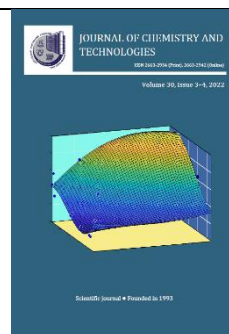




# Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>



UDC 547.972 + 544.723

## CHEMISORPTION OF FLAVONOIDS FROM CANADIAN GOLDENROD ON ALUMINUM OXIDE

Volodymyr S. Fedenko

Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarin Ave., Dnipro 49010, Ukraine  
Received 15 August 2022; accepted 29 September 2022; available online 31 October 2022

### Abstract

The results of the study of sorption of flavonoids in aqueous and alcoholic extracts of inflorescences of canadian goldenrod with alumina are presented. The methods of reflectance spectroscopy in the visible range and colorimetry (CIE XYZ, CIE L\*a\*b\* systems) were used to characterize plant raw materials, preparations of standard rutin in the solid phase, and adsorbates. According to the data of solid-phase spectrophotometry, the interaction occurred by chemisorption of flavonoids on the surface of the sorbent. The similar nature of the reflectance spectra of adsorbates from extracts and rutin, the predominant component of the flavonoid composition of the studied plant raw materials, was confirmed. The use of the first spectrum derivative proved to be a more effective method for identifying the formation of adsorption complexes in comparison with determining the position of the extended maximum in the reflectance spectra of adsorbates. The bathochromic shift of the minimum of the spectral band in the case of chemisorption is proposed as a diagnostic criterion. According to colorimetric measurements, chemisorption of flavonoids caused an increase in the conditional purity of color tone and yellowness index of adsorbates. For the comparative analysis of adsorbates, the total color difference was calculated with a division into component differences in lightness, chroma and hue angle. The possibility of using an environmentally safe solvent for the functionalization of a biocompatible sorbent has been confirmed. The obtained results can be used in the development of concentration, stabilization of flavonoids from extracts of medicinal plants, the creation of biohybrid materials, improvement of methods of solid-phase analysis of biologically active substances.

*Keywords:* flavonoids; rutin; aluminum oxide; chemisorption; reflectance spectra; colorimetry

## ХЕМОСОРБЦІЯ ФЛАВОНОЇДІВ ЗОЛОТУШНИКА КАНАДСЬКОГО НА ОКСИДІ АЛЮМІНІЮ

Володимир С. Феденко

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, просп. Гагаріна, 72, Дніпро, 49010, Україна

### Анотація

Представлено результати дослідження сорбції флавоноїдів у водному та спиртовому екстрактах суцвіть золотушника канадського з оксидом алюмінію. Для характеристики рослинної сировини, препаратів стандартного рутину у твердій фазі та адсорбатів використовували методи спектроскопії відбиття у видимому діапазоні та колориметрії (системи CIEXYZ, CIE L\*a\*b\*). За даними твердофазної спектрофотометрії взаємодія відбувалась шляхом хемосорбції флавоноїдів на поверхні сорбента. Підтверджено подібний характер спектрів відбиття адсорбатів із екстрактів і рутину – переважного компоненту складу флавоноїдів дослідженої рослинної сировини. Використання першої похідної спектру виявилось більш ефективним прийомом для ідентифікації утворення адсорбційних комплексів порівняно із визначенням положення розширеного максимуму у спектрах відбиття адсорбатів. У якості діагностичного критерію запропоновано батохромне зміщення мінімуму спектральної смуги у разі хемосорбції. Згідно з колориметричними вимірюваннями хемосорбція флавоноїдів обумовила підвищення умовної чистоти кольорового тону та індексу жовтязи адсорбатів. Для порівняльного аналізу адсорбатів розрахована повна кольорова відмінність із розподілом на складові відмінності за яскравістю, кольоровістю та кольоровим тоном. Підтверджена можливість використання екобезпечного розчинника для функціоналізації біосумісного сорбента. Отримані результати можуть бути використані у розробках з концентрування, стабілізації флавоноїдів із екстрактів лікарських рослин, створення біогібридних матеріалів, удосконалення методик твердофазного аналізу біологічно активних речовин.

*Ключові слова:* флавоноїди; рутин; оксид алюмінію; хемосорбція; спектри відбиття; колориметрія.

\*Corresponding author: e-mail address: [opticlub.fedenko@gmail.com](mailto:opticlub.fedenko@gmail.com)

© 2022 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v30i3.262972

## Вступ

Підвищений інтерес до флавоноїдів рослинного походження пов'язано із біологічною активністю різної спрямованості дії [1], у тому числі із позитивним ефектом у профілактиці COVID-19 [2]. У зв'язку з цим проводиться розробка методів стабілізації цих природних антиоксидантів для створення нових біогібридних матеріалів [3]. Одним із напрямів вирішення цієї проблеми є іммобілізація флавоноїдів із використанням неорганічних наповнювачів [4]. Серед цих матеріалів найефективнішим за сорбційною здатністю вважають оксид алюмінію – завдяки реалізації механізму хемосорбції біологічно активних речовин на поверхні сорбенту, що доведено для кверцетину та рутину [5]. Слід зазначити, що у фармацевтичній практиці оксид алюмінію застосовується як допоміжна речовина [6].

