СИНТЕЗ ТА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОРОЗМІРНИХ КОМПЛЕКСІВ Cu(II), Ni(II) ТА Fe(III) НА ПОВЕРХНІ ВУГЛЕЦЕВИХ КВАНТОВИХ ТОЧОК

Л. Б. Харькова, О. Г. Янко, Донгчу Чен, С. І. Орисик, В. М. Огенко

Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України, просп. Акад. Палладіна, 32/34, Київ 03142, Україна
*e-mail: kharkova.ljudmila@gmail.com

Методами електронної та ІЧ-спектроскопії досліджено поведінку солянокислих суспензій хлоридів міді(II), нікелю(II) та заліза(III) у поверхневому шарі вуглецевих квантових точок (ВКТ). Встановлено, що відповідні зміни смуг поглинання $\pi \rightarrow \pi^*$, $n \rightarrow \pi^*$ електронних переходів в УФ-області ВКТ, а також смуг поглинання переходів із переносом заряду з ліганду на метал і d-d-електронних переходів у солянокислих суспензіях (у видимій області) свідчать як про сорбцію металів на поверхні ВКТ, так і про координування їх із ВКТ. Аналіз ІЧ-спектрів ВКТ також показав наявність низки характеристичних смуг поглинання для функціалізованих ВКТ, що підтверджує коорди-націю металів на поверхні ВКТ.

Ключові слова: квантово-розмірні, метал-вуглецеві, каталітичні системи, мідь, нікель, залізо.

ВСТУП. Значний науковий інтерес до вуглецевих квантових точок (ВКТ) як нового типу наноматеріалів на основі вуглецю, зумовлено їхньою різноманітною фізико-хімічною формою та властивостями, такими як хороша біосумісність, унікальні оптичні властивості, низька вартість, екологічність, наявність поліфункціональних груп (амінної, гідроксильної, карбоксильної), висока стабільність та рухливість електронів. Якщо нанести на поверхню ВКТ спеціально підібрані молекулярні комплекси, то можна управляти оптичними властивостями ВКТ,

що, як наслідок, впливає на діапазон їхнього випромінювання (наприклад, зміщує у червону область), що важливо для різних застосувань у нанофотоніці та біології [1–9]. У медицині – можна отримати цінні дані для діагностики та раннього запобігання захворюванням, у хімічному та біологічному зондуванні є важливим доправлення лікувальних засобів або хімічних реагентів через клітинні бар'єри до відповідних органів [10–11].

Необхідно зазначити, що використання ВКТ є найбільш доцільним для створення

квантоворозмірних систем заданого розміру. У каталізі їх можна використовувати як поверхні носіїв квантоворозмірних каталітично активних центрів, наприклад, координованих іонів міді, нікелю або вуглецевих нанотрубок, як фотокаталізатори у процесах: деградації забруднюючих речовин (органічних барвників [11], іонів металів [12]), розщеплення води та зменшення концентрації CO_2 [13]. Їх використовують також у створенні сенсорів, суперконденсаторів та джерел струму – для фіксації відстані між шарами графену у гетероструктурних плівкових електродних композитах [14].

Останнім часом значну зацікавленість викликають ВКТ, модифіковані міддю та бором, перспективу яких пов'язують зі створенням противірусних матеріалів для боротьби з новими небезпечними вірусами [15].

У цій роботі досліджено синтез та представлено спектральні дослідження потенційно перспективних нанокаталізаторів на основі вуглецевих квантових точок і осаджених та відновлених на них металів: Cu(II), Ni(II) та Fe(III) із солянокислих суспензій їхніх хлоридів.

ЕКСПЕРИМЕНТ І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Розчин ВКТ синтезували автоклавним гідротермальним методом із лимонної кислоти та етилендіаміну новим способом [16] при співвідношенні вихідних реагентів 1.0 : 1.8. Суміш реагентів нагрівали за температури 180 °C упродовж 5 годин. Продукт синтезу охолоджували до кімнатної температури протягом 15 год. Перевагою цього методу є можливість одержання водної суспензії ВКТ без домішок вихідних реагентів у формі нанодисперсних структур із конденсованими

вуглецевими кільцями та карбоксильними та амініними групами, що, як наслідок, характеризує їх як ВКТ із багатьма крайовими дефектами ґратки, де присутні O,N-вмісні функціональні групи (рис. 1).

