

УДК 543.554

О. М. Чеботарьов, О. М. Гузенко, Д. О. Барбалат, Д. В. Снігур

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,

65082, Одеса, вул. Дворянська, 2, alexch@ukr.net, guzenkodom@yandex.ua

СОРБЦІЙНЕ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ ОРГАНОПОЛІМЕРНИХ АНІОНІТІВ КСИЛЕНОЛОВИМ ОРАНЖЕВИМ

Вивчено особливості сорбційного вилучення ксиленолового оранжевого (**КО**) за допомогою органічнополімерних аніонітів АВ-17-8 та Граніон АWA-G1 у статичному режимі. Встановлено, що максимальне сорбційне вилучення (90-95%) КО Граніоном АWA-G1 відбувається за 60 хв при рН 5 і 9. На підставі отриманих ізотерм сорбції та розрахованих термодинамічних параметрів зроблено висновок що формування адсорбційного шару відбувається довільно за змішаним механізмом. Показано, що зі зміною температури та рН середовища тип ізотерм змінюється з L3 на H4, що свідчить про високу спорідненість адсорбату до поверхні сорбенту. При дослідженні десорбції КО з поверхні аніоніту Граніон АWA-G1 встановлено, що дистильована вода та 1М розчини сульфатної кислоти несуттєво десорбують КО ($S_{\text{дес}} \leq 25\%$), на відміну від цього, десорбція КО 1 М розчинами натрію гідроксиду досягає $S_{\text{дес}} \sim 65\%$.

Ключові слова: ксиленоловий оранжевий, сорбція, органічнополімерні аніонообмінники, АВ-17-8, Граніон АWA-G1.

ВСТУП

Одним з напрямків розвитку фотометричних методів аналізу є розробка комбінованих методів, зокрема сорбційно-спектроскопічних і твердофазно-спектрофотометричних. При розробці методик сорбційно-спектроскопічного визначення речовин, зручними є системи на основі сорбентів модифікованих органічними реагентами, які дозволяють досягти високої вибірковості та навіть специфічності [1, 2]. Вибір сорбенту вимагає враховувати такі його фізико-хімічні властивості як: тип і природу матриці та поверхневих функціональних груп, загальну обмінну ємність, умови експлуатації (кислотність середовища, температура) тощо. З точки зору модифікування поверхні сорбентів особливий інтерес представляють органічнополімерні іоніти з різними кислотно-основними характеристиками та високими коефіцієнтами концентрування і можливістю розробки на їх основі комбінованих методик сорбційно-спектроскопічного визначення речовин [2–4].

В якості модифікатора поверхні, наприклад, органічнополімерних аніонітів, увагу привертає широко відомий в практиці хімічного аналізу трифенілметановий реагент ксиленоловий оранжевий (**КО**), який у розчинах існує переважно в аніонних формах та утворює аніонні комплекси з рядом іонів металів [5, 6]. У зв'язку з чим, досить цікавим є вивчення процесу модифікування поверхні сильноосновного (АВ-17-8) та слабоосновного (Граніон АWA-G1) аніонітів КО, які можна використовувати в якості твердофазного реагенту при визначенні іонів металів.

Виходячи з вищевикладеного, метою даної роботи є встановлення особливостей сорбційного вилучення ксиленолового оранжевого органічнополімерними аніонообмінниками АВ-17-8 та Граніон АWA-G1 у статичному режимі.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Електронні спектри поглинання в області 380÷780 нм реєстрували на спектрофотометрах СФ-56 та СФ-46 в кюветах з товщиною поглинаючого шару 1, 2 і 3 см. Кислотність середовища контролювали за допомогою скляного електрода “ЭСЛ-63-07” в парі з хлоридсрібним електродом порівняння “ЭВЛ-1М3” на іономірі “И-160”. ІЧ-спектри зареєстровані з використанням приставки порушеного повного внутрішнього віддзеркалення на спектрометрі FT-IR-8400S (Shimadzu), а спектри КР отримані за допомогою спектрометру DXR Raman Microscope (Thermo Scientific).

