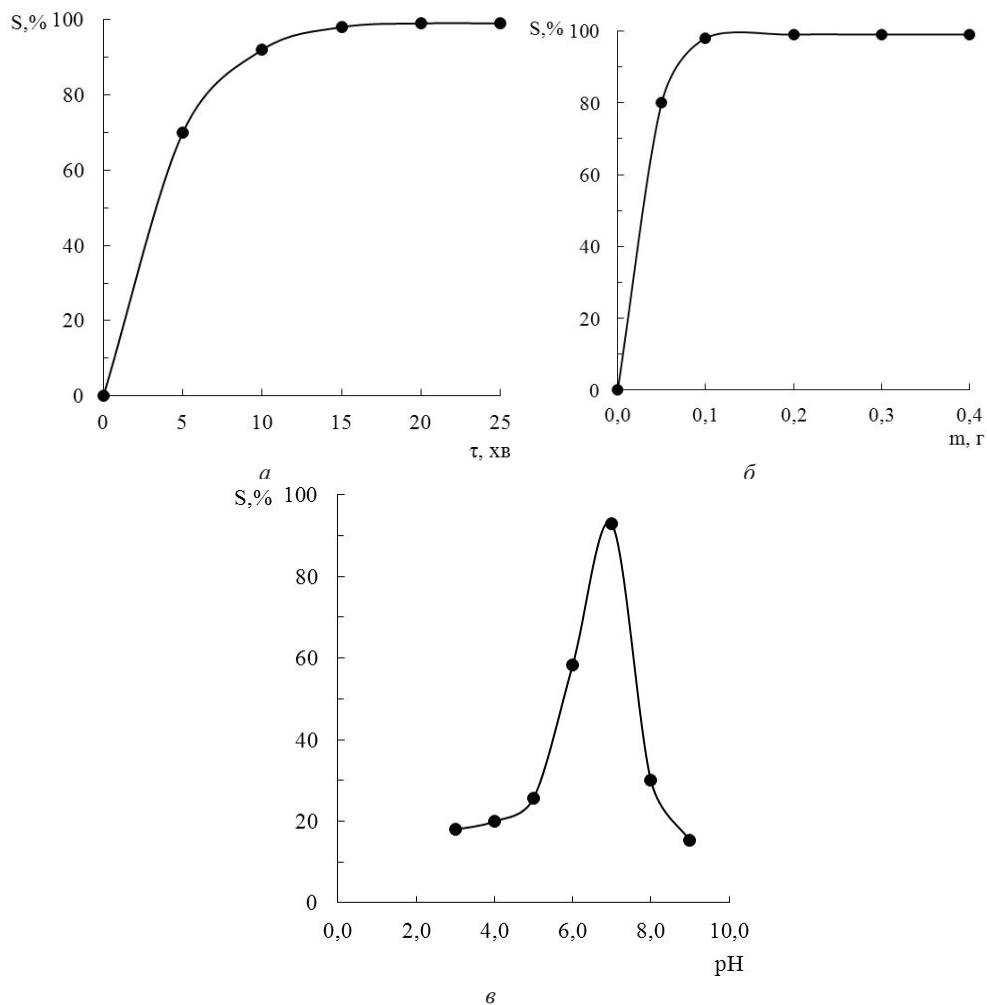


Рис. 1. Залежність ступеню сорбції еритрози́ну силікагелем, модифікованим ЦПВг від: часу контакту фаз (τ , хв.) – а; маси наважки сорбенту (m_s , г) – б; кислотності середовища рН – в.

Fig. 1. Dependence of the erythrosine degree of sorption by silica gel modified with CPBr on: phase contact time (τ , min.) – а; mass of the sorbent sample (m_s , g) – б; pH – в.

З рис. 1 видно, що кількісного вилучення еритрози́ну (понад 95%) можна досягти при проведенні сорбції в статичному режимі при рН 7, наважці сорбенту 0,1 г впродовж 15 хв.

Для дослідження механізму сорбційного вилучення еритрозину силікагелем, модифікованим ЦПВr, при оптимізованих умовах, отримано ізотерми сорбції в діапазоні температур 20-65 °С (рис. 2).