Рис. 1. Молекулярна форма ВКТ

Концентрацію ВКТ у водних суспензіях визначали ваговим методом. Спектри поглинання реєстрували на спектрофотометрі «Spesord M40» у діапазоні 50000–11000 см^{-1} . Товщина кварцових кювет – 1 мм. Коефіцієнт екстинкції (ϵ , $\text{M}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) визначали на основі Закону Бугера – Ламберта – Бера. Мікрофотографії структури ВКТ отримали на електронному мікроскопі «ПРЕМ-200». Спектри ЯМР ^1H записано на спектрометрі «Bruker Avance DRX-400» (400 МГц) у D_2O .

Дані електронної мікроскопії показали, що ВКТ мають розміри 8–12 нм та шарувату структуру з відстанями між шарами 0.180–0.230 нм (1.8–2.3 Å) (рис. 2).

Спектр ^1H ЯМР ВКТ у дейтероводі містить наступні сигнали протонів: 5.899 с (1H), 5.830 с (1H) 2,5-діоксоциклогексенілового ядра, 5.5 с (OH), 4.65 ш. с (4H, 2 NH_2), 4.016 м (3H), 3.601 м (3H) CH_2 та CH груп

насиченого вуглецевого циклічного скелету, 2.893 м (4Н, 2CH₂ групи –CH₂-COOH) та показує, що вуглецеві квантові точки, синтезовані за новим способом [16], не мають домішок лимонної кислоти та етилендіаміну (рис. 3).

У водну суспензію ВКТ додавали соляну кислоту (2.5 мг/мл для попередження процесу утворення гідроксидів металів та виділення їхніх осадів при нагріванні) та розраховану кількість хлоридів міді(II), нікелю(II) або заліза(III) ($C_M = 5\%$ стосовно $C_{ВКТ}$). Нагрівали суспензію за 180 °С про-

тягом 1–3 годин та охолоджували її до кімнатної температури упродовж 15 годин.

Рис. 2. Мікрофотографії структури вуглецевих квантових точок

Рис. 3. Спектр ¹H ЯМР ВКТ у D₂O

В електронному спектрі поглинання суспензії ВКТ (рис. 4, кр.1, табл. 1), в ультрафіолетовій області присутні три смуги поглинання (СП), характерні для вуглеводнів із конденсованими кільцями, які відрізняються за інтенсивністю [17]. Найінтенсивнішими є плечеподібна СП при 48 402 см⁻¹ ($\epsilon = 111.26$) та СП при 28 740 см⁻¹ ($\epsilon = 24.95$). Крім того, зареєстровано слабо інтенсивну СП у видимій області при 22 070 см⁻¹, що свідчить про модифікацію ВКТ та ймовірну появу несиметричних конденсованих кілець, що зумов-

лює зміщення електронного переходу $n \rightarrow \pi^*$ у довгохвильову область за рахунок впливу наявних груп NH₂ та OH.

При введенні у водну суспензію ВКТ соляної кислоти відбувається суттєве батохромне зміщення середньої СП (із 28 740 см⁻¹ до 27 455 см⁻¹) на 1285 см⁻¹ (рис. 4, кр. 2) зі зменшенням інтенсивності СП 27 455 см⁻¹ ($\epsilon = 23.39$). Присутність у суспензії ВКТ міді за кімнатної температури (рис. 4, кр. 3) призводить до зменшення інтенсивності зазначеної СП ($\epsilon = 21.80$), що свідчить про взаємодію ВКТ з іонами металу.

Рис. 4. Спектри поглинання солянокислих суспензій ВТК із CuCl_2 без нагрівання і залежно від часу нагрівання за 110°C : 1 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 0$ мг/мл; $C_{\text{Cu}^{2+}} = 0$ мг/мл, $\tau = 0$ год.; 2 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Cu}^{2+}} = 0$ мг/мл, $\tau = 0$ год.; 3 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Cu}^{2+}} = 0.011$ мг/мл, $\tau = 0$ год.; 4 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Cu}^{2+}} = 0.011$ мг/мл, $\tau = 1$ год.; 5 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Cu}^{2+}} = 0.011$ мг/мл, $\tau = 3$ год.

