

УДК: 543.054:543.3:543.48

Д. В. Снігур, О. М. Жуковецька, О. М. Гузенко, О. М. Чеботарьов
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, Україна, 65082; e-mail: 270892denis@gmail.com

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СТИБІЮ(III) З ПЕРХЛОРАТОМ 6,7-ДИГІДРОКСИ-4-КАРБОКСИЛ-2- ФЕНІЛБЕНЗОПІРИЛІО

В даній роботі вивчено особливості комплексоутворення Стибію(III) з перхлоратом 6,7-дигідрокси-4-карбоксил-2-фенілбензопірилію (КДХ) у подвійних системах та у присутності катіонних поверхнево-активних речовин (кПАР). Із застосуванням класичних спектрофотометричних методів молярних відношень та зсуву рівноваги встановлено, що у подвійних системах утворюються два комплекси із стехіометрією Sb(III): КДХ 1:2 та 1:3 при рН 2,5 та рН 6,0 відповідно. Для комплексів Sb(III) з КДХ розраховано молярні коефіцієнти світлопоглинання, які складають $1,2 \cdot 10^4$ та $1,1 \cdot 10^4$ відповідно. Показано, що в присутності катіонних поверхнево-активних речовин хлориду цетилпіридинію або бромиду цетилтриметиламонію утворюються комплекси із молярним співвідношенням компонентів Sb(III): КДХ: кПАР = 1:3:3. Показано, що в присутності катіонних поверхнево-активних речовин не відбувається зсуву оптимального рН комплексоутворення, проте спостерігається збільшення кількості координованих молекул реагенту КДХ за рахунок розпушення гідратної оболонки іона Sb(III) внаслідок гідрофобної гідратації комплексу. До того ж введення катіонних поверхнево-активних речовин призводить до батохромного зсуву смуги поглинання на 10–15 нм та збільшення молярного коефіцієнту світлопоглинання до $2,8 \cdot 10^4$ та $3,0 \cdot 10^4$ при використанні хлориду цетилпіридинію або бромиду цетилтриметиламонію відповідно. Розроблено методику спектрофотометричного визначення Стибію(III) із застосуванням аналітичної форми на основі потрійного комплексу Sb(III): КДХ: кПАР = 1:3:3, яку було апробовано при аналізі зразків полімерних матеріалів (поліетилентерефталат). Зазначено, що розроблена методика характеризується задовільною відтворюваністю та не поступається за чутливістю відомим аналогам.

Ключові слова: спектрофотометрія, перхлорат 6,7-дигідрокси-4-карбоксил-2-фенілбензопірилію, комплексоутворення, Стибій(III), аналіз полімерних матеріалів.

Стибій та його сполуки широко застосовуються у різних галузях промисловості [1]. Для визначення Стибію запропоновано атомно-спектральні методи: атомно-абсорбційні, атомно-емісійні та атомно-флуоресцентні [2, 3], яким попри високу чутливість характерні трудомісткість і висока вартість. Необхідно зазначити, що завдяки своїй простоті, надійності, економічності та доступності відповідної апаратури спектрофотометричні методи визначення Стибію знайшли широкого застосування. Найбільш поширені методики визначення Стибію ґрунтуються на утворенні та екстракції йонних асоціатів його ацидокомплексів з основними барвниками трифенілметанового, ксантенового або поліметинового ряду [4]. Невисока відтворюваність й стадійність цих методів ускладнює та подовжує аналіз. Відомі органічні реактиви, такі як триоксифлуорони, флавоноїди, гетероциклічні азосполуки тощо не знайшли широкого застосування у зв'язку з відсутністю помітних переваг перед методами, які ґрунтуються на утворенні йонних асоціатів [4–6].

Отже, пошук нових аналітичних реагентів, позбавлених зазначених недоліків залишається актуальним завданням. На нашу думку уваги заслуговують 2,4-заміщені похідні солей 6,7-дигідроксибензопірилію, які у практиці хімічного аналізу використовуються як чутливі реагенти для спектрофотометричного визначення іонів ряду полівалентних металів [7]. Серед описаних похідних 6,7-дигідроксибензопірилію найбільш чутливими реагентами є солі 6,7-дигідроксо-2,4-дифенілбензопірилію та 6,7-дигідроксо-2-феніл-4-карбоксилбензопірилію (КДХ), а використання останнього відкриває можливість підвищення чутливості та селективності за рахунок взаємодії з катіонними поверхнево-активними речовинами (ПАР).