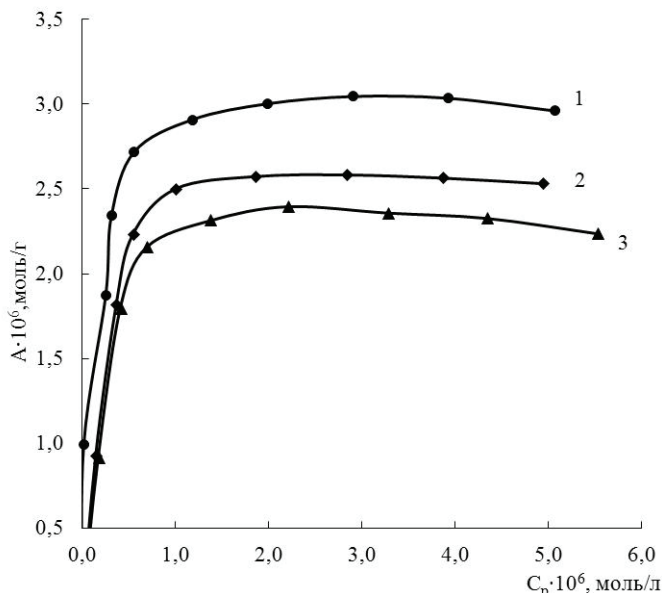


Рис. 2. Ізотерми сорбції еритрозину СГ, модифікованим ЦПВr при різних температурах: 1-20°C; 2-45°C; 3-65°C.

Fig. 2. Sorption isotherms of erythrosine on silica gel modified by CPBr at different temperatures: 1-20 °C; 2-45 °C; 3-65 °C.

Як видно з рис. 2, ізотерму сорбції, отриману при 20 °С можна віднести до Н-типу за класифікацією Джайлза [19], що свідчить про високу спорідненість сорбату до поверхні сорбенту. З підвищенням температури ізотерма набуває L-типу. Це можна пояснити утворенням агрегатів еритрозину при підвищенні температури, що є достатньо типовим процесом для ксантенових барвників [20]. Останнє може супроводжуватися частковим блокуванням адсорбційних центрів на поверхні модифікованого силікагелю, що обумовлює зменшення числових значень величини адсорбції з $3,0 \cdot 10^{-6}$ до $2,3 \cdot 10^{-6}$ моль/г при підвищенні температури з 20 до 65 °С (таблиця).

Для визначення термодинамічних параметрів досліджуваної системи отримані ізотерми сорбції лінеризували (рис. 3) в координатах рівняння Ленгмюра [21]:

$$\frac{C_p}{A} = \frac{1}{A_\infty \beta} + \frac{C_p}{A_\infty}, \quad (2)$$

де A – сорбція, моль/г; A_∞ – гранична сорбція, моль/г; C_p – рівноважна концентрація сорбату, моль/л; β – константа адсорбційної рівноваги, г/моль.

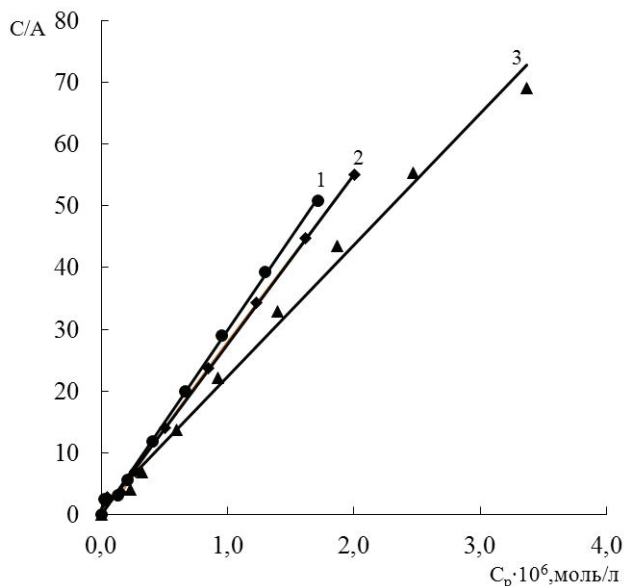


Рис. 3. Лінеаризовані в координатах рівняння Ленгмюра ізоТЕРМИ сорбції еритрозина силікагелем, модифікованим ЦПВr при різних температурах: 1-20 °C; 2-45 °C; 3-65 °C.

Fig. 3. Linearized in the coordinates of the Langmuir equation isotherms of sorption of erythrosine by silica gel modified with CPBr at different temperatures: 1-20 °C; 2-45 °C; 3-65 °C.