Після нагрівання суспензії протягом 1 та 3 год. зафіксовано гіпсохромний зсув зазначеної СП (на 335 cm^{-1}) до $27\,790\text{ cm}^{-1}$ відносно кривої 3 зі зменшенням інтенсивності залежно від часу нагрівання (рис. 4, кр. 4, 5). Такі зміни в ЕСП зумовлено перерозподілом електронної густини $n \rightarrow \pi^*$ електронних переходів за рахунок координації функціональних груп з іонами металу та

появи переходів із переносом заряду з ліганду на метал (ВКТ $\rightarrow$ Cu^{2+}). При нагріванні суспензій значно збільшується інтенсивність поглинання СП при 22070 cm^{-1} : від $\epsilon = 4.59$ до $\epsilon = 6.75$, що саме і вказує на утворення переходів із переносом заряду з ліганду на метал (ППЗЛМ) за рахунок координації іонів міді з ВКТ.

Таблиця 1

Смути поглинання та коефіцієнти екстинкції суспензій ВКТ із хлоридом Cu(II)

Розчин	ν_1, cm^{-1}	$\epsilon, \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$	ν_2, cm^{-1}	$\epsilon, \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$	ν_3, cm^{-1}	$\epsilon, \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$	ν_4, cm^{-1}	$\epsilon, \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$
ВКТ	48402 п.	111,26	41680	37,09	28740	24,95	22070	4,23
ВКТ + HCl	48402 п.	142,55	41680	39,26	27455	23,39	22070 п.	4,95
ВКТ+ HCl +Cu	48402 п.	126,31	41680	35,50	27455	21,80	22070 п.	4,59
ВКТ+ HCl +Cu 1 год, 110°C	48402 п.	121,71	41680 п.	35,02	27790	19,75	22070 п.	6,77
ВКТ+ HCl +Cu 3 год, 110°C	48402 п.	–	41680 п.	28,84	27790	17,34	22070 п.	6,75

Електронні спектри поглинання солянокислих суспензій ВКТ із Ni(II) несуттєво відрізняються від попередніх (рис. 5, таблиця 2).

У спектрах поглинання суспензій ВКТ із NiCl₂ до нагрівання зареєстровано гіпсохромний зсув СП 27305 см⁻¹ на 150 см⁻¹ та збільшення інтенсивності СП 22070 до $\epsilon = 4.95$. Тобто, іони Ni(II) також утворюють координаційні зв'язки з функціональними групами на периферії ВКТ.

Після нагрівання солянокислих суспензій ВКТ із хлоридом Fe(III), на відміну від хлоридів попередніх металів, в ЕПС в УФ-області (рис. 6, кр. 4, 5, таблиця 3) зареєстровано плечеподібну СП 31545 см⁻¹, інтенсивність якої збільшується з часом нагрівання (від $\epsilon = 9.59$ до $\epsilon = 12.10$), а у видимій області слабо інтенсивну плечеподібну СП 19345 см⁻¹ ($\epsilon = 3.71$ та 4.58), пов'язану з наявністю dd-електронних переходів в іоні металу.

Рис. 5. Спектри поглинання солянокислих суспензій ВКТ з NiCl₂ без нагрівання і залежно від часу нагрівання за 110 °С: 1 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 0$ мг/мл; $C_{\text{Ni}^{2+}} = 0$ мг/мл, $\tau = 0$ год.; 2 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Ni}^{2+}} = 0$ мг/мл, $\tau = 0$ год.; 3 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Ni}^{2+}} = 0.011$ мг/мл, $\tau = 0$ год.; 4 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Ni}^{2+}} = 0.011$ мг/мл, $\tau = 1$ год.; 5 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Ni}^{2+}} = 0.011$ мг/мл, $\tau = 3$ год.

