

УДК 535.37, 541.14

Н.М. ЗАЩЕПКИНА, В.В. ТАРАНОВ, О.А. НАКОНЕЧНИЙ, Р.Ю. ДОВГАЛЮК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ БАРВНИКІВ ВИЗНАЧЕНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ В ЯКОСТІ ОПОРНИХ ЗРАЗКІВ РЕЄСТРАЦІЇ КВАНТОВОГО ВИХОДУ ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ

Метою роботи є огляд та удосконалення засобів контролю оптичних характеристик здатних до люмінесценції органічних сполук. Об'єкт досліджень – реєстрація квантового виходу люмінесценції барвників ксантенового ряду вибраних концентрацій. В процесі роботи було проведено огляд методик визначення якісних та кількісних показників органічних сполук певного складу та їх інформативних параметрів що базуються на основі спектрофотометричних (оптично стимульована люмінесценція) методах дослідження показників хімічних речовин. Проаналізовано шляхи вдосконалення підходів до використання напівпровідникових УФ-світлодіодів у якості джерел збудження квантового виходу люмінесценції та фотодіодів і фотодіодних матриць у якості первинних перетворювачів для визначення відносних концентрацій вибраних органічних сполук методами оптично стимульованої люмінесценції. Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні класичних методів реєстрації квантового виходу люмінесценції, з використанням сучасної елементної бази та апробація макету вимірювальної установки з потужними УФ-світлодіодами в якості джерела світла та малощумним фотодетектором з широким динамічним діапазоном, призначеним для реєстрації квантового виходу люмінесценції досліджуваних зразків.

Ключові слова: Родамін 6G, ксантен, вимірювання спектру, первинний перетворювач, PIN-світлодіод, джерело освітлення, фотодіодний детектор, люмінесцентний метод, довжини хвиль, експрес-метод.

N.M. ZASHCHEPKINA, V.V. TARANOV, O.A. NAKONECHNYI, R.JU. DOVGALJUK
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

IMPROVEMENT OF DETERMINATION OPTICAL CHARACTERISTICS WHEAT GRAINS WITH ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE NEAR INFRARED REGION OF THE SPECTRUM

The purpose of the work is to review and improve the means of controlling the optical characteristics of luminescence-capable organic compounds. The object of research is the registration of the quantum yield of luminescence dyes of the xanthine series of selected concentrations. In operation conducted inspection methods for determining qualitative and quantitative indicators of organic compounds specific chemical composition and their informative parameters based on spectrophotometric (optically stimulated luminescence) research methods performance chemicals. The ways of improving approaches to using semiconductor UV LEDs as excitation sources luminescence quantum yield and photodiodes and photodiode matrix as primary transducers to determine the relative concentrations of organic compounds chosen method of optically stimulated luminescence. The scientific novelty of the work is to improve the classical methods of recording the quantum yield of luminescence, using a modern element base and testing the model of a measuring device with powerful UV-light-emitting diodes as a light source and a low-noise photodetector with a wide dynamic range designed to record the quantum yield of luminescence of the samples under investigation.

Keywords: Rhodamine 6G, Xanten, measuring range, the primary converter, PIN-LED light source, photodiode detector, luminescent method, wavelengths, rapid method.

Вступ

У зв'язку зі стрімким розвитком різних галузей промисловості в Україні і світі широкого застосування набули різні типи органічних та неорганічних харчових добавок різної хімічної природи (барвники, стабілізатори, емульгатори, консерванти та ін.). В процесі виробництва, зберігання та транспортування харчової продукції, для підвищення смакових якостей, привабливості зовнішнього вигляду, терміну придатності дуже часто використовують речовини що мають певний ступінь небезпеки для кінцевого споживача, виявити які в продуктах досить важко. Про наявність таких сполук в продуктах виробники часто або взагалі не вказують на етикетках, або значно занижують концентрації домішок в готовому продукті. Потрапляння в організм даних супутніх сполук в незначних кількостях не несуть значного негативного впливу на організм людини, проте при щоденному вживанні вони можуть дуже негативно позначатися на здоров'ї.

Враховуючи все вищесказане, досить перспективним є застосування оптичних методів експрес-аналізу кількісних та якісних показників органічних речовин, до яких відносяться усі без винятку харчові продукти (в лабораторних та виробничих умовах), з яких найбільш ефективними по відношенню затрати/результат є саме люмінесцентні методи аналізу.

В оптичних аналітичних методах дослідження якісних і кількісних властивостей продуктів харчування використовується ультрафіолетова (УФ), видима та інфрачервона (ІЧ) області спектру електромагнітного випромінювання. Методи, засновані на дослідженні спектрів виборчого поглинання випромінювання аналізованою речовиною, та реєстрації квантового виходу люмінесценції спричиненого внаслідок дії збуджуючого випромінювання становлять основу спектро- і фотометрії. Для кожної речовини спектри поглинання та випромінювання індивідуальні і залежать від будови речовини та поточних параметрів навколишнього середовища [1, 5].