Сорбцію КО органічними аніонітами АВ-17-8 (сильноосновний) та ГраніонАВА-G1 (слабоосновний) у СІ-формі, які попередньо були підготовлені за методиками [7], вивчали в статичних умовах. У ряд сорбційних колб місткістю 150 мл вносили наважки сорбенту (0,2÷0,8 г) з діаметром зерен аніоніту 0,43÷0,50 мм, додавали розчини КО з фіксованим значенням рН (1÷9) та різною початковою концентрацією ($2 \cdot 10^{-5}$ ÷ $2 \cdot 10^{-4}$ М). Сорбційні колби закріплювали в термостатованому апараті для струшування (Water bath shaker type 357) протягом відповідного часу ($\tau_{\text{конт}}$, хв). Залишкову концентрацію КО у фільтраті визначали спектрофотометрично. Ступінь сорбції та кількість сорбованого КО обчислювали за формулами:

$$S, \% = \frac{C_n - C_p}{C_n} \cdot 100, \quad (1)$$

$$Q = \frac{C_n - C_p}{m_c} \cdot V_{\text{р-ну}}, \quad (2)$$

де S – ступінь сорбції КО поверхнею сорбенту, %; C_n – початкова концентрація КО, моль/л; C_p – рівноважна концентрація КО, М; Q – кількість сорбованого КО, мг/г; m_c – маса наважки сорбенту, г; $V_{\text{р-ну}}$ – об’єм робочого розчину КО, який був у контакті з фазою сорбенту, л.

Оптимізацію умов сорбції КО проводили із застосуванням математичного планування експерименту за методом латинських квадратів 4×4 [8]. Побудову і обробку ізотерм сорбції в рамках адсорбційної моделі Ленгмюра, а також розрахунок термодинамічних параметрів сорбції проводили відповідно до рекомендацій [9] за температури від 293 К до 313 К за оптимальних умов сорбції.

Десорбцію КО з поверхні аніонообмінників проводили протягом 15 хв 25-100 мл розчинами 1 М сульфатної кислоти, 1 М гідроксиду натрію або дистильованою водою. В елюаті спектрофотометричним методом визначали концентрацію КО та обчислювали ступінь десорбції:

$$S_{\text{дес}}, \% = \frac{C_{\text{дес}} \cdot V_{\text{дес.р-ну}}}{Q_{\text{сорб.}}} \cdot 100, \quad (3)$$

де $C_{\text{дес}}$ – концентрація рівноважного розчину після десорбції, М; $V_{\text{дес.р-ну}}$ – об’єм десорбованого розчину, л; $Q_{\text{сорб.}}$ – кількість сорбованого КО (моль), яку розраховують за формулою $Q_{\text{сорб.}} = (C_n - C_p) \cdot V_{\text{сорб.р-ну}}$, де C_n – концентрація КО в сорбційному розчині до сорбції, моль/л; C_p – концентрація КО в рівноважному розчині, моль/л; $V_{\text{сорб.р-ну}}$ – об’єм розчину, з якого проводилась сорбція, л.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Встановлено [6, 10] величини констант іонізації відповідних функціональних груп і запропоновано схему іонно-молекулярних рівноваг та побудовано відповідну діаграму розподілу рівноважних кислотно-основних форм. За даними робіт [6, 10] можна виділити інтервали рН домінування трьох аніонних форм КО: H_5R^- (рН 1÷3), H_3R^{3-} (рН 4÷6) та H_2R^{4-} (рН 7÷10) з максимумами поглинання при 415, 410 та 580 нм відповідно.