Таблиця 2

Смуги поглинання та коефіцієнти екстинкції суспензій ВКТ із хлоридом Ni(II)

Розчин	ν_1, cm^{-1}	$\epsilon, \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$	ν_2, cm^{-1}	$\epsilon, \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$	ν_3, cm^{-1}	$\epsilon, \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$	ν_4, cm^{-1}	$\epsilon, \text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$
ВКТ	48402 п.	111,26	41680	37,09	28740	24,95	22070	4,23
ВКТ + HCl	–	–	41680	39,26	27455	23,39	22070 п.	4,95
ВКТ+ HCl +Ni	47665 п.	123,16	41680	35,54	27305	21,76	22070 п.	4,95
ВКТ+ HCl +Ni 1 год, 110°С	48097 п.	109,87	41680 п.	35,10	27800	19,74	22070 п.	6,76
ВКТ+ HCl +Ni 3 год, 110 °С	–	–	41680 п.	29,11	27800	17,33	22070 п.	6,76

Таблиця 3

Смути поглинання та коефіцієнти екстинції суспензій ВКТ із хлоридом Fe(III)

Розчин	$\nu_1, \text{см}^{-1}$	$\epsilon, \text{М}^{-1}\text{см}^{-1}$	$\nu_2, \text{см}^{-1}$	$\epsilon, \text{М}^{-1}\text{см}^{-1}$	$\nu_3, \text{см}^{-1}$	$\epsilon, \text{М}^{-1}\text{см}^{-1}$	$\nu_4, \text{см}^{-1}$	$\epsilon, \text{М}^{-1}\text{см}^{-1}$	$\nu_5, \text{см}^{-1}$	$\epsilon, \text{М}^{-1}\text{см}^{-1}$	$\nu_6, \text{см}^{-1}$	$\epsilon, \text{М}^{-1}\text{см}^{-1}$
ВКТ	48402 п.	111,26	41680	37,09			28740	24,95	22070	4,23		
ВКТ+ HCl	48402 п.		41680 п.	39,26			27455	23,39	22070 п.	4,95		
ВКТ+ HCl +Fe			41475 п.	39,59			27455	22,59	22070 п.	4,49		
ВКТ+ HCl +Fe 1 год, 110 °C			41520 п.	26,39	31545 п.	9,59	27455	14,95	22070 п.	6,54	19345 п.	3,71
ВКТ+ HCl +Fe 3 год, 110 °C			41520 п.	28,79	31545 п.	12,10	27455	16,47	22070 п.	7,85	19345 п.	4,58

Такі зміни у спектрах поглинання пояснюють тим, що залізо може по-різному взаємодіяти з ВКТ (окрім координації з функціональними донорними групами, можливе утворення координаційних зв'язків із π -електронною системою спряжених зв'язків ВКТ), що зумовлює появу додаткової, слабо вираженої плечеподібної СП при 31545 см^{-1} .

В ІЧ-спектрах ВКТ із міддю, нікелем та залізом присутня низка характеристичних смуг поглинання для функціоналізованих ВКТ. У високочастотній області присутні широкі СП при 3500, 3260 та 2930–3000 см^{-1} , характерні для валентних коливань H_2O , $\nu(\text{N-H})$ та $\nu(\text{C-H})_{\text{Ar}}$ [29]. Наявність кількох смуг поглинання валентних коливань карбонільної групи (C=O) при 1830, 1840 та 1850 см^{-1} свідчить про присутність у

досліджуваному зразку ангідридної групи з шестичленними спряженими насиченими та ненасиченими циклами; СП дублетного характеру при 1770 см^{-1} свідчить про наявність у зразку групи атомів -C=O(NH) , а СП при 1680 см^{-1} та дублет при 1640 см^{-1} характеризують коливання $\nu(\text{C=N})$ та $\delta(\text{N-H})$ [18, 19]. Валентні коливання (C=C) ароматичних кілець проявляються кількома СП в області 1610–1540 см^{-1} . При 1420 та 1280 см^{-1} присутні площинні деформаційні коливання (C-H) та $\nu(\text{-C-N-})$, а при 980 см^{-1} – позаплощинні $\delta(\text{C-H})$. Також у спектрах присутні СП $\delta(\text{C-H})$, характерні для 1,3- та 1,2,3-заміщених ароматичних похідних, а у низькочастотній області при 320–360 см^{-1} присутні СП $\nu(\text{Cu-Cl, Ni-Cl, Fe-Cl})$ [18–20].