Іншим важливим аспектом цієї проблеми є пошук джерел відновлювальної рослинної сировини із підвищеним вмістом флавоноїдів. Серед рослинних ресурсів привертають увагу інвазійні (чужорідні) рослини, спонтанне поширення яких є загрозою для біорізноманіття. Стійкість до несприятливих

чинників середовища дозволяє інвазійним рослинам продукувати значну біомасу, яка потребує утилізації. Одним із напрямів переробки сировини є виділення біологічно активних речовин. Тому деякі представники із цієї групи, незважаючи на інвазійний статус, віднесені до фармакопейних рослин. Серед таких рослин слід відзначити золотушник канадський (*Solidago canadensis* L.), який віднесено до активних інвазійних видів у флорі України [7]. Препарати золотушника виявляють протизапальну, антимікробну, діуретичну, спазмолітичну дію і використовуються у лікуванні захворювань сечового міхура і нирок, сечокам'яній хворобі [8]. Для екстрактів та ефірних олій, які отримані із різних частин цієї рослини, підтверджена антифунгіцидна, антибактеріальна та антимутагенна активність [9]. За даними [10] у складі ефірних олій переважають монотерпени та фракції оксигенованих сполук. Антиоксидантна активність водно-спиртових екстрактів здебільшого обумовлена фенольними сполуками [11], у складі яких переважає рутин (3-рутинозид-5,7,3',4'-тетрагідроксифлавонон) (рис. 1) [12; 13].

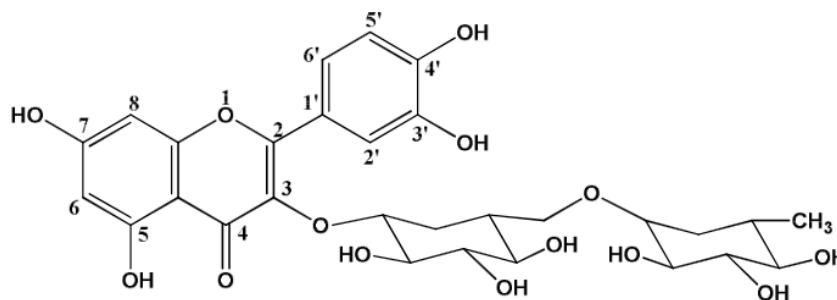


Fig. 1. The chemical structure of rutin  
Рис. 1. Хімічна структура рутину

Використовуючи преципітацію флавоноїдів із екстрактів солями Fe(II) та Al(III), отримують натуральний барвник [14; 15], що дало підстави віднести золотушник до перспективних фарбувальних рослин [16]. Для підтвердження ролі в аделопатичній активності золотушника досліджено здатність фенольних сполук до комплексоутворення за взаємодії з оксидом алюмінію [17]. Однак характеристики іммобілізованого препарату не встановлено. Ідентифікацію флавоноїдів, адсорбованих на поверхні Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, доцільно проводити із використанням твердофазної спектроскопії, яку раніш нами використано для дослідження комплексоутворення флавоноїд-ного пігменту ціанідин 3-глюкозиду з іонами металів у

рослинних тканинах [18; 19], а також для препаративно виділених антоціанових металокомплексів [20; 21].

На теперішній час особливу актуальність набувають методологічні підходи «зеленої» хімії, у тому числі при виділенні біоактивних фенольних сполук із метал-хелатуючою здатністю для практичного застосування у різних сферах [22; 23]. Тому важливим аспектом дослідження є вибір відновлювальної сировини інвазійних рослин, яка потребує переробки для поліпшення біологічної цінності матеріалів, а також використання екобезпечних методів, розчинників та біосумісних матеріалів.

Мета роботи – дослідити сорбцію флавоноїдів із екстрактів суцвіть золотушника

канадського на оксиді алюмінію та визначити спектральні характеристики адсорбатів.

### Експериментальна частина

Спектри відбиття вимірювали на спектрофотометрі Спекорд М40, обладнаному інтегральною фотометричною сферою та касетою для математичної обробки «Data Handling I», яка дозволяє проводити згладжування і диференціювання спектральних кривих із виключенням випадкових шумових піків [24]. У разі колориметричних вимірів використовували іншу касету для математичної обробки ColorMeasurement.

У роботі використовували оксид алюмінію нейтральний (II ступінь активності за Брокманом) (Reanal), рутин (Chemapol).

Виділення екстракту флавоноїдів із суцвіть золотушника канадського (*Solidago canadensis* L.) проводили двома методами із використанням різних розчинників за однакового співвідношення наважки сирової маси (г) до об'єму екстрагента (мл) – 1 : 10:

- 1) екстракція ізопропанолом 24 год за 4 °С [25];
- 2) водна екстракція 30 хв за 90 °С [15].

Сорбцію флавоноїдів на поверхні оксиду алюмінію проводили за однакового співвідношення об'єму рослинного екстракту (мл) до наважки сорбента (г) (5 : 1) упродовж 15 хв із постійним перемішуванням. Після фільтрування адсорбат промивали відповідним розчинником та висувували. Для стандартного рутину готували розчин в 80 %-му водному ізопропанолі (2 мг/мл), а сорбційну взаємодію здійснювали в аналогічних умовах.

Аналогічні умови вимірювання відбивальних та колориметричних параметрів суцвіть, імібілізованих препаратів створювали за рахунок користування стандартним тримачем твердих зразків до спектрофотометру за умови повного покриття поверхні (діаметр 2 см). Для порівняння із адсорбованим рутином додатково готували препарат неадсорбованого флавоноїду шляхом гомогенізації з  $Al_2O_3$  (5 % суміш). Інтенсивність спектрів відбиття у діапазоні

350–800 нм представляли в одиницях оптичної густини. Координати кольору ( $X, Y, Z$ ) та координати кольоровості ( $x, y$ ) визначали в системі CIE XYZ. Домінуючу довжину хвилі  $\lambda_d$  та умовну чистоту кольорового тону  $P_e$  встановлювали графічним способом за координатами зразків у кольоровому просторі [24]. У колориметричній системі CIE  $L^*a^*b^*$  визначали інтегральний коефіцієнт яскравості  $L^*$  та колориметричні коефіцієнти  $a^*$  (співвідношення зеленої і червоної складових кольору) і  $b^*$  (співвідношення синьої та жовтої складових кольору). Грунтуючись на значеннях колориметричних коефіцієнтів, обчислювали повну колірну відмінність  $\Delta E^*$  між препаратами рутину та між різними адсорбатами, а також розподілієї інтегральної величини на складові відмінності за яскравістю  $\Delta L^*$ , кольоровістю  $\Delta C^*$  та кольоровим тоном  $\Delta H^*$  [24]. Для обчислення показника жовтизни ( $YI$ ) використовували рівняння (1) [26]:

