

КОМПЛЕКСОУТВОРЕННЯ ФЕРУМУ (II) ТА ФЕРУМУ (III) З ДЕЯКИМИ ПОХІДНИМИ СОЛЕЙ 6,7-ДИГІДРОКСИБЕНЗОПІРИЛІУ В РОЗЧИНАХ

*А. В. Демчук, К. К. Видиневичус, Б. Т. Зай, С. В. Топоров,
О. М. Жуковецька, Д. В. Снігур*

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Всеволода Змієнка, 2, Одеса 65082, Україна
e-mail: snigur@onu.edu.ua*

Зазначену роботу присвячено дослідженню комплексоутворення феруму (II) та феруму (III) з низкою алкіл- та феніл- похідних солей 6,7-дигідроксибензопірилію. Встановлено оптимальні умови взаємодії в досліджених хімічних системах: рН 3–7; $\lambda = 550\text{--}580$ нм. Методом молярних відношень та Бента – Френча встановлено, що за оптимальних умов ступінчасто утворюються комплекси зі співвідношенням компонентів 1 : 3. Молярний коефіцієнт світлопоглинання та логарифм константи стійкості ($\lg\beta$) для продукту складу 1:3 визначали методом Комаря. Вивчено інтервали лінійності калібрувального графіка, межі кількісного виявлення та визначення. З використанням солей 6,7-дигідрокси-2,4-дифенілбензопірилію розроблено методику прямого спектрофотометричного визначення феруму (III), яку апробовано за аналізу зразків водопровідної води, а її правильність було підтверджено методом ІЗП–ОЕС.

Ключові слова: солі 6,7-дигідроксибензопірилію, ферум(II), ферум (III) комплексоутворення, спектрофотометрія.

ВСТУП. Ферум є важливим елементом у життєдіяльності людини, нестача якого призводить до захворювань кровотворної системи та порушення розвитку дітей. Однак за підвищеного вмісту проявляється токсичність: при надходженні понад 200 мг феруму на добу настає гіпотичний сидероз. До того ж Fe(II, III) часто присутній у високих концентраціях у ґрунтових водах [1], що призводить до появи неприємного присмаку та червоного відтінку кольору води.

Використання водопровідної води з високим вмістом Fe(II, III) негативно впливає на промислове та побутове обладнання. Тому аналітичний контроль за вмістом феруму(II, III) в об'єктах навколишнього середовища, зокрема у природних та стічних водах потрібно проводити достатньо надійними методами.

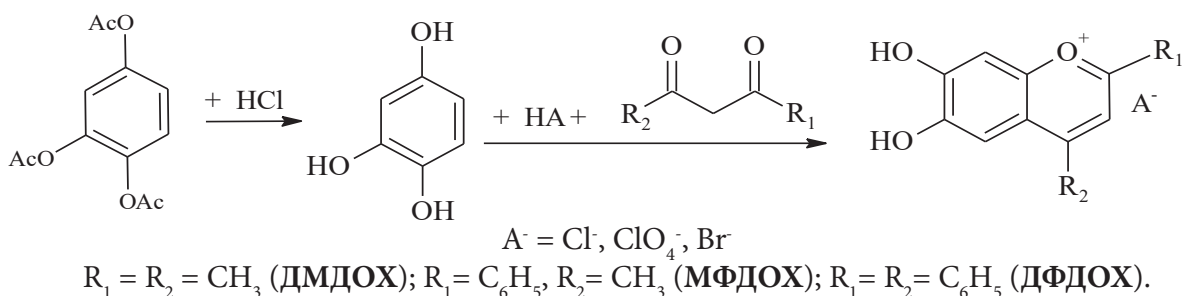
Хоча для визначення феруму запропоновано методи атомної спектроскопії: атомно-абсорбційна [2], оптико-емісійна з

індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-ОЕС) [3], мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою [4] та інші [5–6], вони обтяжені низкою проблем та, зокрема, вимагають коштовного обладнання та висококваліфікованого персоналу. Отже, спектрофотометрія залишається найбільш простим та доступним аналітичним методом визначення форм феруму. Вибірковими реагентами на Fe(III) є сполуки, що містять фенольні OH-групи та/або донорні атоми азоту, тому такі реагенти вважають найбільш раціональними для визначення вмісту феруму. До подібних реагентів можна віднести похідні 6,7 та 7,8-дигідроксибензопірилію (ДОХ), які легко одержати методами препаративного синтезу і, насамперед, конденсацією тригідроксибензенів із β -дикарбонільними сполуками [7–10]. Похідні ДОХ зарекомендували себе як високочутливі аналітичні реагенти в прямих та комбінованих спектрофотометричних методах аналізу [8]. Цікавим є не тільки комплексоутворення різних форм феруму з новими реагентами, а й вивчення впливу замісників в органічних

молекулах барвників бензопірилієвого ряду на процеси комплексоутворення [11].