Рис. 6. Спектри поглинання солянокислих суспензій ВКТ із хлоридом Fe^{3+} без нагрівання і залежно від часу нагрівання за 110°C : 1 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 0$ мг/мл; $C_{\text{Fe}^{3+}} = 0$ мг/мл, $\tau = 0$ год.; 2 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Fe}^{3+}} = 0$ мг/мл, $\tau = 0$ год.; 3 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Fe}^{3+}} = 0.011$ мг/мл, $\tau = 0$ год.; 4 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Fe}^{3+}} = 0.011$ мг/мл, $\tau = 1$ год.; 5 – $C_{\text{ВКТ}} = 0.22$ мг/мл, $C_{\text{HCl}} = 2.5$ мг/мл; $C_{\text{Fe}^{3+}} = 0.011$ мг/мл, $\tau = 3$ год.

ВИСНОВКИ. Таким чином, дослідження поведінки суспензій хлоридів міді(II), нікелю(II) та заліза(III) у поверхневому шарі ВКТ показало координацію металів на поверхні ВКТ з ймовірним утворенням координаційних зв'язків із ними на їхній доступній поверхні, що важливо для синтезу дво- та трикомпонентних перспективних каталізаторів на основі послідовного нанесення заданих кількостей хлоридів металів із наступним їхнім відновленням до нульвалентного стану.

Роботу виконано в межах держбюджетної теми «Фізико-неорганічна хімія функціонально орієнтованих наносистем, гетероструктур та композитів», державний реєстраційний номер: 0118U004559.

SYNTHESIS AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF Cu(II), Ni(II) AND Fe(III) NANOSIZED COMPLEXES ON THE SURFACE OF CARBON QUANTUM DOT

L.B. Kharkova*, O.G. Yanko, Dongchu Chen, S.I. Orysyk, V.M. Ogenko,

V.I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine, 32/34 Acad. Palladin Avenue, Kyiv 03142, Ukraine

*e-mail: kharkova.ljudmila@gmail.com

Processes of interaction between carbon quantum dots (CQDs) and solutions of Cu(II) Ni(II) and Fe(III) chlorides in the surface layer have been investigated by electron and IR spectroscopy.

When hydrochloric acid is added to the aqueous suspension of CQDs, there is a significant bathochromic shift of the average absorption band (AB) by 1285 cm^{-1} with a decrease in its intensity to $\varepsilon = 23.39$. The presence of copper in the suspension of CQDs at room temperature leads to a decrease in the intensity of this AB ($\varepsilon = 21.80$), which indicates the interaction of CQDs with metal ions.

After heating the suspension for 1 and 3 hours, the hypsochromic shift of this ABs (by 335 cm^{-1}) to 27790 cm^{-1} with a decrease in intensity depending on the heating time was recorded. Such changes in the UV-Vis Spectrum are due to the redistribution of the electron density of electron transitions $n \rightarrow \pi^*$ due to the coordination of functional groups with metal ions and the appearance of transitions with charge transfer from ligand to metal (CQD $\rightarrow$ Cu $^{2+}$).

When heating the suspensions significantly increases the absorption intensity of the AB at 22070 cm^{-1} : from $\varepsilon = 4.59$ to $\varepsilon = 6.75$, which indicates the formation of transitions with charge transfer from ligand to metal (ChTLM) due to the coordination of copper ions with CQD.

In the absorption spectra of CQD suspensions with NiCl $_2$ before heating, a hypsochromic shift of AB at 27305 cm^{-1} by 150 cm^{-1} and an increase in the intensity of its to $\varepsilon = 4.95$ were registered. That is, Ni(II) ions also form coordination bonds with functional groups on the periphery of the CQD.

After heating hydrochloric acid suspensions of CQD with FeCl $_3$, in contrast to the chlorides of previous metals, in the UV-region registered shoulder-shaped AB at 31545 cm^{-1} , the intensity of which increases with heating time (from $\varepsilon = 9.59$ to $\varepsilon = 12.10$), and in the visible region, a weakly intense shoulder-shaped AB

at 19345 cm^{-1} ($\varepsilon = 3.71$ and 4.58), associated with the presence of dd-electron transitions in the metal ion.