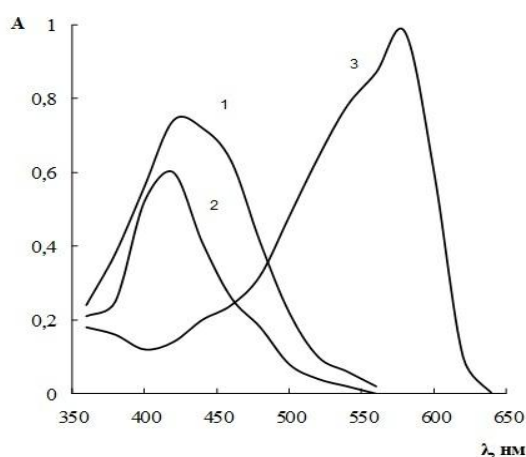


Рис. 1. Спектри світлопоглинання водних розчинів КО при різних значеннях рН ($C_{КО} = 1 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $l = 2$ см): 1 – H_5R^- (рН 1÷3); 2 – H_3R^{3-} (рН 4÷6); 3 – H_2R^{4-} (рН 7÷10).

Оптимальні умови сорбційного вилучення КО при 293 К (рН, масу наважки сорбенту, час контакту фаз та діаметр зерна аніоніту) сильноосновним (АВ-17-8) та слабоосновним (Граніон АВА-Г1) аніонітами узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1

Оптимальні умови сорбції КО аніонітами АВ-17-8 та Граніон АВА-Г1 у статичному режимі за температури 293 К

Умови	АВ-17-8	Граніон АВА-Г1	
		5	9
рН	5	5	9
m_c , г	2	0,6	0,6
d_z , мм	0,43÷0,50	0,43÷0,50	0,43÷0,50
$\tau_{\text{конт.}}$, хВ	90	60	60
S , %	15	90	95

Слід відмітити, що за вказаних у табл. 1 умов при вилученні КО за допомогою АВ-17-8 ступінь сорбції не перевищує 15%, а при використанні Граніону АВА-Г1 при рН 5 складає не менш 90% та при рН 9 біля 95%. Отримані данні свідчать про

невелику спорідненість КО до сорбенту АВ-17-8. Високі значення ступеню сорбції КО слабоосновним аніонітом Граніон АВА-Г1 обумовили його вибір для подальших досліджень.

На відміну від аніоніту АВ-17-8, склад матриці та природа поверхневих функціональних груп якого загальновідомі [7], в технічних умовах виробництва аніоніту Граніон АВА-Г1 (ТУ 2227-007-94654541-2010) така інформація не додається. Нами досліджено ІЧ та КР-спектри аніоніту Граніон АВА-Г1 в яких згідно [11] можна виділити та віднести до відповідних функціональних груп ряд характеристичних смуг. Розширена смуга в ІЧ-спектрі в області $3100\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ з максимумом при 3269 см^{-1} відповідає валентним коливанням О-Н груп адсорбованої або включеної до структури гелю води. В КР- та ІЧ-спектрах, смуги в області $3100\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ відповідають валентним коливанням С-Н різних вуглеводневих фрагментів, зокрема акрилових сополімерів з поліамідами, що узгоджується зі спектрами доступними в базах даних стандартної комплектації ІЧ та КР-спектрометрів. Смуга при 2780 см^{-1} (ІЧ) та 2785 см^{-1} (КР), відповідає коливанням N-H триалкіламонійної групи R_3NH^+ . Інтенсивна смуга в ІЧ-спектрі при 1638 см^{-1} , яка слабо проявляється в КР-спектрі при 1647 см^{-1} відповідає коливанням амідної групи. Смуга при 1552 см^{-1} (ІЧ), ймовірно відповідає деформаційним коливанням амідного фрагмента $-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}-$. Таким чином, активними адсорбційними центрами поверхні Граніону АВА-Г1 є триалкіламонійні групи.

Побудову ізотерм сорбції КО поверхнею аніоніту Граніон АВА-Г1, а також вивчення процесів сорбції-десорбції у подальшому проводили за оптимальних умов (табл. 1). Ізотерми адсорбції за різних температур наведено на рис. 2.