Мета цієї роботи – це дослідження і оптимізація умов комплексоутворення феруму (II) та феруму (III) з деякими похідними солей бензопірилію, встановлення хімізму реакції, стехіометрії продуктів взаємодії, хіміко-аналітичних характеристик нових аналітичних форм та їхнє застосування у спектрофотометричному аналізі.

ЕКСПЕРИМЕНТ І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Похідні 6,7-дигідроксибензопірилію було синтезовано шляхом конденсації еквівалентних кількостей пірогалолу А та ацетилацетону (ДМДОХ), бензоїлацетону (МФДОХ) або дибензоїлметану (ДФДОХ) у крижаній оцтовій кислоті за наявності бромідної кислоти. Суміш реагентів кип'ятили протягом 30–40 хвилин, охолоджували, після чого фільтрували осад. Отримані реагенти – похідні 6,7-дигідрокси-бензопірилію – спочатку промивали крижаною оцтовою кислотою, а потім диізопропіловим етером, після чого висушували на повітрі. Вихід становив 50–70%.



Визначення чистоти продуктів виконували методом вискоєфективної рідинної хроматографії на нержавіючій сталевій колонці розміром 10 см $\times$ 4,6 мм, наповненій октадецилсилільним силікагелем із розміром частинок 3,5 мкм; рухома фаза: аце-

тонітрил-0,01% водний розчин мурашиної кислоти, співвідношення 50:50; швидкість рухомої фази 0,5 мл/хв; температура колонки в термостаті 35°C; об'єм інжекції 1 мкл; час аналізу 10 хв; детекція при $\lambda = 260$ нм. Чистота синтезованих реагентів за вну-

трішнім нормуванням становила щонайменше 99,0%.

Спектрофотометричні вимірювання проводили з використанням спектрофотометрів СФ-2000 та Specord 200 (діапазон довжин хвиль 200–1100 нм) у кюветах із товщиною поглинаючого шару 1, 2, 3 та 5 см.

Вимірювання рН розчинів проводили із використанням йономіру ЕВ-74, укомплектованого скляним індикаторним (ЭСЛ-63-07) та хлоридсрібним електродом порівняння (ЭВЛ-1М3), які перед початком вимірювань калібрували відносно стандартних буферних розчинів.

Для визначення вмісту феруму методом ІЗП-ОЕС використовували спектрометр Perkin-Elmer Optima 2100DV із кварцовим пальником. Вимірювання аналітичного сигналу проводили за наступних операційних параметрів: потужність плазми 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 введення аналізованого розчину – 1,5 мл/хв, час розпилення досліджуваного розчину – 45 с, аналітична лінія Fe 248,33 нм.

Вихідні розчини солей бензопірилію з концентрацією $1,0 \cdot 10^{-3}$ М готували розчиненням точних наважок у воді (ДМДОХ) та ізопропанолі (МФДОХ, ДФДОХ).

Основний стандартний розчин Fe(II), в якому міститься його $1 \cdot 10^{-2}$ моль/л, готували розчиненням точної наважки солі Мора в дистильованій воді, після охолодження до кімнатної температури доводять об'єм до 1 л. Основний стандартний розчин Fe(III), в якому міститься його $1 \cdot 10^{-2}$ моль/л, готують розчиненням точної наважки хлориду заліза (III) гексагідрату в дистильова-

ній воді, після охолодження до кімнатної температури доводять об'єм до 1 л. Розчини Fe(II) та Fe(III) стандартизували титрометрично.

Використовували реактиви не нижче ч. д. а., необхідну кислотність середовища створювали розчинами сульфатної кислоти і натрій гідроксиду. Для стабілізації аналітичних форм у розчинах використовували 1%-ий розчин полівінілового спирту (ПВС).