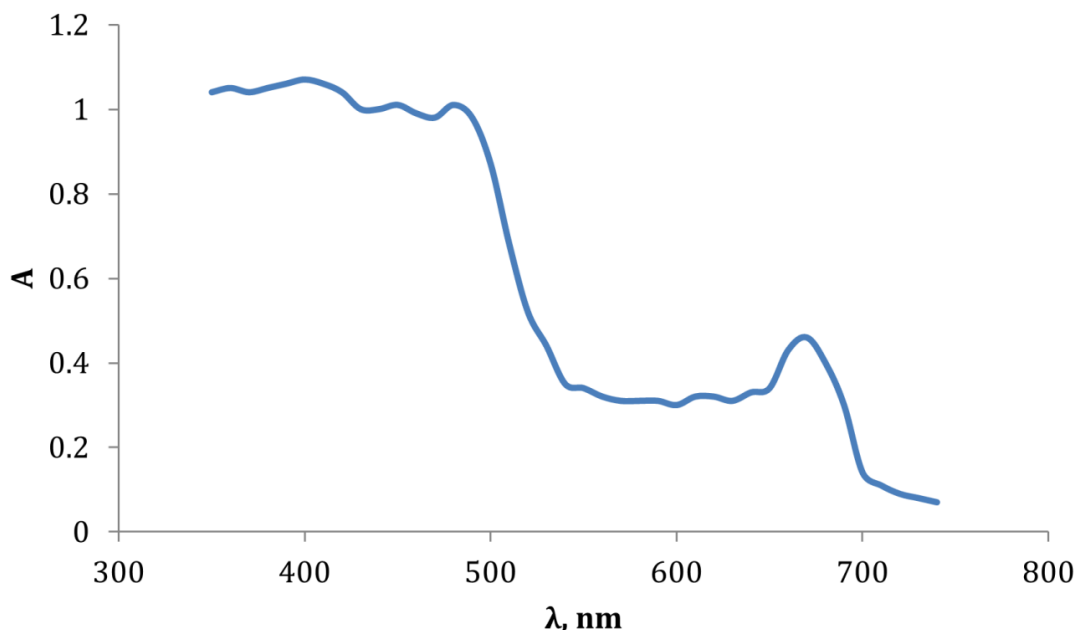
$$YI = \frac{1.28X - 1.06Z}{Y} \cdot 100 \quad (1),$$

де  $X, Y, Z$  – координати кольору зразків.

Похибка вимірювань спектральних параметрів не перевищувала 5 %. Статистичну обробку експериментальних даних проводили з 5 %-вим рівнем значущості.

### Результати та їх обговорення

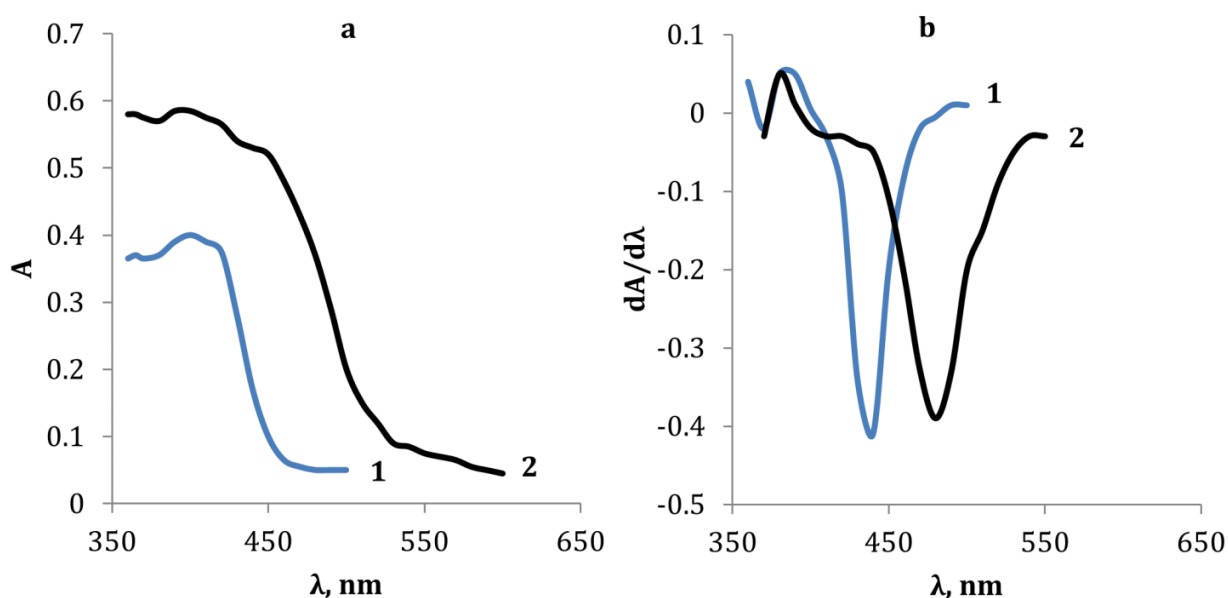
Для характеристики вихідної рослинної сировини встановлено відбивальні та колориметричні характеристики. У спектрі відбиття квіток (рис. 2) спостерігались інтенсивні максимуми флавоноїдів (362, 395 нм), каротиноїдів (450, 485 нм) та мінорні максимуми хлорофілів (620, 677 нм). Максимуми у діапазоні 350–400 нм можуть бути здебільшого обумовлені рутином – переважним компонентом складу флавоноїдів квіток золотушника [12; 13]. Для порівняльної характеристики спектральної кривої у цьому діапазоні використано співвідношення оптичної густини короткохвильового ( $A_k$ ) та довгохвильового ( $A_d$ ) максимумів. Значення  $A_k/A_d$  у спектрі відбиття квіток склало 0.97.