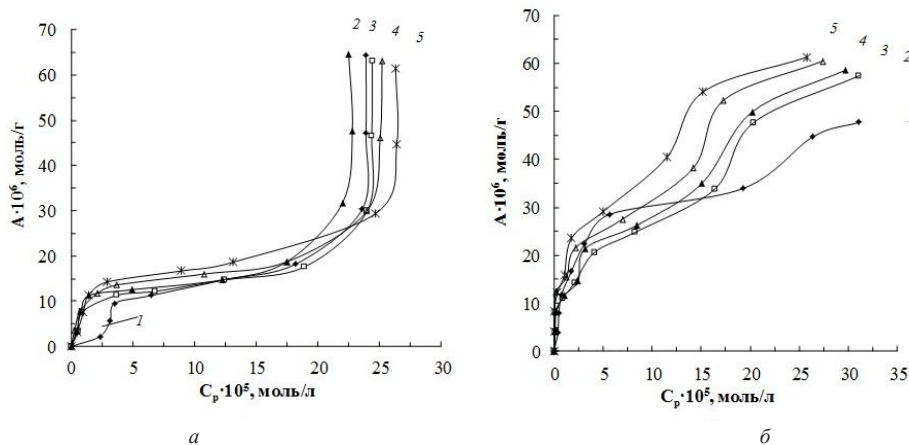


Рис. 2. Ізотерми сорбції КО аніонітом Граніон АВА-Г1, які отримані при рН 5 (а) та рН 9 (б) при різних температурах Т, К: 1 – 293; 2 – 298; 3 – 303; 4 – 308; 5 – 313.

Враховуючи встановлені за допомогою методів ІЧ та КР-спектроскопії особливості поверхні Граніон АВА-Г1, а також геометрію КО, можна припустити, що на початку формування адсорбційного шару, молекули сорбату ймовірно розташовані на поверхні планарно, в наслідок чого частина активних центрів аніоніту «блокуються». При збільшенні початкової концентрації сорбату в розчині може

відбуватися переорієнтація його молекул відносно поверхні іоніту до вертикального, що супроводжується збільшенням адсорбційних центрів, які приймають участь у процесі сорбції. Останнє підтверджують значення граничної адсорбції (A_{∞}) (табл. 2), які встановлені за початковими ділянками ізотерм сорбції.

Таблиця 2

Значення A_{∞} при вилученні КО аніоном Граніон АWA-G1 у статичному режимі при варіюванні температури

T, К	$A_{\infty} \cdot 10^6$, моль/г	
	Граніон АWA-G1 (рН 5)	Граніон АWA-G1 (рН 9)
293	9,6	28,6
298	7,6	47,6
303	11,3	49,9
308	13,6	52,3
313	14,2	54,0

З підвищенням температури (табл. 2) збільшується кількість сорбованого КО, що обумовлене прискоренням процесу переорієнтації молекул сорбату на поверхні сорбенту. Оскільки Ван дер Ваальсівські площі іонів КО, які домінують при рН 5 ($S_{H_3R^{3-}} = 866,67 \text{ \AA}^2$) та рН 9 ($S_{H_2R^{4-}} = 865,39 \text{ \AA}^2$), суттєво не відрізняються, тому більший внесок в специфіку формування адсорбційного шару при різній кислотності середовища має величина заряду КО, що супроводжується збільшенням значень A_{∞} більше ніж у три рази (табл. 2).

Порівняльний аналіз початкових ділянок ізотерм сорбції, отриманих при рН 5 (рис. 2а) в області невеликих концентрацій сорбату ($2 \cdot 10^{-5} \div 9 \cdot 10^{-5} \text{ М}$) дозволяє відмітити перехід типу ізотерми сорбції КО у вигляді частки H_3R^{3-} за допомогою Граніон АWA-G1 з S3-типу (при 293 К, крива 1) на L3-тип ($\geq 298 \text{ К}$, криві 2-5). Останнє може бути обумовлено зміною механізму сорбції внаслідок підвищення температури у сорбційній системі та переваги взаємодії типу «сорбат - поверхня сорбенту» над взаємодією «сорбат - сорбат». Слід відмітити, що при рН 9 (рис. 2б), початкові ділянки ізотерм сорбції КО (криві 1-5) відносяться до H4-типу, що відповідає високій спорідненості адсорбату до поверхні сорбенту і пояснюється наявністю локалізованих зарядів на поверхні аніоніту та більшим негативним зарядом аніонної форми (H_2R^{4-}) КО в наслідок чого формування адсорбційного шару відбувається переважно за рахунок електростатичних сил.