Для оптимізації умов проведення реакції комплексоутворення розчини Fe(II, III) і ДОХ із концентрацією $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³ змішували у різних мольних співвідношеннях в інтервалі рН 1 ÷ 10 (Δ рН = 0,5) та реєстрували інтенсивність світлопоглинання відносно розчину холостого досліджу. Стехіометрію продуктів взаємодії встановлювали методами молярних відношень та Бента – Френча; молярні коефіцієнти світлопоглинання та константи стійкості розраховували за методом Комаря.

Зміни в електронних спектрах світлопоглинання продуктів взаємодії феруму(II, III) з ДОХ загалом подібні. Для прикладу на рис.1 наведено спектри світлопоглинання в системах «Ферум(II, III) – ДФДОХ».

Як видно з рис. 1, реагент має одну широку смугу світлопоглинання з максимумом при 460 нм, а утворення комплексів призводить до появи нових смуг із максимумами при 550 нм та 555 нм у випадку Fe(II) та Fe(III) відповідно.

За оптимізації умов взаємодії феруму(II) та феруму (III) з ДОХ вивчено вплив кислотності середовища на комплексоутворення в досліджуваних системах. Як приклад (рис. 2) представлено результати, отримані при дослідженні систем «Fe(II)-ДФДОХ» та «Fe(III)-ДФДОХ».

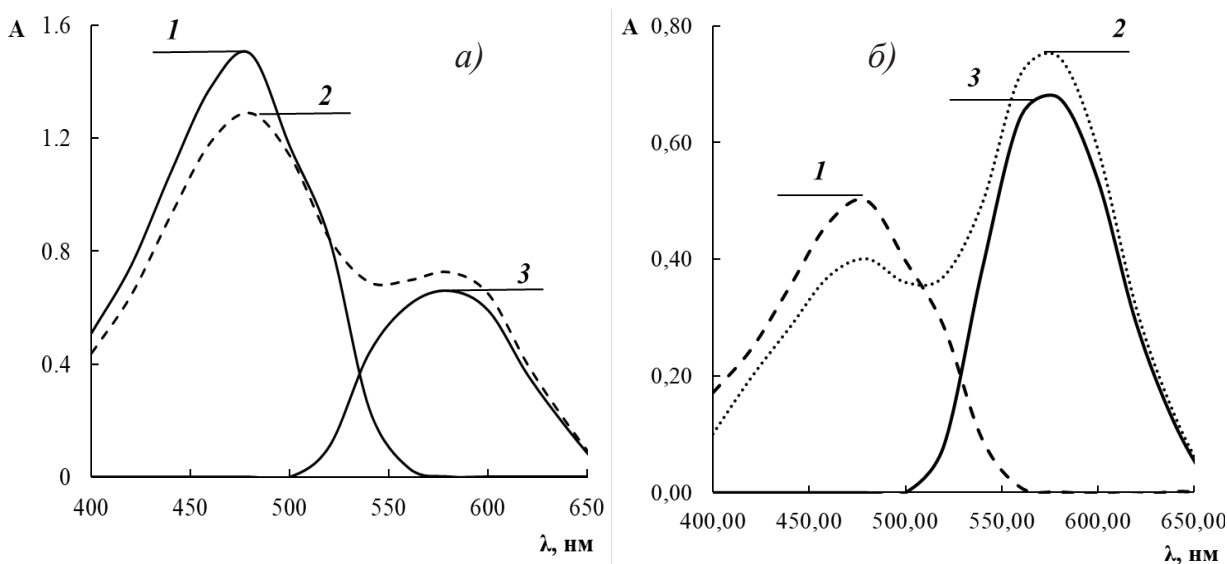


Рис. 1 Спектри світлопоглинання а) ДФДОХ (1) та його комплексу з Fe(II) (2; 3 – диференційний спектр); б) ДФДОХ (1) та його комплексу з Fe(III) (2; 3 – диференційний спектр), рН 3, $C_{\text{Fe(II)}} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $C_{\text{Fe(III)}} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $C_R = 4 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $l = 1$ см.

Fig. 1. Absorbance spectra of a) R (1) and its complex with Fe(II) (2; 3 – differential spectrum); b) R (1) and its complex with Fe(III) (2; 3 – differential spectrum), pH 3, $C_{\text{Fe(II)}} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ mol/L, $C_{\text{Fe(III)}} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ mol/L, $C_R = 4 \cdot 10^{-4}$ mol/L, $l = 1$ cm.