Опрацюванням даних наведених на рис. 3 знаходили числові значення константи адсорбційної рівноваги (K) та граничної адсорбції, що дозволило розрахувати термодинамічні параметри досліджуваної системи (табл.).

Таблиця

Адсорбційні та термодинамічні характеристики системи

Table

Adsorption and thermodynamic characteristics of the system

T, °C	$K \cdot 10^{-8}$	A_{∞} , мкмоль/г	ΔH , кДж/моль	ΔG , кДж/моль	ΔS , Дж/моль·К
20	94.82	3,0	-43,79	-29,82	-43,96
45	48.94	2,8	-43,79	-29,29	-49,53
65	34.16	2,3	-43,79	-26,25	-51,92

Значення теплового ефекту ($\Delta H^{\circ} < 0$) вказують на помітний вплив фізичних взаємодій при формуванні моношару на поверхні модифікованого сорбенту, проте, помірно низькі значення ΔH свідчать про реалізацію іонообмінних процесів, які відбуваються на первинному етапі формування адсорбційного шару. Величини вільної енергії Гіббса вказують на самочинний характер сорбції, що обумовлено електростатичним притяганням аніонної форми еритрозину позитивно зарядже-

ною поверхнею сорбенту. Негативні значення ентропії вказують на встановлення порядку в системі, що співпадає з наведеним вище міркуванням про переважно хімічну природу сорбції.

На підтвердження наведених міркувань, досліджено десорбцію еритрозиу з поверхні силікагелю, модифікованого ЦПВг. Встановлено, що розчини кислот (хлороводневої, сульфатної, нітратної і оцтової) практично не десорбують еритрозин з модифікованої ЦПВг поверхні силікагелю. В роботах [17, 18] запропоновані методики десорбції азо- та трифенілметанових барвників, заснованих на використанні аніонних поверхнево-активних речовин. У даній роботі в якості елюенту використаний амоніачний розчин натрій додецилсульфату, який кількісно десорбує еритрозин з поверхні модифікованого силікагелю. Цей факт можна пояснити тим, що в амоніачних розчинах (рН \sim 10) додецилсульфат натрію існує в практично повністю дисоційованій формі, що сприяє десорбції еритрозиу з поверхні СГ внаслідок заміщення аніонів еритрозиу додецилсульфат-аніонами і утворенню нових іонних асоціатів на поверхні сорбенту.

Таким чином, в результаті даної роботи вивчені особливості процесу сорбційного вилучення еритрозиу силікагелем, модифікованим бромідом цетилпіридинію. Встановлено, що кількісне вилучення барвника ($S \geq 95\%$) досягається впродовж 15 хв при рН 7 та наважці модифікованого сорбенту 0,1 г. Визначені основні термодинамічні та кількісні показники сорбції, які дозволяють рекомендувати використовувати модифікований сорбент для кількісного вилучення еритрозиу з розведених водних розчинів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Elbann K., Sarhan O. M., Khider M., Elmogy M., Abulreesh H. H., Shaaban M. R.* Microbiological, histological, and biochemical evidence for the adverse effects of food azo dyes on rats // *J. Food Drug Anal.* – 2017. – Vol. 25. – P. 667-680. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2017.01.005>
2. *Yamjala K., Nainar M. S., Ramisetty N. R.* Methods for the analysis of azo dyes employed in food industry – A review // *Food Chem.* – 2016. – Vol. 192. – P. 813-824. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.085>
3. *Coman V., Copaciu F.* Analysis of Dyes and Inks // *Instr. Thin-Layer Chromatogr.* – 2015. – P. 555-588. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417223-4.00020-0>
4. *Amin K.A., Abdel Hameid H., Abd Elsttar A.H.* Effect of food azo dyes tartrazine and carmoisine on biochemical parameters related to renal, hepatic function and oxidative stress biomarkers in young male rats // *Food Chem. Toxicol.* – 2010. – Vol. 48, N10. – P. 2994-2999. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.07.039>
5. *Andrade F.I.d., Guedes M.I.F., Vieira G.P., Mendes F.N.P., Rodrigues P.A.S., Maia C.S.C., Ávila M.M.M., Ribeiro L.d.M.* Determination of synthetic food dyes in commercial soft drinks by TLC and ion-pair HPLC // *Food Chem.* – 2014. – Vol. 157. – P. 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.100>
6. *Bento W., Lima B., Paim A.* Simultaneous determination of synthetic colorants in yogurt by HPLC // *Food Chem.* – 2015. – Vol. 183. – P. 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.050>
7. *Ni Y., Wang Y., Kokot S.* Simultaneous kinetic spectrophotometric analysis of five synthetic food colorants with the aid of chemometrics // *Talanta.* – 2009. – Vol. 78, N2. – P. 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.11.035>
8. *Soylak M., Unsal Y.E., Tuzen M.* Spectrophotometric determination of trace levels of allura red in water samples after separation and preconcentration // *Food Chem. Toxicol.* – 2011. – Vol. 49, N5. – P. 1183-1187. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.02.013>
9. *Giovine L.D., Bocca A.P.* Determination of synthetic dyes in ice-cream by capillary electrophoresis // *Food Control.* – 2003. – Vol. 14, N3. – P. 131-135. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(02\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(02)00055-5)
10. *Kartsova L.A., Alekseeva A.V., Khmel'nitskii I.K., Komissarchik S.M., Nyanikova G.G. and Berezkin V.G.* Electromigration Methods in the Determination of Synthetic Food Dyes // *J. Anal. Chem.* – 2009. – Vol. 64, N12. – P. 1264-1269. <https://doi.org/10.1134/S1061934809120119>