**Fig. 2. Reflectance spectrum of canadian goldenrod flowers**  
**Рис. 2. Спектр відбиття квіток золотушника канадського**

Для підтвердження віднесення цих максимумів досліджено спектр відбиття стандартного рутину, гомогенізованого у  $\text{Al}_2\text{O}_3$  за відсутності взаємодії із поверхнею адсорбенту. Твердофазний аналіз 5 %-ої суміші рутину з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  виявив наявність двох

співставних за інтенсивністю максимумів за 365 і 398 нм ( $A_{\text{к}}/A_{\text{д}}$  0.95) (рис. 3), близьких за положенням та проявом спектральної кривої для квіток золотушника у діапазоні 350–400 нм.



**Fig. 3. Reflectancespectra (a) and their first derivatives (b): 1 - rutin (5% mixture with  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); 2 - rutin- $\text{Al}_2\text{O}_3$**   
**Рис. 3. Спектри відбиття (a) та їх перша похідна (b): 1 - рутин (5 % суміш з  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); 2 - рутин- $\text{Al}_2\text{O}_3$**

Максимуми, віднесені до поглинання каротиноїдів, пов'язані із похідними лютеїну, які домінують у складі цих пігментів дослідженої рослинної сировини [27]. Пігментний склад квіток обумовив кольоровий стимул із значенням

домінувальної довжини хвилі у діапазоні жовтого кольору, специфічною сукупністю колориметричних коефіцієнтів і максимальним значенням індексу жовтизни серед досліджених препаратів (таблиця, рис. 4).

## Colorimetric parameters of samples

Таблиця

## Колориметричні параметри препаратів

Sample	$\lambda_d$ , nm	$P_e$ , %	$L^*$	$a^*$	$b^*$
Flowers	581.8	68.91	70.54	-2.78	17.67
Rutin (5 % mixture with $Al_2O_3$ )	580.0	14.42	97.00	-13.34	-63.36
Rutin- $Al_2O_3$	580.0	47.12	94.11	-9.98	-14.14
Alcohol extract- $Al_2O_3$	578.6	60.0	95.93	-13.42	6.97
Aqueous extract- $Al_2O_3$	579.6	46.15	92.90	-11.12	-16.42

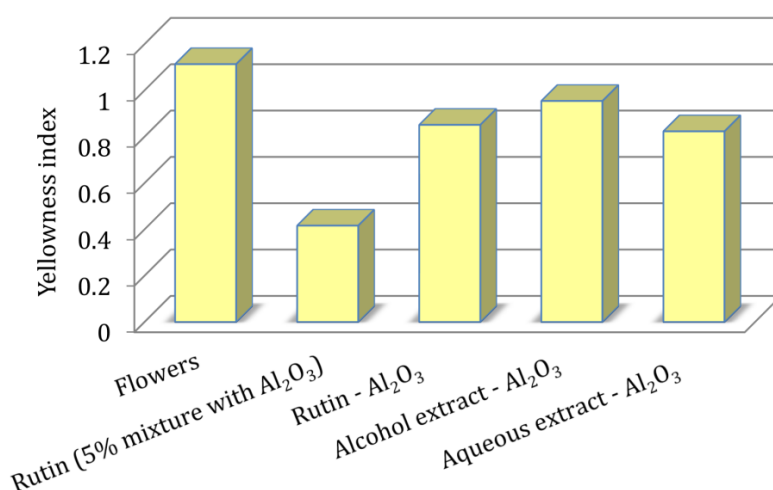


Fig. 4. Yelowness index of samples  
Рис. 4. Індекс жовтязни препаратів

Після екстракції рослинної сировини із використанням двох розчинників і сорбційної взаємодії з оксидом алюмінію проведено порівняльний твердофазний аналіз отриманих адсорбатів. У спектрах відбиття

адсорбатів зберігалась наявність двох максимумів: із спиртового екстракту – 365 і 404 нм ( $A_K/A_D$  0.91), із водного екстракту – 365 і 388 нм ( $A_K/A_D$  1.00) (рис. 5).