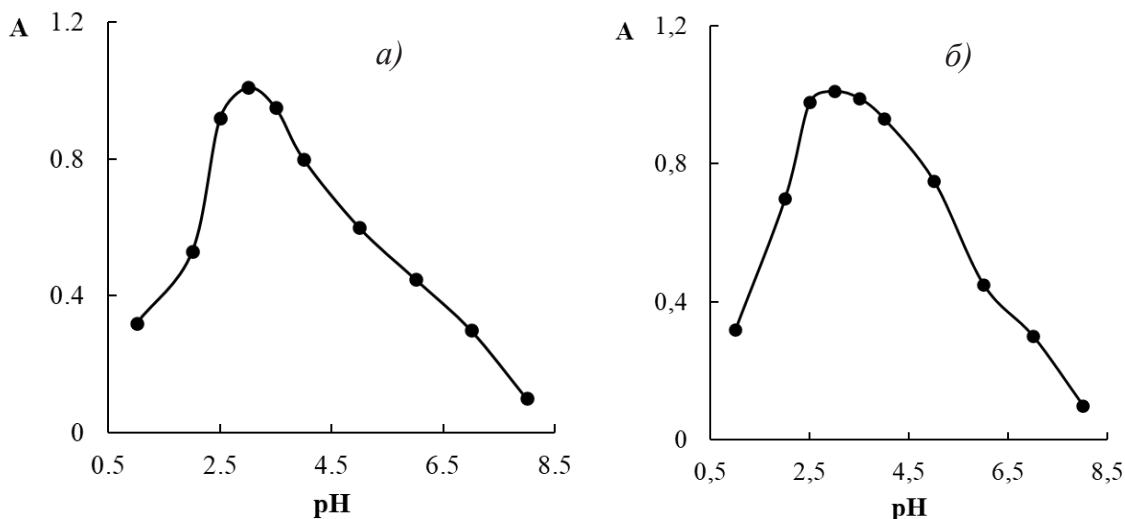


Рис. 2. Вплив рН на комплексоутворення а) феруму(II) (λ=550 нм), б) феруму(III) (λ=555 нм), із ДФДОХ, $C_{\text{Fe(II)}} = 2,0 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $C_{\text{Fe(III)}} = 2,0 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $C_R = 4 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $l = 1$ см

Fig. 2. Effect of pH on complexation of a) Iron(II) (λ=550 nm), b) Iron(III) (λ=555 nm) with R, $C_{\text{Fe(II)}} = 2,0 \cdot 10^{-5}$ mol/L, $C_{\text{Fe(III)}} = 2,0 \cdot 10^{-5}$ mol/L, $C_R = 4 \cdot 10^{-4}$ mol/L, $l = 1$ cm.

Із рис. 2а та 2б видно, що максимальний вихід комплексів із ДФДОХ спостерігаємо при рН 3. Встановлено, що порядок зливання реагентів не впливає на оптичну густину комплексів, забарвлення розвивається впродовж 25 хвилин та залишається сталим щонайменше протягом 2 годин, а для

стабілізації комплексів у розчині необхідно вводити в систему 5 мл ПВС із концентрацією 1%.

Склад комплексів феруму (II, III) з ДОХ встановлювали методом молярних відношень в оптимальних умовах їхнього утворення.