11. Razmara R.S., Daneshfar A., Sahrai R. Determination of methylene blue and sunset yellow in wastewater and food samples using salting-out assisted liquid–liquid extraction // J. Ind. Eng. Chem. Res. – 2011. – Vol. 17, N3. – P. 533-536. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.10.028>
12. El-Shahawi M.S., Hamza A., Al-Sibaai A.A., Bashammakh A.S., Al-Saidi H.M. A new method for analysis of sunset yellow in food samples based on cloud point extraction prior to spectrophotometric determination // J. Ind. Eng. Chem. Res. – 2013. – Vol. 19, N2. – P. 529-535. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.09.008>
13. Dotto G.L., Pinto L.A.A., Hachicha M.A., Knani S. New physicochemical interpretations for the adsorption of food dyes on chitosan films using statistical physics treatment // Food Chem. – 2015. – Vol. 171. – P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.098>
14. Dotto G.L., Pinto L.A.A. Adsorption of food dyes onto chitosan: Optimization process and kinetic // Carbohydr. Polym. – 2011. – Vol. 84, N1. – P. 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.11.028>
15. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze Sh., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review // Adv. Colloid Interface Sci. – 2014. – Vol. 209. – P. 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
16. Ramazanova G.R., Tikhomirova T.I., Apyari V.V. Adsorption of Sunset Yellow FCF Food Dye from aqueous solutions and its determination by diffuse reflectance spectroscopy // J. Anal. Chem. – 2015. – Vol. 70, N6. – P. 685-690. <https://doi.org/10.1134/S1061934815060131>
17. Bevziuk K., Chebotarev A., Koicheva A., Snigur D. Adsorption of anionic food azo dyes from aqueous solution by silica modified with cetylpyridinium chloride // Monatsh. Chem. – 2018. – Vol. 149, N12. – P. 2153-2160. <https://doi.org/10.1007/s00706-018-2301-0>
18. Чеботарєв А.Н., Бєвзюк Е.В., Рахлицька Е.М., Снигур Д.В. Особенности сорбционного извлечения некоторых пищевых красителей силикагелем модифицированным хлоридом цетилпиридиния // Укр. хим. журн. – 2018. – Т. 84, № 7. С. 60-67.
19. Giles C.H., MacEwan T.H., Nakhwa S.N., Smith D. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids // J. Chem. Soc. – 1960. – N0. – P. 3973-3993 p. <https://doi.org/10.1039/JR9600003973>
20. Giles C.H., Smith D., Huitson A. A General Treatment and Classification of the Solute Adsorption Isotherm // J. Colloid Interface Sci. – 1974. – Vol. 47, N3. – P. 755-765. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(74\)90252-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(74)90252-5)
21. Ягдовский В.Д. Адсорбция. М.: Бинном. Лаборатория знаний, 2015. – 216 с.