Таким чином, мета представленої роботи полягає в дослідженні та оптимізації умов взаємодії $Sb(III)$ з перхлоратом 6,7-дигідроксо-2-феніл-4-карбоксилбензопірилію в присутності катіонних ПАР, визначенні хіміко-аналітичних характеристик комплексів та обґрунтування вибору нової аналітичної форми для спектрофотометричного визначення $Sb(III)$.

РЕАКТИВИ ТА АПАРАТУРА

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 та 3 см. 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. Для визначення $Sb(III)$ методом оптико-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-ОЕС) використовували спектрометр Optima 2100DV (Perkin-Elmer, USA) з кварцовим пальником. Операційні параметри спектрометру: потужність 1300 Вт, витрати аргону (подача проби – 0,8 л/хв, допоміжний потік – 0,2 л/хв, плазмоутворюючий потік – 15 л/хв), аксіальне спостереження плазми, швидкість подачі аналізованого розчину – 1,5 мл/хв, час розпилення – 45 с, аналітична лінія $Sb\ I\ 206,836\text{ нм}$.

Реагент КДХ, подібно до інших похідних 6,7-дигідроксибензопірилію [8, 9], синтезували шляхом конденсації пірогалолу А з бензоїлпіровіноградною кислотою в оцтовокислому середовищі в присутності перхлоратної кислоти. Вихідний розчин КДХ з концентрацією $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л готували розчиненням точної наважки реактиву в етанолі. Стандартний 0,1 моль/л розчин $Sb(III)$ готували розчиненням 1,2176 г металеві сурми (ос. ч) у концентрованій хлоридній кислоті розбавляли 0,1 моль/л розчином HCl до 100 мл. Вихідні $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л розчини катіонних ПАР хлориду цетилпіридинію (ЦПСІ) та броміду цетилтриметиламонію (ЦТАБ) готували розчиненням їх точних наважок у дистильованій воді. Розчини з меншими концентраціями готували розведенням вихідних безпосередньо перед використанням. У роботі застосовували реактиви кваліфікації не нижче «х.ч.», необхідну кислотність створювали розчинами сульфатної, хлоридної, нітратної кислот та натрій гідроксиду, а також з використанням універсального буферного розчину.

Для оптимізації умов проведення реакції комплексоутворення розчини $Sb(III)$ та КДХ з концентрацією в інтервалі $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4}$ моль/л, змішували у різних мольних співвідношеннях, в інтервалі $pH\ 1 \div 8$, а для стабілізації комплексу в розчині вводили 2 мл 1% розчину полівінілового спирту та реєстрували оптичну густину.

Для дослідження впливу катіонних ПАР на умови утворення та характеристики аналітичних форм на основі продуктів взаємодії Sb(III) з КДХ у досліджуваних системах варіювали їх вміст в інтервалі концентрацій $1 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

Стехіометрію продуктів взаємодії в подвійних та потрійних системах, молярні коефіцієнти світлопоглинання та відповідні константи стійкості визначали класичними спектрофотометричними методами [10].