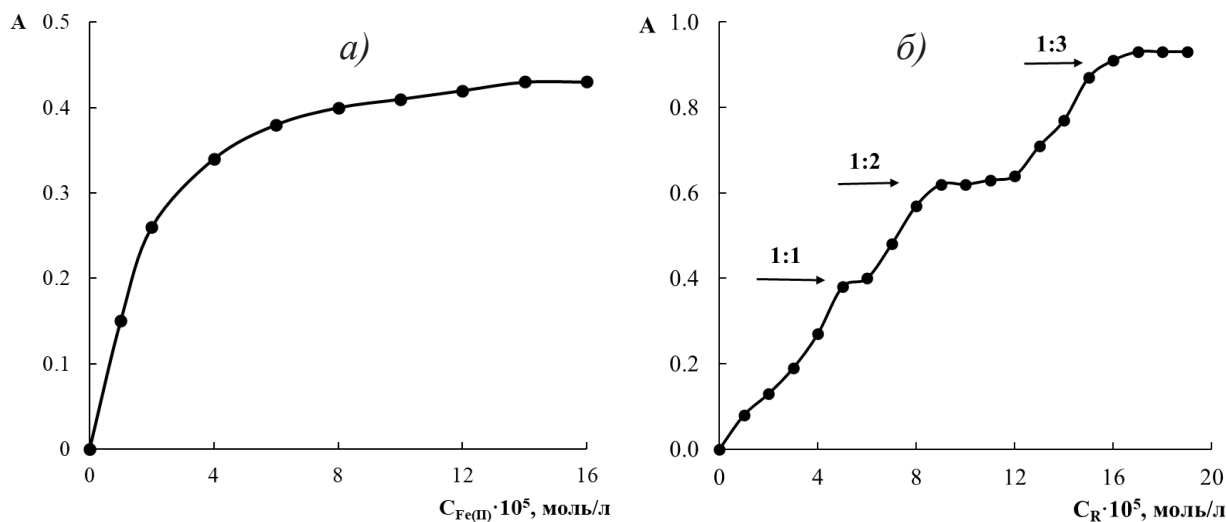


Рис. 3. Визначення стехіометрії продуктів комплексоутворення феруму(II) з ДФДОХ методом насичення за металом а): $C_R = 15 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $l = 1$ см та за лігандом б): $C_{Fe(II)} = 5 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $l = 2$ см; $\lambda = 550$ нм

Fig. 3. Determination of the stoichiometry of the complexation products of Iron(II) with R by the saturation method for the metal а): $C_R = 15 \cdot 10^{-5}$ mol/L, $l = 1$ cm and for the ligand б): $C_{Fe(II)} = 5 \cdot 10^{-5}$ mol/L, $l = 2$ cm; $\lambda = 550$ nm.

Аналіз даних, наведених на рис. 3а та 3б, дозволяє дійти висновку, що у досліджуваних системах до складу комплексу входить 1 йон феруму(II), а комплексоутворення відбувається ступінчасто з утворенням продуктів складу 1:1, 1:2 та 1:3. У випадку Fe(III) та інших лігандів (ДМДОХ, МФДОХ) взаємодія відбувається аналогічно. Додатково криву насичення за лігандом для кожної «сходинки»

опрацьовували методом Бента – Френча. На кожному етапі ступінчастого комплексоутворення відбувається приєднання по одній молекулі ліганду. Молярні коефіцієнти світлопоглинання та логарифм константи стійкості ($\lg \beta$) для продуктів складу 1:3 визначали методом Комаря, а основні хіміко-аналітичні характеристики комплексів узагальнено в Таблиці 1.

Табл. 1

Хіміко-аналітичні характеристики комплексів Fe(II) та Fe(III) з похідними солей 6,7-дигідроксибензопірилію

Table 1.

Analytical characteristics of Fe(II) and Fe(III) complexes with derivatives of 6,7-dihydroxybenzopyrylium salts.

Реагент		Метал	pH _{опт}	M:R	log β	$\lambda_{\text{макс}}$, нм	$\epsilon \cdot 10^{-4}$	LOD, мкг/л	LOQ, мкг/л
R ₁	R ₂								
CH ₃	CH ₃	Fe(II)	7	1:3	8,3	475	1,3	50	150
CH ₃	CH ₃	Fe(III)	6,5	1:3	10	500	1,7	43	124
CH ₃	C ₆ H ₅	Fe(II)	3,5	1:3	12,7	550	1,8	26	73
CH ₃	C ₆ H ₅	Fe(III)	3,5	1:3	15,1	555	2,4	18	65
C ₆ H ₅	C ₆ H ₅	Fe(II)	3	1:3	24,4	550	2,6	6	20
C ₆ H ₅	C ₆ H ₅	Fe(III)	3	1:3	26,5	555	2,75	1,8	6

Згідно наведених у таблиці даних, слід констатувати, що введення фенільних замісників у положення 2 та 4 безопірилієвого циклу призводить до зсуву оптимального рН комплексоутворення від рН 7 до рН 3 при переході від ДМДОХ до ДФДОХ. До того ж, при переході від ДМДОХ до ДФДОХ спостерігаємо збільшення молярних коефіцієнтів світлопоглинання і контрастності реакції, а також відбувається утворення більш стійких комплексів. Комплекси феруму(II, III) з ДОХ є електронейтральними, що може бути використано для розроблення відповідних екстракційно-фотометричних методик їхнього визначення.