Стаття надійшла до редакції 30.08.2021

**Е. М. Гузенко, Е. М. Жуковецкая, Д. М. Мукиенко, В. В. Шаповаленко,
А. Н. Чеботарев, Д. В. Снигур**

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
ул. Дворянская, 2, Одесса, Украина, 65082; e-mail: 270892denis@gmail.com

СОРБЦИЯ ЭРИТРОЗИНА СИЛИКАГЕЛЕМ, МОДИФИЦИРОВАННЫМ БРОМИДОМ ЦЕТИЛПИРИДИНИЯ

Получены сорбенты на основе силикагеля L 40/100, модифицированного бромидом цетилпиридиния. Изучены и оптимизированы условия сорбции эритрозина из разбавленных водных растворов предложенным сорбентом. Показано, что использование модифицированного силикагеля позволяет эффективно (>95%) извлекать эритрозин из водных растворов. В оптимальных условиях сорбции определена сорбционная емкость модифицированных сорбентов по эритрозину. Исследована десорбцию эритрозина с поверхности силикагеля, модифицированного бромидом цетилпиридиния. Показано, что при использовании растворов серной кислоты, гидроксида натрия и дистиллированной воды, десорбция не происходит.

Ключевые слова: модифицированные силикагели, бромид цетилпиридиния, эритрозин, сорбция.

**O. M. Guzenko, O. M. Zhukovetska, D. M. Mukienko, V. V. Shopovalenko,
A. N. Chebotarev, D. V. Snigur**
Odessa I.I. Mechnikov National University,
Dvoryanska street, 2, Odessa, Ukraine, 65082; e-mail: 270892denis@gmail.com

SORPTION OF ERYTHROSINE ONTO SILICA GEL MODIFIED BY CETYLPYRIDINIUM BROMIDE

In the current paper, adsorbent based on silica gel L 40/100 modified with cetylpyridinium bromide was obtained. The presence of cetylpyridinium cations on the silica gel surface was confirmed by the diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy method. The sorption conditions of erythrosine from dilute aqueous solutions with the proposed sorbent were studied and optimized. It is shown that the use of modified silica gel allows efficient (>95%) extraction of erythrosine from aqueous solutions. Under optimal sorption conditions (pH 7, sorbent dosage 0.1 g and sorption time is 15 min), the sorption capacity of modified erythrosine sorbents was determined. It is shown that, with increasing temperature, a change in the isotherm type from the H-type to the L-type is observed. This change can be explained by the aggregation of erythrosin in solution, which is a competitive sorption process. It was shown that adsorption isotherms were well described by the Langmuir equation. Thermodynamic studies have made it possible to establish the spontaneous sorption. The desorption of erythrosine from the surface of silica gel modified with cetylpyridinium bromide was studied. It is shown that when using solutions of sulfuric acid, sodium hydroxide and distilled water, desorption does not occur. It was shown that the most effective eluent is solution of sodium dodecylsulfate in alkaline medium, and desorption of erythrosine occurs due to the destruction of ion pairs of dye anions with cetylpyridinium cations fixed on the surface. The data obtained can then be used to develop a test system for determination of erythrosine via corresponding colorimetric scales or for quantitative solid phase extraction and adsorption-spectroscopic quantification of erythrosine in some real samples.

Key words: modified silica gels, cetylpyridinium bromide, erythrosine, sorption.

REFERENCES

1. Elbann K., Sarhan O. M., Khider M., Elmogy M., Abulreesh H. H., Shaaban M. R. *Microbiological, histological, and biochemical evidence for the adverse effects of food azo dyes on rats*. J. Food Drug Anal., 2017, vol. 25, pp. 667-680. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2017.01.005>
2. Yamjala K., Nainar M. S., Ramiseti N. R. *Methods for the analysis of azo dyes employed in food industry – A review*. Food Chem., 2016, vol. 192, pp. 813-824. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.085>
3. Coman V., Copaciu F. *Analysis of Dyes and Inks*. Instr. Thin-Layer Chromatogr., 2015, pp. 555-588. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417223-4.00020-0>
4. Amin K.A., Abdel Hameid II H., Abd Elsttar A.H. *Effect of food azo dyes tartrazine and carmoisine on biochemical parameters related to renal, hepatic function and oxidative stress biomarkers in young male rats*. Food Chem. Toxicol., 2010, vol. 48, no 10, pp. 2994-2999. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.07.039>
5. Andrade F.I.d., Guedes M.I.F., Vieira G.P., Mendes F.N.P., Rodrigues P.A.S., Maia C.S.C., Ávila M.M.M., Ribeiro L.d.M. *Determination of synthetic food dyes in commercial soft drinks by TLC and ion-pair HPLC*. Food Chem., 2014, vol. 157, pp. 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.100>
6. Bento W., Lima B., Paim A. *Simultaneous determination of synthetic colorants in yogurt by HPLC*. Food Chem., 2015, vol. 183, pp. 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.050>
7. Ni Y., Wang Y., Kokot S. *Simultaneous kinetic spectrophotometric analysis of five synthetic food colorants with the aid of chemometrics*. Talanta., 2009, vol. 78, no 2, pp. 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.11.035>
8. Soylak M., Unsal Y.E., Tuzen M. *Spectrophotometric determination of trace levels of allura red in water samples after separation and preconcentration*. Food Chem. Toxicol., 2011, vol. 49, no 5, pp. 1183-1187. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.02.013>