Для визначення Sb(III) в зразках пластику (поліетилентерефталат), наважки матеріалу (0,2–0,4 г) термічно розкладають в муфельній печі за температури 500–550 °С, а зольний залишок розчиняють в невеликій кількості концентрованої хлоридної кислоти. Другим варіантом пробопідготовки є кип'ятіння наважки (0,2–0,4 г) матеріалу в царській воді для вилучення Sb(III) , одержаний розчин фільтрують, а одержаний фільтрат використовують для аналізу. Для спектрофотометричного визначення Sb(III) в розчин, який одержано після пробопідготовки, вносять 5 мл розчину КДХ з концентрацією $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л та 5 мл $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л розчину кПАР (ЦПСІ або ЦТАБ). В одержаних розчинах встановлюють рН 2,5 та розбавляють дистильованою водою до 50 мл. Світлопоглинання вимірюють відносно розчину холостого досліду ($l = 1$ см). Для ІЗП-ОЕС визначення Sb(III) , розчини одержані після пробопідготовки, розбавляють дистильованою водою до 50 мл та після необхідного розведення вводять в аргоніву плазму пальника спектрометра.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Відомо [11], що реагент КДХ при рН 2,5 та 6,0 характеризується смугами поглинання при 440 та 460 нм відповідно. Комплексоутворення з Sb(III) супроводжується батохромним зсувом до 505 нм при рН 2,5. При збільшенні рН до 6,0 спостерігається утворення нового комплексу з максимумом поглинання при 515 нм. При введенні в систему кПАР (ЦПСІ, ЦТАБ) спостерігаються незначні батохромні зсуви смуги поглинання КДХ при рН 2,5 на 10–15 нм та гіперхромні ефекти. Комплекси, які утворюються в потрійних системах характеризуються максимумами поглинання при 520 та 525 нм у випадку використання ЦПСІ та ЦТАБ відповідно.

Вплив кислотності середовища на комплексоутворення в подвійних « Sb(III) -КДХ» та потрійних « Sb(III) -КДХ-кПАР» системах наведено на рис. 1.

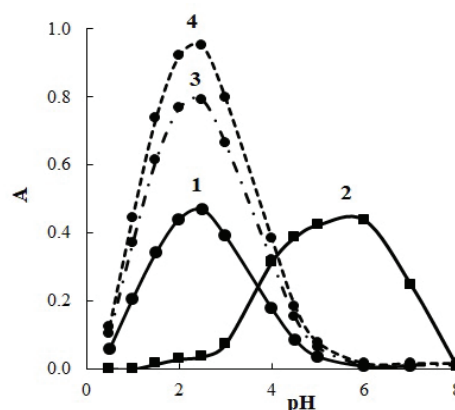


Рис. 1. Вплив кислотності середовища на взаємодію Sb(III) з КДХ в подвійних системах (1–505 нм; 2–515 нм) та потрійних системах (3–520 нм, ЦПСІ; 4–525 нм, ЦТАБ); $l = 2$ см; $C_{\text{Sb(III)}} = 2 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $C_{\text{КДХ}} = 2 \cdot 10^{-4}$ моль/л; $C_{\text{кПАР}} = 2 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

Fig. 1. Influence of medium acidity on the interaction of Sb(III) with reagent in binary systems (1–505 nm; 2–515 nm) and ternary systems (3–520 nm, CPIC; 4–525 nm, CTAB); $C_{\text{Sb(III)}} = 2 \cdot 10^{-5}$ mol/L; $C_{\text{R}} = 2 \cdot 10^{-4}$ mol/L; $C_{\text{Surf}} = 2 \cdot 10^{-4}$ mol/L; $l = 2$ sm.

З рис. 1 видно, що у водних розчинах Sb(III) утворює з КДХ два комплекси, максимальний вихід яких спостерігається при рН 2,5 та рН 6,0 відповідно. Необхідно зазначити, що в присутності кПАР суттєвого зміщення оптимального рН комплексоутворення не спостерігається.

Склад комплексів Sb(III) з КДХ у подвійних та потрійних системах визначали в оптимальних умовах їх утворення класичними спектрофотометричними методами: молярних відношень та зсуву рівноваги (рис. 2).