Such changes in the absorption spectra are explained by the fact that iron may interact with CQD in different ways (in addition to coordination with functional donor groups, the formation of coordination bonds with the π -electron system of conjugated CQDs bonds), which leads to additional weak shoulder-like AB at 31545 cm^{-1} .

The IR-spectra data of CQDs showed the presence of a number of characteristic ABs for functionalized CQDs: $\nu(\text{N-H})$ at 3260 cm^{-1} , (C=O) at $1830, 1840$ and 1850 cm^{-1} , $-\text{C=O}(\text{NH})$ at 1770 cm^{-1} , $\nu(\text{C=N})$ at 1680 and $\delta(\text{N-H})$ at 1640 cm^{-1} and $320\text{-}360\text{ cm}^{-1}$ CП $\nu(\text{Cu-Cl, Ni-Cl, Fe-Cl})$, which confirms the coordination of metals on the surface of CQDs.

Keywords: quantum-dimensional, metal-carbon, catalytic systems, copper, nickel, iron.

ЛІТЕРАТУРА

1. Junjun Liu, Rui Li and Bai Yang. Carbon Dots: A New Type of Carbon-Based Nanomaterial with Wide Applications. *Americal Chemical Society*, 2020. **6**, (12). pp. 2179–2195.
2. Yan Y., Gong J., Chen J., Zeng Z., Huan W., Pu K. Liu, J. Chen, P. Recent. Advances on Graphene Quantum Dots: From Chemistry and Physics to Applications. *Advance Materials*, 2019. **31**: P.1808283.
3. Liu J., Geng Y., Li D., Yao H., Huo Z., Li Y., Zhang K., Zhu S., Wei H., Xu W., Jiang J., Yang B. Deep/ Red Emissive Carbonized Polymer Dots with Unprecedented Narrow Full Width at Half Maximum. *Advance Materials*, 2020. **32**. P.1906641.

4. Jiang K., Wang Y., Gao, X., Cai C., Facile Lin H. Quick and Gram-Scale Synthesis of Ultralong-Lifetime Room-Temperature-Phosphorescent Carbon Dots by Microwave Irradiation. *Angewandte International Edition Chemical International Edition*, 2018. **57**. pp. 6216–6220.
5. Hu C., Li M., Qiu J., Sun, Y. P. Design and Fabrication of Carbon Dots for Energy Conversion and Storage. *Chemical Society Review*. 2019. **48**. pp. 2315–2337.
6. Liu M. L., Chen, B. B., Li C. M., Huang C. Z. Carbon Dots: Synthesis, Formation Mechanism, Fluorescence Origin and Sensing Applications. *Green Chemistry*, 2019. **21**. pp. 449–471.
7. Hoang V. C., Dave K., Gomes V. G. Carbon Quantum Dot-Based Composites for Energy Storage and Electrocatalysis: Mechanism, Applications and Future Prospects. *Nano Energy*, 2019. **66**. P.104093p.
8. Zhang Z., Yi G., Li P., Zhang X., Fan H., Zhang Y., Wang X., Zhang C. A. Minireview on Doped Carbon Dots for Photocatalytic and Electrocatalytic Applications. *Nanoscale*, 2020. **12**. pp.13899–13906.