Найбільш інтенсивно забарвленими є комплекси феруму (II, III) з ДФДОХ, а відповідні аналітичні форми на їхній основі видаються ефективними для розроблення методик прямого спектрофотометричного

та екстракційно-спектрофотометричного визначення феруму. Використовуючи аналітичну форму з ДФДОХ, розроблено методику визначення вмісту загального феруму в водопровідній воді в інтервалі лінійності калібрувального графіку 6–900 мкг/л.

Визначено вплив деяких іонів, які можуть заважати визначенню Fe(III). Встановлено, що визначенню не заважають іони лужних та лужноземельних металів, а низка інших не заважають у таких молярних співвідношеннях 1:750 (Cd²⁺, Pb²⁺, Co²⁺); 1:500 (Zn²⁺, Cu²⁺, Al³⁺, Cr³⁺, Ni²⁺), а також 1000-кратні кількості сульфатів, нітратів, хлоридів, 300-кратні кількості фосфатів.

Для побудови калібрувального графіку попередньо визначали оптимальний надлишок ДФДОХ для одержання максимального аналітичного сигналу. В мірну колбу на 25 мл вносили аліквоти Fe(III) так, щоб

концентрація була в інтервалі 6–900 мкг/л, додавали 10 мл розчину реагенту ДФДОХ із концентрацією $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, створювали рН 3, вносили 2 мл 1% розчину ПВС та доводили до мітки. Вимірювали оптичну густину розчинів при 555 нм відносно розчину холостого досліджу.

Для визначення феруму водопровідну воду попередньо спускали з крану протягом 5–7 хвилин для уникнення застійних домішок. Потім відбирали 5 мл попередньо зібраної водопровідної води та проводили визначення аналогічно побудові калібрувального графіка. Результати опрацювали методами математичної статистики.

Встановлений вміст складає $17,8 \pm \pm 0,84$ мкг/л (RSD 4,5%). Для перевірки правильності розробленої методики вміст феруму у воді визначали методом ІЗП–ОЕС, який складає $17,3 \pm 0,71$ мкг/л (RSD 3,9%). Із використанням методів математичної статистики ($F_{\text{експ}} = 1,39$; $F_{0,95;2;2} = 19,0$; $t_{\text{експ}} = 1,96$; $t_{0,95;4} = 2,776$; $P = 0,95$; $n_1 = n_2 = 3$) можна констатувати, що результати аналізу, одержані різними методами, значуще не відрізняються між собою, що свідчить про відсутність систематичних похибок та вказує на правильність розробленої методики.

ВИСНОВКИ. У цій роботі вивчено комплексоутворення феруму (II) та феруму (III) з низкою алкіл- та фенілпохідних солей 6,7-дигідроксибензопірилію. Встановлено оптимальні умови взаємодії в досліджених хімічних системах. Методом молярних відношень та Бента – Френча встановлено склад утворених комплексів, а за методом Комаря обчислено молярні коефіцієнти світлопоглинання та логарифми констант стійкості ($\lg \beta$) для продуктів складу 1:3. Вивчено інтервали лінійності калібрувально-

го графіку, межі кількісного виявлення та визначення. Розроблено методику прямого спектрофотометричного визначення вмісту загального феруму у водопровідній воді.



Роботу виконано в межах науково-дослідної теми «Нові "зелені" комбіновані спектроскопічні методи аналізу та їхнє аналітичне застосування», державний реєстраційний номер: 0125U000871.

COMPLEXATION OF IRON (II) AND IRON (III) WITH SOME DERIVATIVES OF 6,7-DIHYDROXYBENZOPYRYLIUM SALTS IN SOLUTIONS.