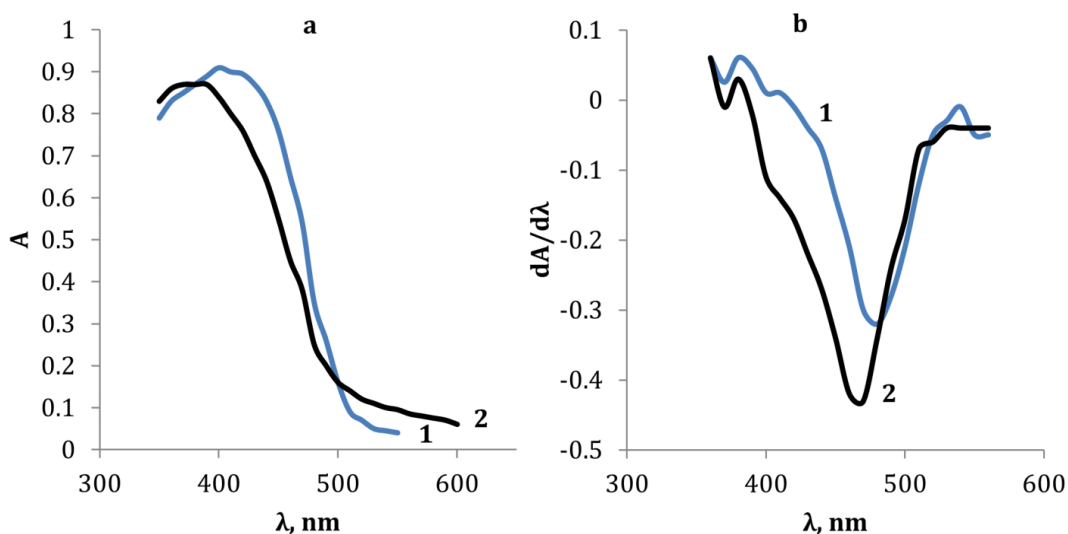


Fig. 5. Reflectance spectra (a) and their first derivative (b) of adsorbates from extracts of the canadian goldenrod: 1 -alcohol extract- $Al_2O_3$ ; 2 - aqueous extract- $Al_2O_3$

Рис. 5. Спектри відбиття (a) та їх перша похідна (b) адсорбатів із екстрактів золотушника канадського: 1 - спиртовий екстракт- $Al_2O_3$ ; 2 - водний екстракт- $Al_2O_3$

Оскільки максимуми, обумовлені каротиноїдами та хлорофілами, відсутні у спектрах адсорбатів, слід зробити висновок, що за сорбційної взаємодії відбувалась селективна імобілізація флавоноїдів на поверхні  $Al_2O_3$ . Враховуючи раніш встановлену корелятивну залежність інтенсивності забарвлення адсорбента від поверхневої концентрації флавоноїдів [5], близькі значення оптичної густини максимумів у спектрах відбиття адсорбатів свідчили про однаковий кількісний рівень сполук, адсорбованих із різних екстрактів. Цей факт підтвердив ефективність використання екобезпечної водної екстракції біологічно активних сполук із рослинної сировини. Для рутину, адсорбованого на поверхні  $Al_2O_3$  із водно-спиртового розчину, спостерігались максимуми за 365 і 392 нм ( $A_k/A_d$  1.00), а також перегин за 445 нм на спектральній кривій (рис. 3). Подібний характер прояву максимумів у спектрах адсорбатів із рослинних екстрактів та рутину дав підстави висловити припущення про аналогічний тип адсорбційних комплексів. Слід також зазначити, що отримані нами результати для адсорбату із спиртового екстракту золотушника майже збіглися із даними роботи [5], згідно з якими положення максимуму у спектрі поглинання сорбованого рутину в суспензії пірогенного  $Al_2O_3$  у водно-етанольному розчині становило 403 нм.

Враховуючи розширений характер спектральної смуги адсорбатів, для підвищення інформативності твердофазного аналізу використано диференціювання спектрів відбиття. Перша похідна спектральної смуги охарактеризована відповідними максимумом ( $\lambda_{max}$ ) і мінімумом ( $\lambda_{min}$ ). Для виявлення критеріїв утворення абсорбційного комплексу проведено порівняльний аналіз двох препаратів рутину: флавоноїду, гомогенізованого у твердій фазі адсорбента, і адсорбата на поверхні  $Al_2O_3$ , отриманого із розчину в умовах сорбційної взаємодії. Для суміші рутину з оксидом алюмінію за відсутності сорбційної взаємодії у першій похідній спектру відзначено смугу  $\lambda_{max}$  384.5 нм –  $\lambda_{min}$  438.4 нм (рис. 3). Для рутину, адсорбованого на поверхні  $Al_2O_3$ , смуга першої похідної характеризувалась  $\lambda_{max}$  420.0 нм –  $\lambda_{min}$  489.8 нм (рис. 3). Як визначальну особливість слід відзначити батохромне зміщення мінімуму ( $\Delta\lambda_{min}$ ) на 51.4 нм відносно неадсорбованого рутину внаслідок утворення адсорбційного комплексу. У разі адсорбатів із різних екстрактів золотушника

характеристики смуги у першій похідній спектру також підтвердили ефект адсорбційного комплексоутворення: адсорбат із спиртового екстракту  $\lambda_{max}$  383.3 нм –  $\lambda_{min}$  481.4 нм,  $\Delta\lambda_{min}$  43.0 нм; адсорбат із водного екстракту  $\lambda_{max}$  383.3 нм –  $\lambda_{min}$  469.7 нм,  $\Delta\lambda_{min}$  41.3 нм (рис. 5). Слід також зазначити, що встановлені значення батохромного зміщення смуги у першій похідній спектру адсорбатів (41.3–51.4 нм) відповідають даним роботи [5], згідно з якими величина такого зміщення для максимуму у спектрі поглинання адсорбованого рутину в суспензії пірогенного  $Al_2O_3$  відносно неадсорбованого флавоноїду становила 40 нм. Отже, диференціювання спектральних кривих виявилось більш ефективним прийомом для ідентифікації утворення абсорбційних комплексів порівняно із визначенням положення розширеного максимуму у спектрах відбиття адсорбатів.

Раніш у роботі [5] встановлено, що сорбційна взаємодія рутину з поверхнею пірогенного оксиду алюмінію із водно-спиртового розчину у нейтральному середовищі відбувається шляхом хемосорбції, яка корелює із вмістом неасоційованих поверхневих груп  $\equiv AlOH$ . Хелатування флавоноїду з адсорбційним центром відбувається за рахунок 4-C=O і 5-OH груп з утворенням адсорбційного комплексу, структура якого однотипна із комплексоутворенням рутину з Al(III) у розчині [5]. Оскільки за даними [5] зв'язування із пірокатехольними 3'-ОН і 4'-ОН групами не задіяно, отримані адсорбати можуть проявляти антиоксидантну активність, що важливо для прояву біологічного ефекту. На підтвердження такого висновку слід навести дані щодо антиоксидантної властивості кверцетину (аглікону рутину), адсорбованого на нефункціоналізованій та модифікованій  $TiO_2$ -поверхні наночастинок діоксиду кремнію [28]. Слід також додати, що антиоксидантна активність деяких металокомплексів рутину перевищувала таку здатність для неасоційованого флавоноїду [29]. Подібний характер отриманих нами результатів і даних для пірогенного  $Al_2O_3$  [5] дає підстави стверджувати, що в процесі сорбційної взаємодії стандартного рутину та екстракту золотушника відбувалась хемосорбція флавоноїду.