9. Singh M. I., Voznyy K., O., Bakr O. M., Lu Z. H., Sargent E. H. Bright High-Colour-Purity Deep-Blue Carbon Dot Light-Emitting Diodes via Efficient Edge Amination. *Natural Photonics*, 2020. **14**. pp. 171–176.
10. Gao Y., Jiao, Y., Lu W., Liu Y., Han H., Gong X., Xian M., Shuang S., Dong C. Carbon Dots with Red Emission as a Fluorescent and Colorimetric Dual-Readout Probe for the Detection of Chromium(vi) and Cysteine and Its Logic Gate Operation. *Journal Materials Chemistry*, 2018. **6**. pp. 6099–6107.
11. Gong P., Sun L., Wang F., Liu X., Yan Z., Wang M., Zhang L., Tian Z., Liu Z., You J. Highly Fluorescent N-Doped Carbon Dots with Two-Photon Emission for Ultrasensitive Detection of Tumor Marker and Visual Monitor Anticancer Drug Loading and Delivery. *Chemistry English Journal*, 2019. **356**. pp. 994–1002.
12. Cailotto S., Negrato M., Daniele S., Luque R., Selva M., Amadio E., Perosa A. Carbon Dots as Photocatalysts for Organic Synthesis: Metal-Free Methylene-Oxygen-Bond Photocleavage. *Green Chemistry*, 2020. **22**. pp. 1145–1149.
13. Xu L., Bai X., Guo L., Yang S., Jin P., Yang L. Facial Fabrication of Carbon Quantum Dots (CDs)-Modified N-TiO₂-x Nanocomposite for the Efficient Photoreduction of Cr(VI) under Visible Light. *Chemistry English Journal*, 2019. **357**. pp. 473–486.
14. Qing Y., Jiang Y., Lin H., Wang L., Liu A., Cao Y., Sheng R., Guo Y., Fan C., Zhang S., Jia D., Fan Z. Boosting the Supercapacitor Performance of Activated Carbon by Constructing Overall Conductive Networks Using Graphene Quantum Dots. *Journal Materials Chemistry. A*. 2019, (7). pp. 6021–6027.
15. Hola K., Sudovska M., Kalitchuk S. et al. Grafting nitrogen triggers red fluorescence in carbon dots. *American Chemical Society NANO*, 2017. **11**. (12). pp. 12402–12410.
16. Спосіб синтезу вуглецевих квантових точок: заявка на патент України на корисну модель № u 2021 00294: МПК⁷ C 01 B 31/02; заяв. 27.01.2021.
17. В. М. Огенко, С. І. Орисик, Л. Б. Харькова, О. Г. Янко. Синтез та спектральні характеристики перспективних нанорозмірних вуглецевих носіїв для адсорбційних та каталітичних процесів. *Український хімічний журнал*, 2020. **86**, (1). pp. 3–11.
18. Казицына Л. А., Куплетская Н. Б. Применение УФ, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии: учебн. пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 1971. 264 с.
19. Bel'skaya O.B., Gulyaeva O.B., Gulyaeva T.I. et al. Interaction between Pt(IV) and Pd(II) Chloro Complexes in Solution and on the Al₂O₃ Surface. *Kinetics and Catalysis*, 2010. **51**, (1). pp. 105–119.