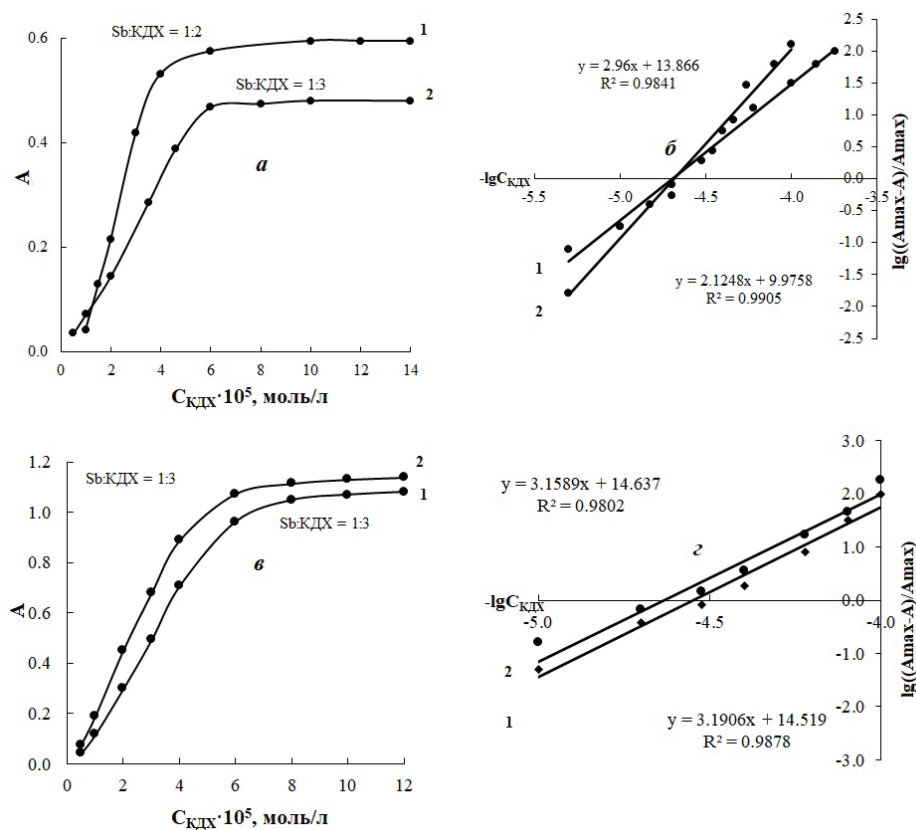


Рис. 2. Визначення складу комплексів в досліджуваних системах: Sb(III)-КДХ методами молярних відношень (а) та зсуву рівноваги (б) при рН 2,5 (1) та рН 6,0 (2); в потрійних системах Ві(III)-КДХ-кПАР (1 – ЦПСІ; 2 – ЦТАБ) методами молярних відношень (в) та зсуву рівноваги (г) при рН 2,5; $C_{Sb(III)} = 2 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $C_{KDX} = 2 \cdot 10^{-4}$ моль/л; $C_{кПАР} = 2 \cdot 10^{-4}$ моль/л; $l = 2$ см.

Fig. 2. Determination of the composition of complexes in studied systems: in binary system via molar ratios (a) and equilibrium shift (b) methods at pH 2.5 (1) and pH 6.0 (2); in ternary systems (1 – CPCL; 2 – CTAB) by molar ratios (c) and equilibrium shift method (d) at pH 2.5; $C_{Sb(III)} = 2 \cdot 10^{-5}$ mol/L; $C_R = 2 \cdot 10^{-4}$ mol/L; $C_{Surf} = 2 \cdot 10^{-4}$ mol/L; $l = 2$ sm; $l = 2$ sm.

Аналіз даних наведених на рис. 2а та 2б дозволяє стверджувати, що в досліджуваних бінарних системах утворюється два комплекси із молярним співвідношенням Sb(III): КДХ 1:2 та 1:3 при рН 2,5 та рН 6,0 відповідно. Як видно з рис. 2 (в, г) в присутності катіонних ПАР в кислому середовищі при рН 2,5 утворюються комплекси із молярним співвідношенням Sb(III): КДХ = 1:3. Із залученням методу молярних відношень встановлено, що до складу потрійного комплексу входять по три катіони кПАР, як у випадку ЦПСІ, так і випадку ЦТАБ, оскільки єдиним можливим центром взаємодії, як КДХ, так і стибієвого комплексу з кПАР, є карбоксильні групи.