Додаткові характеристики препаратів отримано у результаті перетворення спектрального розподілу інтенсивності

відбиття залежно від довжини хвилі у відповідні колориметричні параметри (таблиця). Для обох препаратів рутину встановлено однакові значення  $\lambda_d$ , однак у разі хемосорбції значно підвищена величина умовної чистоти кольорового тону (у 3.3 рази) та індексу жовтязи (у 2 рази). До того ж для інтегральної величини колірної відмінності  $\Delta E^*$  рутину, адсорбованого на поверхні  $Al_2O_3$ , порівняно із флавоноїдом, гомогенізованим у

твердій фазі сорбенту, найсуттєвіший внесок відзначено для відмінності за кольоровістю  $\Delta C^*$  (рис. 6). Встановлене підвищення індексу жовтязи у разі хемосорбції рутину відповідало тенденції змін цього показника в процесі взаємодії флавоноїду із полісахаридами, що пов'язували із депротонуванням гіроксильних груп рутину [30].

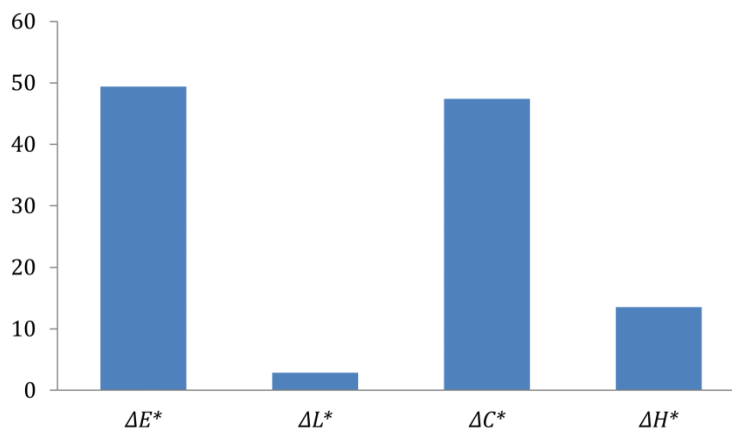


Fig. 6. Color differences of rutin adsorbed on the  $Al_2O_3$  surface compared to the flavonoid homogenized in the solid phase of the sorbent

Рис. 6. Колірні відмінності рутину, адсорбованого на поверхні  $Al_2O_3$ , порівняно із флавоноїдом, гомогенізованим у твердій фазі сорбенту

Значення  $\lambda_d$  адсорбатів із різних екстрактів наближені до показника рутину. Підвищення  $P_e$  на 13.9 % для адсорбату із спиртового екстракту порівняно із препаратом, отриманим із водного екстракту, відповідає максимальному значенню колориметричного коефіцієнта  $b^*$  та збільшенню індексу жовтязи на 15.9 % (таблиця), а серед складових  $\Delta E^*$  визначальний внесок

встановлено для відмінності за кольоровим тоном  $\Delta H^*$  (рис. 7). Відмінності спектральних характеристик адсорбатів, отриманих із різних рослинних екстрактів, можуть бути пов'язані зі зміною складу флавоноїдів залежно від природи екстрагента [13], а також впливом умов середовища на адсорбційну взаємодію.

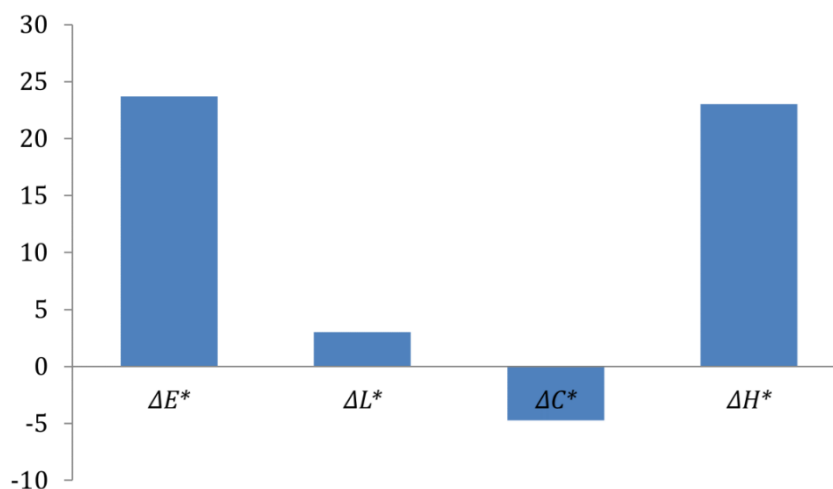


Fig. 7. Color differences of the adsorbate from the alcoholic extract of flavonoids of the canadian goldenrod compared to the preparation obtained from the aqueous extract

Рис. 7. Колірні відмінності адсорбату із спиртового екстракту флавоноїдів золотушника канадського порівняно із препаратом, отриманим із водного екстракту

Аналізуючи отримані результати, слід зазначити, що встановлена нами здатність до хемосорбції флавоноїдів із рослинних екстрактів може бути використана для концентрування, стабілізації природних антиоксидантів і створення біогібридних матеріалів. Важливим аспектом є можливість застосування біосумісного сорбента, екологічно безпечного розчинника, поновлювальної сировини інвазійних рослин, яка потребує переробки. Оскільки для більшості флавоноїдів характерна біологічна активність, з метою спрощення отримання біопрепаратів можлива функціоналізація неорганічного наповнювача відразу із рослинного екстракту без попереднього розділення на індивідуальні сполуки, що може призвести до зменшення стадійності процесу. Відзначені аспекти відповідають принципам «зеленої» хімії.