20. Сапарова Д. С., Багати́ков Н. А., Манулис В. М., Дехтярик М. М., Ивашкевич О. А. ИК-спектры монометаллических комплексов галогенидов меди(II) с 1- тетра-бутил-1,2,4-триазолом: экспериментальное и квантово-химическое исследование. *Химия: Белорусский госуниверситет*, 2019. (2). С. 12–20.

REFERENCES

1. Junjun Liu, Rui Li and Bai Yang. Carbon Dots: A New Type of Carbon-Based Nanomaterial with Wide Applications. *America Chemical Society*. 2020. **6** (12): 2179–2195.
2. Yan Y., Gong J., Chen J., Zeng Z., Huan W., Pu K. Liu, J. Chen, P. Recent. Advances on Graphene Quantum Dots: From Chemistry and Physics to Applications. *Advance Materials*. 2019. **31**: 1808283.
3. Liu J., Geng Y., Li D., Yao H., Huo Z., Li Y., Zhang K., Zhu S., Wei H., Xu W., Jiang J., Yang B. Deep/ Red Emissive Carbonized Polymer Dots with Unprecedented Narrow Full Width at Half Maximum. *Advance Materials*. 2020. **32**: 1906641.
4. Jiang K., Wang Y., Gao, X., Cai C., Facile Lin H. Quick and Gram-Scale Synthesis of Ultralong-Lifetime Room-Temperature-Phosphorescent Carbon Dots by Microwave Irradiation. *Angewandte International Edition Chemical International Edition*. 2018. **57**: 6216–6220.
5. Hu C., Li M., Qiu J., Sun, Y. P. Design and Fabrication of Carbon Dots for Energy Conversion and Storage. *Chemical Society Review*. 2019. **48**: 2315–2337.
6. Liu M. L., Chen, B. B., Li C. M., Huang C. Z. Carbon Dots: Synthesis, Formation Mechanism, Fluorescence Origin and Sensing Applications. *Green Chemistry*. 2019. **21**: 449–471.
7. Hoang V. C., Dave K., Gomes V. G. Carbon Quantum Dot-Based Composites for Energy Storage and Electrocatalysis: Mechanism, Applications and Future Prospects. *Nano Energy*. 2019. **66**: 104093.
8. Zhang Z., Yi G., Li P., Zhang X., Fan H., Zhang Y., Wang X., Zhang C. A. Minireview on Doped Carbon Dots for Photocatalytic and Electrocatalytic Applications. *Nanoscale*. 2020. **12**: 13899–13906.
9. Singh M. I., Voznyy K. O., Bakr O. M., Lu Z. H., Sargent E. H. Bright High-Colour-Purity Deep-Blue Carbon Dot Light-Emitting Diodes via Efficient Edge Amination. *Natural Photonics*. 2020. **14**: 171–176.
10. Gao Y., Jiao Y., Lu W., Liu Y., Han H., Gong X., Xian M., Shuang S., Dong C. Carbon Dots with Red Emission as a Fluorescent and Colorimetric Dual-Readout Probe for the Detection of Chromium(vi) and Cysteine and Its Logic Gate Operation. *Journal Materials Chemistry*. 2018. **6**: 6099–6107.
11. Gong P., Sun L., Wang F., Liu X., Yan Z., Wang M., Zhang L., Tian Z., Liu Z., You J. Highly Fluorescent N-Doped Carbon Dots with Two-Photon Emission for Ultrasensitive Detection of Tumor Marker and Visual Monitor Anticancer Drug Loading and Delivery. *Chemistry English Journal*. 2019. **356**: 994–1002.
12. Cailotto S., Negrato M., Daniele S., Luque R., Selva M., Amadio E., Perosa A. Carbon Dots as Photocatalysts for Organic Synthesis: Metal-Free Methylene-Oxygen-Bond Photocleavage. *Green Chemistry*. 2020. **22**: 1145–1149.
13. Xu L., Bai X., Guo L., Yang S., Jin P., Yang L. Facial Fabrication of Carbon Quantum Dots (CDs)-Modified N-TiO₂-x Nanocomposite for the Efficient Photoreduction of Cr(VI) under Visible Light. *Chemistry English Journal*. 2019. **357**: 473–486.
14. Qing Y., Jiang Y., Lin H., Wang L., Liu A., Cao Y., Sheng R., Guo Y., Fan C., Zhang S., Jia D., Fan Z. Boosting the Supercapacitor Performance of Activated Carbon by Constructing Overall Conductive Networks

- Using Graphene Quantum Dots. *Journal Materials Chemistry*. A. 2019. 7: 6021–6027.
15. Hola K., Sudovska M., Kalitchuk S. et al. Grafiticnitrogen triggers red fluorescence in carbon dots. *Americal Chemical Society NANO*. 2017. 11 (12): 12402–12410.
16. Method for the synthesis of carbon quantum dots: application for a patent of Ukraine for a utility model u 2021 00294: MPK⁷ C 01 B 31/02; claimed 27.01.2021.
17. Ogenko V.M., Orysyk S.I., Kharkova L.B., Yanko O.G. Synthesis and spectral characteristics of perspective nanosized carbon carries for adsorption and catalytic processes *Ukrainian Chemical Journal*. 2020. 86 (1) 3–11 [in Ukrainian].
18. Kazitsyna L.A., Kupletskaya N.B. The application of UV, IR and NMR spectroscopy in organic chemistry.
19. Textbook for Universities. *Higher School Publishing House Moscow*. 1971. 264. [in Russian].
20. Bel'skaya O.B., Gulyaeva O.B., Gulyaeva T.I. et al. Interaction between Pt(IV) and Pd(II) Chloro Complexes in Solution and on the Al₂O₃ Surface. *Kinetics and Catalysis*. 2010. 51(1): 105–119.
21. D.S. Saparova, N.A. Bagatikov, V.M. Manulis, M.M. Dekhtiaric O.A. Ivashkevich IR spectra of monometallic complexes of copper (II) halides with 1-tetra-butyl-1,2,4-triazole: experimental and quantum chemical research. *Journal Belorusskogo gosuniversiteta. Chemistry*. 2019. 2: 12–20.

Стаття надійшла 21.10.2021.