9. Giovine L.D, Bocca A.P. *Determination of synthetic dyes in ice-cream by capillary electrophoresis*. Food Control, 2003, vol. 14, no 3, pp. 131-135. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(02\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(02)00055-5)
10. Kartsova L.A., Alekseeva A.V., Khmel'nitskii I.K., Komissarchik S.M., Nyanikova G.G. and Berezkin V.G. *Electromigration Methods in the Determination of Synthetic Food Dyes*. J. Anal. Chem., 2009, vol. 64, no 12, pp. 1264-1269. <https://doi.org/10.1134/S1061934809120119>
11. Razmara R.S., Daneshfar A., Sahrai R. *Determination of methylene blue and sunset yellow in wastewater and food samples using salting-out assisted liquid-liquid extraction*. J. Ind. Eng. Chem. Res., 2011, vol. 17, no 3, pp. 533-536. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.10.028>
12. El-Shahawi M.S., Hamza A., Al-Sibaai A.A., Bashammakh A.S., Al-Saidi H.M. *A new method for analysis of sunset yellow in food samples based on cloud point extraction prior to spectrophotometric determination*. J. Ind. Eng. Chem. Res., 2013, vol. 19, no 2, pp. 529-535. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.09.008>
13. Dotto G.L., Pinto L.A.A., Hachicha M.A., Knani S. *New physicochemical interpretations for the adsorption of food dyes on chitosan films using statistical physics treatment*. Food Chem., 2015, vol. 171, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.098>
14. Dotto G.L., Pinto L.A.A. *Adsorption of food dyes onto chitosan: Optimization process and kinetic*. Carbohydr. Polym., 2011, vol. 84, no 1, pp. 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.11.028>
15. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze Sh., Ang H.M. *Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review*. Adv. Colloid Interface Sci., 2014, vol. 209, pp. 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
16. Ramazanov G.R., Tikhomirova T.I., Apyari V.V. *Adsorption of Sunset Yellow FCF Food Dye from aqueous solutions and its determination by diffuse reflectance spectroscopy*. J. Anal. Chem., 2015, vol. 70, no 6, pp. 685-690. <https://doi.org/10.1134/S1061934815060131>
17. Bevziuk K., Chebotarev A., Koicheva A., Snigur D. *Adsorption of anionic food azo dyes from aqueous solution by silica modified with cetylpyridinium chloride*. Monatsh. Chem., 2018, vol. 149, no 12, pp. 2153-2160. <https://doi.org/10.1007/s00706-018-2301-0>
18. Chebotarev A.N., Bevziuk E.V., Rahlickaya E.M., Snigur D.V. *Osobennosti sorbcionnogo izvlecheniya nekotoryh pishchevyh krasitelej silikagelem modifitsirovannym hloridom cetilpiridiniya*. Ukr. him. zhurn., 2018, vol. 84, no 7, pp. 60-67. (in Russian)
19. Giles C.H., MacEwan T.H., Nakhwa S.N., Smith D. *A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids*. J. Chem. Soc., 1960, N0, pp. 3973-3993 p. <https://doi.org/10.1039/JR9600003973>
20. Giles C.H., Smith D., Huitson A. *A General Treatment and Classification of the Solute Adsorption Isotherm*. J. Colloid Interface Sci., 1974, vol. 47, no 3, pp. 755-765. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(74\)90252-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(74)90252-5)
21. Yagodovskij V.D. *Adsorbtsiya*. Moscow, Binom, Laboratoriya znanij, 2015, 216 p. (in Russian)