Інший аспект отриманих результатів пов'язаний із удосконаленням методичних підходів стандартизації золотушника як лікарської рослинної сировини [8]. На додаток до існуючого методу контролю вмісту флавоноїдів із використанням реакції комплексоутворення з Al(III) у розчині [31], отримані результати створюють перспективу твердофазного аналізу біологічно активних речовин цього класу. На відміну від існуючого методичного підходу [5] – шляхом визначення оптичної густини в спектрах поглинання флавоноїдів, адсорбованих на поверхні Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, – запропоновано встановлення відбивальних характеристик адсорбату у твердій фазі. Такий підхід може бути застосований для контролю композицій флавоноїдів з твердим дисперсійним середовищем, які створюють

для покращення біофармацевтичних характеристик (підвищення розчинності та біодоступності фармацевтично активних інгредієнтів) [32]. Використані нами спектроскопія відбиття у видимому діапазоні та колориметрія розширюють методичну основу спектрального аналізу рослинної сировини [33].

### Висновки

Із використанням твердофазної спектроскопії встановлено, що адсорбційна взаємодія флавоноїдів у водному та спиртовому екстрактах суцвіть золотушника канадського з оксидом алюмінію відбувається шляхом хемосорбції на поверхні сорбента. Підтверджено подібний характер спектрів відбиття адсорбатів із екстрактів і рутину – переважного компоненту складу флавоноїдів дослідженої рослинної сировини. Використання першої похідної спектру відбиття виявилось більш ефективним прийомом для ідентифікації утворення адсорбційних комплексів порівняно із визначенням положення розширеного максимуму у спектрах відбиття адсорбатів. Згідно з колориметричними вимірюваннями хемосорбція флавоноїдів обумовила підвищення умовної чистоти кольорового тону та індексу жовтизни адсорбатів. Отримані результати можуть бути використані у розробках з концентрування, стабілізації флавоноїдів із екстрактів лікарських рослин, створення біогібридних матеріалів, удосконалення методик твердофазного аналізу біологічно активних речовин.

### References

- [1] Alizadeh, S. R., Ebrahimzadeh, M. A. (2022). O-Substituted Quercetin derivatives: structural classification, drug design, development, and biological activities, a review. *J. Mol. Struct.*, 132392. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.132392>
- [2] El-Missiry, M. A., Fekri, A., Kesar, L. A., Othman, A. I. (2021). Polyphenols are potential nutritional adjuvants for targeting COVID-19. *Phytother. Res.*, 35(6), 2879–2889. <https://doi.org/10.1002/ptr.6992>
- [3] Koop, B. L., da Silva, M. N., da Silva, F. D., dos Santos Lima, K. T., Soares, L. S., de Andrade, C. J., Valencia, G. A., Monteiro, A. R. (2022). Flavonoids, anthocyanins, betalains, curcumin, and carotenoids: sources, classification and enhanced stabilization by encapsulation and adsorption. *Food Res. Int.*, 110929. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110929>
- [4] Milia, A., Bruno, M., Cavallaro, G., Lazzara, G., Milioto, S. (2019). Adsorption isotherms and thermal behavior of hybrids based on quercetin and inorganic fillers. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 138(3), 1971–1977. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08257-x>
- [5] Barvinchenko, V. M., Lipkovskaya, N. O. (2020). [Sorption of natural flavonoids on the surface of pyrogenic aluminum oxide from water-ethanol solutions]. *Khim., Fiz. Tekhnol. Poverkhn. – Chem., Phys. Technol. Surf.*, 11(2), 190–200 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/hftp11.02.190>
- [6] Bohuts'ka, K. I., Nozdrenko, D. M. (2014). [The use of aluminum and its compounds for the biomedical purposes]. *Fiziologichnyi Zhurnal*, 60(1), 91–97 (in Ukrainian).
- [7] Zavalova, L. V., Protopopova, V. V., Kucher, O. O., Ryff, L. E., Shevera, M. V. (2021). Plant invasions in Ukraine. *Environmental & Socio-economic Studies*, 9(4), 1–13. <https://doi.org/10.2478/environ-2021-0020>
- [8] Gontova, T. M., Rudenko, V. P., Gaponenko, V. P., Kozyra, S. A., Romanova, S. V. (2021). [Investigation of anatomical signs of canadian goldenrod herbs, introduced in Ukraine]. *Farmatsevtichnyi zhurnal*, (6), 94–104 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32352/0367-3057.6.21.09>