Хіміко-аналітичні характеристики нових аналітичних форм на основі комплексів Sb(III) з КДХ та кПАР узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1

Хіміко-аналітичні характеристики комплексів Sb(III) з КДХ та кПАР

Table 1

The analytical characteristics of complexes of Sb(III) with reagent and cationic surfactants

Система	Sb: КДХ: кПАР	рН	$\lambda_{\text{макс}}$, нм	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\lg \beta$
Sb(III)-КДХ	1:2	2,5	505	1,2	9,9
Sb(III)-КДХ	1:3	6,0	515	1,1	14,1
Sb(III)-КДХ-ЦПСІ	1:3:3	2,5	520	2,8	14,5
Sb(III)-КДХ-ЦТАБ	1:3:3	2,5	525	3,0	14,6

З табл. 1 видно, що у подвійній системі Sb(III)-КДХ в залежності від рН середовища можуть утворюватися два комплекси різної стехіометрії. В присутності кПАР спостерігається збільшення кількості координованих молекул КДХ, яке можна пояснити розрихленням гідратної оболонки іона Sb(III) внаслідок гідрофобної гідратації комплексу, що узгоджується з даними роботи [12]. Аналізуючи табл. 1 можна дійти висновку, що в якості аналітичних форм найбільш доцільно розглядати комплекс Sb(III) з КДХ, який утворюється при рН 2,5 в присутності кПАР.

Визначено вплив деяких іонів, які можуть заважати визначенню Sb(III). Встановлено, що визначенню не заважають іони лужних та лужноземельних металів, а ряд інших не заважають у таких молярних співвідношеннях 1:450 (Cd^{2+} , Pb^{2+} , Co^{2+}); 1:250 (Zn^{2+} , Cu^{2+} , Al^{3+} , Cr^{3+} , Ni^{2+}), а також 1000-кратні кількості сульфатів, нітратів, хлоридів, 500-кратні кількості фосфатів. Визначанню заважають іони Fe(II) і Fe(III), негативний вплив яких можна нівелювати осадженням їх гідроксидів розчином амоніаку або маскуванням фторидом натрію.

На основі аналітичної форми – потрійного комплексу Sb(III): КДХ: ЦПСІ розроблено методику спектрофотометричного визначення Sb(III), яку було апробовано при аналізі зразків пластику (поліетилентерефталату), а одержані результати узагальнено в табл. 2. Градувальний графік лінійний ($R^2 = 0,999$) в інтервалі концентрацій 0,15–8,0 мкг/мл Sb(III) та описується рівнянням $A = 0,0964C_{\text{Sb(III)}} + 0,0142$ ($l = 1$ см).

Таблиця 2

Результати визначення Sb(III) у зразках поліетилентерефталату (n=3, P=0,95)

Table 2

The results of the Sb(III) determination in PET samples (n=3, P=0,95)

Зразок	Вміст Sb(III), мг/кг	RSD, %	*Вміст Sb(III), мг/кг	RSD, %
Зразок 1	544,3±31,7	4,7	549,5±33,4	4,9
Зразок 2	170,7±10,2	4,8	174,3±11,1	5,1

*Визначено методом ІЗП-ОЕС.

Аналіз даних наведених в табл. 2 дозволяє зробити висновок, що розроблена методика характеризується відносним стандартним відхиленням, яке не перевищує 5,0%, а близькість з результатами визначення альтернативним методом ІЗП-ОЕС, свідчить про її правильність. В цілому, за своїми аналітичними характеристиками, розроблена методика визначення Sb(III) із КДХ не поступається відомим аналогам [4].