A.V. Demchuk, K.K. Vidinevicius, B.T. Zay, S.V. Toporov, O.M. Zhukovetska, D. V. Snigur

*Odesa National I.I. Mechnikov University,
2 Vsevoloda Zmiyenka str., Odesa 65082,
Ukraine
e-mail: snigur@onu.edu.ua*

This work is devoted to a detailed study of the complex formation of iron(II) and iron(III) ions with a series of alkyl- and phenyl-substituted salts of 6,7-dihydroxybenzopyrylium (R). Such complexes are of interest due to their potential application as analytical reagents for photometric determination of trace amounts of metals in aqueous systems, particularly in drinking water. The optimal conditions for the reactions in the studied chemical systems have been established: pH range of 3–7 and the analytical signal observed at $\lambda = 550\text{--}580$ nm. Under these conditions, the maximum color

intensity of the complexes is achieved, which indicates their stability and reproducibility.

Using the methods of molar ratios and Bent – French analysis, it was shown that under optimal conditions the complex formation proceeds stepwise with the formation of stable compounds with a metal-to-ligand ratio of 1:3. This confirms the ability of iron cations to form polynuclear and multicoordinated structures with R. To characterize the spectrophotometric properties of the complexes, the molar absorption coefficient was determined, and the logarithm of the stability constant ($\lg\beta$) was calculated using the Komar method, which allowed a quantitative evaluation of the stability level of the obtained complexes.

Special attention was given to the study of the metrological characteristics of the proposed technique: the linearity intervals of the calibration curves, as well as the limits of detection and quantification of iron ions, were established. The practical application of the method was demonstrated on samples of tap water. The obtained results showed that the iron content complies with hygienic standards according to DSANPIN 2.2.4–171.10 and statistically agrees with the results obtained by an independent ICP-OES method, which confirms the reliability and reproducibility of the developed approach.

Thus, the conducted research not only expands the understanding of the complex formation of iron with 6,7-dihydroxybenzopyrylium derivatives but also demonstrates the practical applicability of these systems in drinking water quality control and environmental monitoring.

Keywords: 6,7-dihydroxybenzopyrylium salts; iron (II); iron (III) complex formation; spectrophotometry.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cheng Q., Nengzi L., Bao L., Huang Y., Liu S., Cheng X., Zhang J. Distribution and genetic diversity of microbial populations in the pilot-scale biofilter for simultaneous removal of ammonia, iron and manganese from real groundwater. *Chemosphere*. 2017. **182**. P. 450–457.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.075>
2. Almeida J. S., Souza O.C.C.O., Teixeira L.S.G. Determination of Pb, Cu and Fe in ethanol fuel samples by high-resolution continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry by exploring a combination of sequential and simultaneous strategies. *Microchemical Journal*. 2018. **137**. P. 22–26.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.09.012>
3. Pohl P., Welna M., Szymczycha-Madeja A., Greda K., Jamroz P., Dzimitrowicz A. Response surface methodology assisted development of a simplified sample preparation procedure for the multielement (Ba, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Sr and Zn) analysis of different coffee brews by means of inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Talanta*. 2022. **241**. 123215.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123215>
4. Xu L., Yang J., Xie L., Wang H., Yang Y., Huang C., Wu S. Evaluation of plasma condition, concentration effect, position effect, and nickel-doping method on non-matrix-matched Fe isotopic analysis by femtosecond laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B*:

- Atomic Spectroscopy*. 2022. **189**. 106374.
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106374>
5. Zhang Y., Zhang J., Chen H. Study on X-ray fluorescence measurement method for Fe content in secondary circuit sampling filter membranes of nuclear power plants. *International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*. 2025. **7**. P. 341–350.
<https://doi.org/10.1016/j.jandt.2025.08.001>
6. Sales T.N.S., Bosch-Santos B., Saiki M., Burimova A., Pereira L.F.D., Saxena R.N., Carbonari A.W. Low temperature synthesis of pure and Fe-doped HfSiO₄: Determination of Si and Fe fractions by neutron activation analysis. *Radiation Physics and Chemistry*. 2019. **155**. P. 287–290.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.06.040>
7. Снігур Д. В., Чеботарьов О. М., Барбалат Д. О., Щербакова Т. М. Синтез і хіміко-аналітичні характеристики фторовмісних похідних хлориду 6,7 дигідроксибензопірилію. *Укр. хім. журн.* 2018. **84**. С. 50–55.
8. 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 Одеського національного університету. Хімія*. 2021. **26**. С. 73–88.
9. Жуковецька О. М., Гузенко О. М., Марійчук Р. Т., Снігур Д. В. Complexation of Ge(IV) with 6,7-dihydroxybenzopyryllium derivatives and their analytical application. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2023. **31**. С. 460–467.
<https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.287489>
10. Chebotarev A.N., Dubovyi V.P., Demchuk A.V., Barbalat D.A., Snigur D.V. Extraction-Spectrophotometric Determination of Cu(II) with 6,7-Dihydroxy-4-Methyl-2-Phenylbenzopyryllium Chloride in Waters of Various Categories. *J. Water Chem. Technol.* 2019. **41**. P. 170–174.
<http://dx.doi.org/10.3103/S1063455X19030068>
11. Galangashi M. A., Kojidi S. F. M., Pendashteh A., Souraki B. A., Mirroshandel A. A. Removing iron, manganese and ammonium ions from water using greensand in fluidized bed process. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. **39**. P. 101714.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101714>