- [9] Zihare, L., Blumberga, D. (2017). Insight into bioeconomy. *Solidago canadensis* as a valid resource. Brief review. *Energy Procedia*, 128, 275–280. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.074>
- [10] Radušienė, J., Karpavičienė, B., Marksa, M., Ivanauskas, L., Raudonė, L. (2022). Distribution Patterns of Essential Oil Terpenes in Native and Invasive *Solidago* Species and Their Comparative Assessment. *Plants*, 11(9), 1159. <https://doi.org/10.3390/plants11091159>
- [11] Marksa, M., Zymone, K., Ivanauskas, L., Radušienė, J., Pukalskas, A., Raudone, L. (2020). Antioxidant profiles of leaves and inflorescences of native, invasive and hybrid *Solidago* species. *Ind. Crops Prod.*, 145, 112123. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112123>
- [12] Radusiene, J., Marska, M., Ivanauskas, L., Jaksta, V., Karpavičienė, B. (2015). Assessment of phenolic compound accumulation in two widespread goldenrods. *Ind. Crops Prod.*, 63, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.015>
- [13] Zekič, J., Vovk, I., Glavnik, V. (2020). Extraction and analyses of flavonoids and phenolic acids from canadian goldenrod and giant goldenrod. *Forests*, 12(1), 40. <https://doi.org/10.3390/f12010040>
- [14] Leitner, P., Fitz-Binder, C., Mahmud-Ali, A., Bechtold, T. (2012). Production of a concentrated natural dye from Canadian Goldenrod (*Solidago canadensis*) extracts. *Dyes Pigm.*, 93(1-3), 1416–1421. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2011.10.008>
- [15] Nguyen, H. L., Bechtold, T. (2021). Thermal stability of natural dye lakes from Canadian Goldenrod and onion peel as sustainable pigments. *J. Cleaner Prod.*, 315, 128195. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128195>
- [16] Guinot, P., Rogé, A., Gargadennec, A., Garcia, M., Dupont, D., Lecoœur, E., Candelier, L., Andary, C. (2006). Dyeing plants screening: an approach to combine past heritage and present development. *Color. Technol.*, 122(2), 93–101. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2006.00015.x>
- [17] Likhanov, A., Oliinyk, M., Pashkevych, N., Churilov, A., Kozyr, M. (2021). The Role of Flavonoids in Invasion Strategy of *Solidago canadensis* L. *Plants*, 10(8), 1748. <https://doi.org/10.3390/plants10081748>
- [18] Fedenko, V. S. (2007). [Dose effect of cyanidin interaction with lead ions in roots of maize seedlings]. *Ukrains'kyi Biokhimichnyi Zhurnal*, 79(2), 24–29 (in Ukrainian).
- [19] Fedenko, V. S. (2008). [Cyanidin as endogenous chelator of metal ions in maize seedling roots]. *Ukrains'kyi Biokhimichnyi Zhurnal*, 80(1), 102–106 (in Ukrainian).
- [20] Fedenko, V. S., Shemet, S. A., Struzhko, V. S. (2005). [Complexation of cyanidin with cadmium ions in solution]. *Ukrains'kyi Biokhimichnyi Zhurnal*, 77, 104–109 (in Ukrainian).
- [21] Fedenko, V. S. (2006). [Cyanidin complexation with metal ions]. *Ukrains'kyi Biokhimichnyi Zhurnal* (1999), 78(2), 149–152 (in Ukrainian).
- [22] Panzella, L., Moccia, F., Nasti, R., Marzorati, S., Verotta, L., Napolitano, A. (2020). Bioactive phenolic compounds from agri-food wastes: An update on green and sustainable extraction methodologies. *Front. Nutr.*, 7, 60. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00060>
- [23] Nobahar, A., Carlier, J. D., Miguel, M. G., Costa, M. C. (2021). A review of plant metabolites with metal interaction capacity: a green approach for industrial applications. *BioMetals*, 34(4), 761–793. <https://doi.org/10.1007/s10534-021-00315-y>
- [24] Fedenko, V. S., Landi, M., Shemet, S. A. (2017). Detection of nickel in maize roots: A novel nondestructive approach by reflectance spectroscopy and colorimetric models. *Ecol. Indic.*, 82, 463–469. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.021>
- [25] Fedenko, V. S. (2002). [Cooperation of carotenoid and phenolic pigments in flowers polychromism formation of cryptophyte]. *Fiziologia i Biokhimiya Kul'turnykh Rastanii*, 34(3), 199–212
- [26] Chebotaryov, A.M., Snigur, D.V. (2020). [Colorimetry in the study of acid-base equilibria in solutions of polyfunctional organic compounds]. Odessa, Ukraine: Odesa I. I. Mechnikov National University (in Ukrainian).
- [27] Horváth, G., Molnár, P., Farkas, A., Szabó, L. G., Turcsi, E., Deli, J. (2010). Separation and Identification of Carotenoids in Flowers of *Chelidonium majus* L. and Inflorescences of *Solidago canadensis* L. *Chromatographia*, 71(1), 103–108. <https://doi.org/10.1365/s10337-010-1510-4>
- [28] Schlipf, D. M., Jones, C. A., Armbruster, M. E., Rushing, E. S., Wooten, K. C., Rankin, S. E., Knutson, B. L. (2015). Flavonoid adsorption and stability on titania-functionalized silica nanoparticles. *Colloids Surf. A*, 478, 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.03.039>
- [29] Kasprzak, M. M., Erxleben, A., Ochocki, J. (2015). Properties and applications of flavonoid metal complexes. *RSC Adv.*, 5(57), 45853–45877. <https://doi.org/10.1039/C5RA05069C>
- [30] Ekaette, I., & Saldaña, M. D. (2020). Barley starch behavior in the presence of rutin under subcritical water conditions. *Food Hydrocolloids*, 100, 105421. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105421>
- [31] Shelepova, O., Vinogradova, Y., Vergun, O., Grygorieva, O., Brindza, J. (2020). Assessment of flavonoids and phenolic compound accumulation in invasive *Solidago canadensis* L. in Slovakia. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 14(1), 587–594. <https://doi.org/10.5219/1378>
- [32] Colombo, M., Michels, L. R., Teixeira, H. F., Koester, L. S. (2022). Flavonoid delivery by solid dispersion: a systematic review. *Phytochem. Rev.*, 21, 783–808 <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09763-3>
- [33] Ibrahim, A., Daood, H. G., Égei, M., Takács, S., Helyes, L. (2022). A Comparative Study between Vis/NIR Spectroradiometer and NIR Spectroscopy for the Non-Destructive Quality Assay of Different Watermelon Cultivars. *Horticulturae*, 8(6), 509. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060509>