Таким чином, в результаті даної роботи вивчені особливості комплексоутворення Sb(III) з перхлоратом 6,7-дигірокси-4-карбоксил-2-фенілбензопірилію у подвійних системах та у присутності катіонних поверхнево-активних речовин. Встановлено, що у подвійних системах утворюються два комплекси із стехіометрією 1:2 та 1:3 при рН 2,5 та рН 6,0 відповідно. Показано, що в присутності хлориду цетилпіридинію або броміду цетилтриметриламонію утворюються комплекси із молярним співвідношенням Sb(III): КДХ: кПАР = 1:3:3. Розроблено методику спектрофотометричного визначення Sb(III) із застосуванням аналітичної форми на основі потрійного комплексу, яка характеризується задовільною відтворюваністю, не поступається за чутливістю відомим аналогам та була успішно апробована при аналізі полімерних матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Norman N. C. Chemistry of Arsenic, Antimony and Bismuth. Springer, 1998. – 484 p.
2. Li Z., Yang X., Guo Y., Li H., Feng Y. Simultaneous determination of arsenic, antimony, bismuth and mercury in geological materials by vapor generation-four-channel non-dispersive atomic fluorescence // *Talanta*. – 2008. – Vol. 74, N4. – P. 915–921. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.07.028>.
3. Манишин В. И., Винокурова Е. К., Дорошенко А. И. Определение сурьмы и висмута в пробах серебряных припоев атомно-эмиссионным с индукционной плазмой методом с применением гидридного генератора непрерывного // *Методы и объекты хим. анализа*. – 2009. – Т. 4, № 2. – С. 127–129.
4. Марченко З., Бальцежак М. Методы спектрофотометрии в УФ и видимой области в неорганическом анализе: пер. с польск. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 711 с.
5. Иванов В. М. Гетероциклические азотсодержащие азосоединения. М.: Наука, 1982. – 230 с.
6. Назаренко В. А., Антонович В. П. Триоксифлуорены. – М.: Наука, 1973. – 182 с.
7. Чеботарьов О. М., Топоров С. В., Снігур Д. В., Барбалат Д. О. Похідні 6,7- та 7,8-дигідроксибензопірилію: синтез, властивості та аналітичне застосування (огляд) // *Вісник ОНУ. Хімія*. – 2021. – Т. 26, № 2(78). – С. 73–88. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.2\(78\).233829](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.2(78).233829)
8. Snigur D., Barbalat D., Fizer M., Chebotarev A., Shishkina S. Synthesis and properties of 6,7-dihydroxybenzopyrylium perchlorate halogen derivatives: X-ray, spectroscopic and theoretical studies // *Tetrahedron*. – 2020. – Vol. 76. – P. 131514. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2020.131514>

9. Barbalat D.A., Chebotarev A.N., Snigur D.V. Anion nature influence on spectral and some physico-chemical properties of 6,7-dihydroxy-4-methyl-2-phenylchromenylium salts // Russ. J. Gen. Chem. – 2020. – Vol. 90, N4. – P. 597–601. <https://doi.org/10.1134/S1070363220040064>
10. Булатов М.И., Калинин И.П. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. М.: Химия, 1985. – 432 с.
11. Снігур Д.В., Барбалат Д.О., Жуковецька О.М., Гузенко О.М., Щербакова Т.М., Чеботарьов О.М. Спектрофотометричне визначення Вісмуту(III) з перхлоратом 6,7-дигідрокси-4-карбоксил-2-фенілбензопірілію // Вісник ОНУ. Хімія. – 2022. – Т. 27, № 1(81). – С. 61–72. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1\(81\).255832](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1(81).255832)
12. Савин С.Б., Чернова Р.К., Штыков С.Н. Поверхностно-активные вещества. М.: Наука, 1991. – 251 с.

Стаття надійшла до редакції 27.07.2022

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

SPECTROPHOTOMETRIC DETERMINATION OF STIBIUM (III) WITH 6,7-DIHYDROXY-4-CARBOXYL-2-PHENYLBENZOPYRILIUM PERCHLORATE

In the current study, the peculiarities of the complexation of Stibium(III) with 6,7-dihydroxy-4-carboxyl-2-phenylbenzopyrylium perchlorate (CDC) in binary systems and in the presence of cationic surfactants (Surf) were studied. Using classical spectrophotometric methods of molar ratios and equilibrium shift, it was found that in two systems two complexes with stoichiometry Sb(III): CDC are formed: 1:2 and 1:3 at pH 2.5 and pH 6.0, respectively. Molar absorptivity coefficients were calculated for Sb(III) complexes with CDC, which are $1.2 \cdot 10^4$ and $1.1 \cdot 10^4$, respectively. It is shown that in the presence of cetylpyridinium chloride or cetyltrimethylammonium bromide complexes with a molar ratio of Sb(III): CDC: Surf = 1:3:3 are formed. In the presence of cationic surfactants there is no shift in the optimal pH of complexation, but there is an increase in the number of coordinated reagent molecules due to the loosening of the hydrate shell of the ion Sb(III) due to hydrophobic hydration of the complex. In addition, the introduction of cationic surfactants leads to a bathochromic shift of the absorption band by 10–15 nm and an increase in the molar absorptivity to $2.8 \cdot 10^4$ and $3.4 \cdot 10^4$ when cetylpyridinium chloride or cetyltrimethylammonium bromide were used respectively. The method of spectrophotometric determination of Stibium(III) was developed using an analytical form based on the ternary complex Sb(III): KDC: Surf = 1:3:3, which was tested during the analysis of samples of polymer materials (polyethylene terephthalate). It is noted that the developed technique is characterized by satisfactory reproducibility and is not inferior in sensitivity to known analogues.