REFERENCES

1. Cheng Q., Nengzi L., Bao L., Huang Y., Liu S., Cheng X., Zhang J. Distribution and genetic diversity of microbial populations in the pilot-scale biofilter for simultaneous removal of ammonia, iron and manganese from real groundwater. *Chemosphere*. 2017. **182**: 450–457.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.075>
2. Almeida J. S., Souza O.C.C.O., Teixeira L.S.G. Determination of Pb, Cu and Fe in ethanol fuel samples by high-resolution continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry by exploring a combination of sequential and simultaneous strategies. *Microchemical Journal*. 2018. **137**: 22–26.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.09.012>
3. Pohl P., Welna M., Szymczycha-Madeja A., Greda K., Jamroz P., Dzimitrowicz A.

- Response surface methodology assisted development of a simplified sample preparation procedure for the multielement (Ba, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Sr and Zn) analysis of different coffee brews by means of inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Talanta*. 2022. 241: 123215.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123215>
4. Xu L., Yang J., Xie L., Wang H., Yang Y., Huang C., Wu S. Evaluation of plasma condition, concentration effect, position effect, and nickel-doping method on non-matrix-matched Fe isotopic analysis by femtosecond laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2022. 189: 106374.
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106374>
 5. Zhang Y., Zhang J., Chen H. Study on X-ray fluorescence measurement method for Fe content in secondary circuit sampling filter membranes of nuclear power plants. *International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*. 2025. 7: 341–350.
<https://doi.org/10.1016/j.jandt.2025.08.001>
 6. Sales T.N.S., Bosch-Santos B., Saiki M., Burimova A., Pereira L.F.D., Saxena R.N., Carbonari A.W. Low temperature synthesis of pure and Fe-doped HfSiO₄: Determination of Si and Fe fractions by neutron activation analysis. *Radiation Physics and Chemistry*. 2019. 155: 287–290.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.06.040>
 7. Snigur D.V., Chebotaryov O.M., Barbalat D.O., Shcherbakova T.M. Synthesis and chemical and analytical characteristics of fluorine-containing derivatives of 6,7-dihydroxybenzopyrylium chloride. *Ukr. khym. zhurn.* 2018. 84: 50–55. (in Ukrainian)
 8. Chebotaryov O. M., Toporov S. V., Snigur D. V., Barbalat D. O. Derivatives of 6,7- and 7,8-dihydroxybenzopyrylium: synthesis, properties and analytical application (review). *Bulletin of the Odessa National University. Chemistry*. 2021. 26: 73–88. (in Ukrainian)
 9. Zhukovetska O.M., Guzenko O.M., Mariychuk R.T., Snigur D.V. Complexation of Ge (IV) with 6,7-dihydroxybenzopyrylium derivatives and their analytical application. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2023. 31: 460–467. (in Ukrainian)
<https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.287489>
 10. Chebotarev A.N., Dubovyi V.P., Demchuk A.V., Barbalat D.A., Snigur D.V. Extraction-Spectrophotometric Determination of Cu(II) with 6,7-Dihydroxy-4-Methyl-2-Phenylbenzopyrylium Chloride in Waters of Various Categories. *J. Water Chem. Technol.* 2019. 41: 170–174.
<http://dx.doi.org/10.3103/S1063455X19030068>
 11. Galangashi M. A., Kojidi S. F. M., Pendashteh A., Souraki B. A., Mirroshandel A. A. Removing iron, manganese and ammonium ions from water using greensand in fluidized bed process. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. 39: 101714.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101714>

Стаття надійшла 20.05.2025.