Для встановлення термодинамічних параметрів сорбції КО аніоном Граніон АWA-G1, побудовані ізотерми сорбції оброблені з використанням лінеаризованої форми рівняння Ленгмюра [9, 12] (табл. 3).

Таблиця 3

Значення термодинамічних параметрів сорбційного вилучення КО аніонітом Граніон АWA-G1

Т, К	рН 5				рН 9				
	298	303	308	313	293	298	303	308	313
$K \cdot 10^{-6}$	15,1	25,2	27,7	98,6	16,2	69,1	76,8	86,1	95,8
ΔG° кДж/моль	-40,9	-42,9	-43,9	-42,8	-38,4	-39,3	-39,6	-41,2	-43,1

Як видно з табл. 3, величини вільної енергії Гіббса (ΔG°) сорбції КО при рН 5 і 9 мають негативні значення, що вказує на довільний характер процесу сорбції та свідчить про те, що початковий процес формування адсорбційного шару відбувається переважно за рахунок хемосорбції.

Для визначення стійкості модифікованого КО аніоніта Граніон АWA-G1 та його придатності для використання в якості твердофазного реагенту досліджено десорбцію КО з поверхні аніоніту. При дослідженні десорбції КО встановлено, що дистильована вода та 1 М розчини сульфатної кислоти несуттєво десорбують КО ($S_{\text{дес}} \leq 25\%$). В той же час, 1 М розчин натрію гідроксиду десорбує КО з поверхні модифікованого аніоніту до $S_{\text{дес}} \approx 65\%$.

ВИСНОВКИ

Таким чином у роботі встановлені оптимальні умови вилучення КО за допомогою органополімерних аніонітів АВ-17-8 та Граніон АWA-G1 та показано, що найбільш ефективно КО сорбується слабоосновним аніонітом Граніон АWA-G1. Встановлено, що максимальне сорбційне вилучення (90-95%) КО Граніоном АWA-G1 відбувається за 60 хв при рН 5 і 9. На основі отриманих ізотерм сорбції та розрахованих термодинамічних параметрів зроблено припущення про механізм сорбції. Показано, що на механізм сорції КО поверхнею аніоніту Граніон АWA-G1 впливає температура та рН середовища. Встановлено, що модифікований за допомогою КО аніоніт Граніон АWA-G1 стійкий до десорбції водою та кислотами й може в подальшому використовуватись в якості твердофазного реагенту для вилучення і визначення різноманітних екотоксикантів з водних зразків різного походження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Золотов Ю.А., Цизин Г.И., Моросанова Е.И., Дмитриенко С.Г. Сорбционное концентрирование микрокомпонентов для целей химического анализа // Успехи химии. – 2005. – Т. 74, № 1. – С. 41–66. <https://doi.org/10.1070/RC2005v074n01ABEH000845>
2. Савин С.Б., Дедкова В.П., Швоева О.П. Сорбционно-спектроскопические и тест-методы определения ионов металлов на твердой фазе ионообменных материалов // Успехи химии. – 2000. – Т. 69, № 3. – С. 203–217. <https://doi.org/10.1070/RC2000v069n03ABEH000538>
3. Золотов Ю.А., Иванов В.М., Амелин В.Г. Химические тест-методы анализа. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 304 с.
4. Брыкина Г.Д., Марченко Д.Ю., Штигун О.А. Твердофазная спектрофотометрия // Ж. анал. химии. – 1995. – Т. 50, № 5. – С. 484–491.
5. Hulanicki A., Glab S., Ackerman G. Compleximetric indicators: characteristic sand applications // Pure Appl. Chem. – 1983. – Vol. 55. – P. 1137–1230. <https://doi.org/10.1351/pac197850050463>
6. Чеботарьев О.М., Єфімова І.С., Борисюк Н.А., Снігур Д.В. Метод кольорометрії в дослідженні кис-