Key words: spectrophotometry, 6,7-dihydroxy-4-carboxyl-2-phenylbenzopyrylium perchlorate, complexation, Stibium(III), polymer analysis.

REFERENCES

1. Norman N.C. *Chemistry of Arsenic, Antimony and Bismuth*. Springer, 1998, 484 p.
2. Li Z., Yang X., Guo Y., Li H., Feng Y. *Simultaneous determination of arsenic, antimony, bismuth and mercury in geological materials by vapor generation-four-channel non-dispersive atomic fluorescence*. *Talanta*, 2008, vol. 74, no 4, pp. 915–921. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.07.028>.
3. Manshilin V. I., Vinokurova Ye.K., Doroshenko A.I. *Opredeleniye sur'my i vismuta v probakh serebryanykh pripoyev atomno-emissionnyy s induktsionnoy plazmoy metodom s primeneniyyem gidridnogo generatora nepreryvnogo*. *Metody i ob'yekty khim. analiza*, 2009, vol. 4, no 2, pp. 127–129. (in Russian).
4. Marchenko Z., Bal'tsezhak M. *Metody spektrofotometrii v UF i vidimoy oblasti v neorganicheskom analize: per. s pol'sk.* [Methods spectrophotometry in the UV and visible range in inorganic analysis] Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2007, 711 p. (in Russian).
5. Ivanov V.M. *Geterotsiklicheskiye azotsoderzhashchiye azosoyedineniya*. [Heterocyclic nitrogen-containing azo compounds] Moscow, Nauka, 1982, 230 p. (in Russian).
6. Nazarenko V.A., Antonovich V.P. *Trioksisfluorony*. [Trioxylfluorones] – Moscow, Nauka, 1973, 182 p. (in Russian).
7. Chebotarev O. M., Toporov S.V., Snigur D.V., Barbalat D.O. *Pohidni 6,7- ta 7,8-dygidroksybenzopiryliju: syntez, vlastyvoli ta analitychne zastosuvannja (ogljad)*. *Visnyk ONU. Himija*, 2021, vol. 26, no 2(78), pp. 73–88. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.2\(78\).233829](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.2(78).233829). (in Ukrainian).
8. Snigur D., Barbalat D., Fizer M., Chebotarev A., Shishkina S. *Synthesis and properties of 6,7-dihydroxybenzopyrylium perchlorate halogen derivatives: X-ray, spectroscopic and theoretical studies*. *Tetrahedron*, 2020, vol. 76, no 42, p. 131514. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2020.131514>
9. Barbalat D.A., Chebotarev A.N., Snigur D.V. *Anion nature influence on spectral and some physico-chemical properties of 6,7-dihydroxy-4-methyl-2-phenylchromenylium salts*. *Russ. J. Gen. Chem.*, 2020, vol. 90, no 4, pp. 597–601. <https://doi.org/10.1134/S1070363220040064>
10. Bulatov M.I., Kalinkin I.P. *Prakticheskoye rukovodstvo po fotometricheskim metodam analiza* [Practical guidance on photometric methods of analysis]. Moscow: Chemistry, 1985, 432 p. (in Russian).
11. Snigur D.V., Barbalat D.O., Zhukovetska O.M., Guzenko O.M., Shherbakova T.M., Chebotarev O.M. *Spektrofotometrychne vyznachennja Vismutu(III) z perhloratom 6,7-dygidroksy-4-karboksyl-2-fenilbenzopiryliju*. *Visnyk ONU. Himija*, 2022, vol. 27, no 1(81), pp. 61–72. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1\(81\).255832](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1(81).255832). (in Ukrainian).
12. Savin S.B., Chernova R.K., Shtykov S.N. *Poverhnostno-aktivnye veshchestva* [Surfactants]. Moscow: Nauka, 1991, 251 p. (in Russian).