- лотно-основных характеристик барвников растительного происхождения // Методы и объекты химического анализа. – 2011. Т. 6, №4. – С. 207-213.
7. *Белявская Т.А., Большова Т.А.* Хроматографический анализ неорганических веществ – М.: Изд-во Московского университета, 1970. – 142 с.
 8. *Пономарев В.Д.* Аналитическая химия. Часть 2. Количественный анализ. – М.: Высш. школа, 1982. – 288 с.
 9. *Ягдовский В.Д.* Адсорбция. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015. – 216 с.
 10. *Řehák B., Körbl J.* Metallochrome indikatoren VIII. Physikalisch-chemische untersuchung von xylenolorange und einige seiner chelate I. Dissoziationskonstanten von xylenolorange // Collect. Czech. Chem. Commun. – 1960. – Vol. 25. – P. 797-810. <https://doi.org/10.1135/cccc19600797>
 11. *Накамото К.* ИК спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений, — М.: Мир, 1991. — 536 с.
 12. *Фролов Ю.Т.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – М.: Химия, 1988. – 464 с.

Стаття надійшла до редакції 13.09.2018

А. Н. Чеботарёв, Е. М. Гузенко, Д. А. Барбалат, Д. В. Снигур
Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
65082, Одесса, ул. Дворянская, 2, alexch@ukr.net, guzenkodom@yandex.ua

СОРБЦИОННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОРГАНОПОЛИМЕРНЫХ АНИОНИТОВ КСИЛЕНОЛОВЫМ ОРАНЖЕВЫМ

Изучены особенности сорбционного извлечения ксиленолового оранжевого (КО) с помощью органополимерных анионитов АВ-17-8 и Граниион АWA-G1 в статическом режиме. Установлено, что максимальное сорбционное извлечение (90-95%) КО Граниион АWA-G1 проходит на протяжении 60 мин. при pH 5 и 9. На основе полученных изотерм сорбции и рассчитанных термодинамических характеристик сделан вывод, что формирование адсорбционного слоя происходит самопроизвольно по смешанному механизму. Показано, что с изменением температуры и pH среды тип изотерм изменяется с L3 на H4, что свидетельствует о высоком сродстве адсорбата к поверхности сорбента. При исследовании десорбции КО с поверхности анионита Граниион АWA-G1 установлено, что дистиллированная вода и 1 М растворы сульфатной кислоты незначительно десорбируют КО ($S_{\text{дес}} \leq 25\%$), в отличие от этого, десорбция КО 1 М растворами натрия гидроксида достигает $S_{\text{дес}} \sim 65\%$.

Ключевые слова: ксиленоловый оранжевый, сорбция, органополимерные анионообменники, АВ-17-8, Граниион АWA-G1.

A. N. Chebotarev, E. M. Guzenko, D. O. Barbalat, D. V. Snigur
Odessa I. I. Mechnikov National University, Dvoryankaya str., 2,
Odessa, 65082, Ukraine; email: alexch@ukr.net, guzenkodom@yandex.ua

MODIFICATION OF THE ORGANO-POLYMERIC ANIONITES SURFACE WITH XYLENOL ORANGE BY SORPTION

In this paper, the peculiarities of xylenol orange sorption removal with the help of organopolymeric anion exchangers AB-17-8 and Granion AWA-G1 in the static mode are studied. The state of the matrix and the surface of the organopolymeric anion exchanger granion AWA-G1 was characterized by the IR and Raman spectroscopy. It was established that at pH 5 and 9 the maximum sorption removal (90-95%) of xylenol orange by organopolymeric anion exchanger

Granion AWA-G1 lasts for 60 minutes. On the basis of the obtained sorption isotherms and the calculated thermodynamic characteristics, it was concluded that the formation of the adsorption layer occurs spontaneously by a mixed mechanism. The initial process of adsorption layer formation due to chemisorption mechanism. Below, at high concentration of xylenol orange the sorption mechanism changes to the physical nature. It was shown that with changes in temperature and pH, the type of isotherms changes from L3 to H4, which indicates a high affinity of the adsorbate to the adsorbent surface. The obtained sorption isotherms are satisfactorily described by the Langmuir adsorption model. It was shown that the increase in temperature is accompanied by an increase in the amount of sorbed xylenol orange, which is due to the acceleration of the process of reorientation of sorbate molecules to the vertical. In the study of xylenol orange desorption from the Granion AWA-G1 anionite surface, it was found that distilled water and 1 M solutions of sulphuric acid slightly desorb xylenol orange ($S_{des} \leq 25\%$), in contrast, the desorption of xylenol orange with 1 M sodium hydroxide solutions reaches $S_{des} \sim 65\%$. Thus, the organopolymeric anion exchanger granion AWA-G1 modified with xylenol orange is resistant to water and acid desorption and can subsequently be used as a solid-phase reagent.

Keywords: xylenol orange, sorption, organopolymeric anion-exchangers, AB-17-8, Granion AWA-G1.

REFERENCES

1. Zolotov Yu.A., Tsysin G.I., Morosanova E.I. Dmitrienko S.G. *Sorption preconcentration of microcomponents for chemical analysis*. Russ. Chem. Rev., 2005, vol. 74, no 1, pp. 37-60. <https://doi.org/10.1070/RC2005v074n01ABEH000845>
2. Savin S.B., Dedkova V.P., Shvoyeva O.P. *Sorption-spectroscopic and test methods for the determination of metal ions on the solid-phase of ion-exchange materials*. Russ. Chem. Rev., 2000, vol. 69, no 3, pp. 187-200. <https://doi.org/10.1070/RC2000v069n03ABEH000538>
3. Zolotov YU.A., Ivanov V.M., Amelin V.G. *Khimicheskiye test-metody analiza* [Chemical test methods of analysis]. Moscow, 2002, 304 p. (in Russian)
4. Brykina G.D., Marchenko D.YU., Shpigun O.A. *Tvordofaznaya spektrofotometriya*. J. Anal. Chem., 1995, vol. 50, no 5, pp. 484 - 491.
5. Hulanicki A., Glab S., Ackerman G. *Slozhnyye pokazateli: kharakternyye prilozheniya dlya peska*. Pure Appl. Chem, 1983, vol. 55, pp. 1137-1230. <https://doi.org/10.1351/pac197850050463>
6. Chebotaryov O.M., Efimova I.S., Borisyuk N.A., Snigur D.V. *Metod kol'orometrii v doslidzhenni kislотно-osnovnykh kharakteristik barvnykh roslinnogo pokhodzhennya*. Methods Objects Chem. Anal., 2011, vol. 6, no 4, pp. 207-213. (in Ukrainian)
7. Belyavskaya T.A., Bol'shova T.A. *Khromatograficheskiy analiz neorganicheskikh veshchestv* [Chromatographic analysis of inorganic substances]. Moscow, 1970, 142 p.
8. Ponomarev V.D. *Analiticheskaya khimiya. Chast' 2. Kolichestvennyy analiz* [Analytical chemistry. Part 2. Quantitative analysis]. Moscow, 1982, 288 p. (in Russian)
9. Yagodovskiy V.D. *Adsorbtsiya* [Adsorption]. Moscow, 2015, 216 p. (in Russian)
10. Řehák B., Körbl J. *Metallochrome indikatoren VIII. Physikalisch-chemische untersuchung von xylenolorange und einige seiner chelate I. Dissoziationskonstanten von xylenolorange*. Collect. Czech. Chem. Commun, 1960, vol. 25, pp. 797-810. <https://doi.org/10.1135/cccc19600797>
11. Nakamoto K. *IK spektry i spektry KR neorganicheskikh i koordinatsionnykh soyedineniy* [IR spectra and Raman spectra of inorganic and coordination compounds]. Moscow, 1991, 536 p. (in Russian)
12. Frolov Y.T. *Kurs kolloidnoy khimii. Poverkhnostnyye yavleniya i dispersnyye sistemy* [The course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems]. Moscow, 1988, 464 p. (in Russian)