Головною метою наших досліджень було провести порівняльний аналіз доступних на даний час оптичних методів контролю інформативних показників вибраних органічних речовин що відповідають

умовам експрес діагностики та можуть бути застосовані при поточних операціях контролю параметрів досліджуваних зразків. Особливу увагу було приділено методам та засобам що мають високу вибірковість та достатню точність вимірювань у рамках експрес-тестів, є мало затратним та потребують вимірювального обладнання з низькою металоємністю, а також характеризуються відсутністю впливу на об'єкт дослідження.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено наступні задачі:

– проведено огляд методик визначення якісних та кількісних показників органічних сполук певного хімічного складу та їх інформативних параметрів що базуються на основі спектрофотометричних (оптично стимульована люмінесценція) методах дослідження хімічних речовин.

– зроблено вибір методів та засобів аналізу органічних речовин, що мають найкращі показники по відношенню затрати/отриманий результат, та відповідають вимогам експрес діагностики, із забезпеченням достатньої чутливості, селективності, та точності вимірів;

– проаналізовано шляхи вдосконалення підходів до використання напівпровідникових УФ-світлодіодів у якості джерел збудження квантового виходу люмінесценції та фотодіодів і фотодіодних матриць у якості первинних перетворювачів для визначення відносних концентрацій вибраних органічних сполук методами оптично стимульованої люмінесценції.

Експериментальна частина

Основною сортовою ідентифікаційною характеристикою більшості органічних сполук при впливі на них електромагнітним випромінюванням оптичного діапазону являються спектри збудження та поглинання, а також інтенсивність квантового виходу люмінесценції. Принципова схема установки для вимірювання цих характеристик зображення на рис. 1. Як джерело Д може використовуватися джерело світла як з безперервним спектром випромінювання, так і з лінійчатим спектром. При використанні джерела світла з безперервним спектром випускання, наприклад, ксенонові лампи, довжина хвилі збудження задається диспергуючим елементом DE_1 , а дисперсор DE_2 формує довжини хвиль в необхідному діапазоні вимірювання спектра люмінесценції. При вимірюванні спектру збудження, навпаки, довжини хвилі випромінювання фіксується дисперсором DE_2 , тоді як довжини хвиль збудження покроково задаються в необхідному діапазоні за допомогою диспергуючого елемента DE_1 .

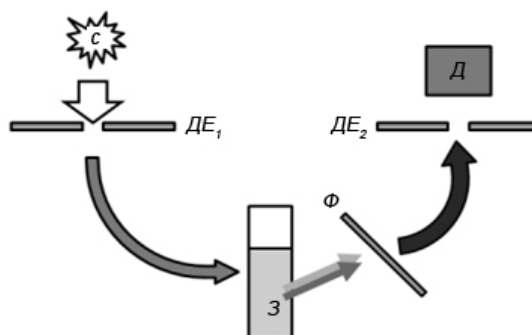


Рис. 1. Схема установки для вимірювання люмінесценції [1]: С – джерело (ксенонова лампа або УФ-світлодіод), DE_1 і DE_2 – диспергуючі елементи, З – зразок, Ф – фільтр, Д – детектор

Подібну конструкцію в тому чи іншому вигляді має більшість промислових вимірювальних комплексів здатних до реєстрації спектрів поглинання та квантового виходу люмінесценції досліджуваних зразків. Зйомку спектрів люмінесценції та поглинання розчинів доцільно проводити, маючи в своєму розпорядженні джерело і детектор під кутом, щоб уникнути попадання не поглиненої частки збуджуючого випромінювання на детектор.

У випадку роботи із спектрометрією поглинання для якісного аналізу досліджуваних зразків та флуоресцентною спектрофотометрією для кількісного визначення відносних концентрацій даних речовин у багатокомпонентній системі в рідкій фазі, першочерговим завданням є визначення кроку сканування спектру та ефективного діапазону довжин хвиль в якому знаходяться максимуми поглинання та рекомбінаційного випромінювання молекул досліджуваних речовин. Смуги поглинання в електронному спектрі характеризуються довжиною хвилі та інтенсивністю, вимірюваними в максимумі. Положення смуги на шкалі довжин хвиль визначається різницею енергій станів, між якими відбувається перехід. Інтенсивність смуги поглинання визначається ймовірністю переходу.

Структурний елемент молекули, відповідальний за появу смуги поглинання в спектрі, називають хромофором. Поглинання світла даними ізольованим хромофором типова, тобто має певне значення λ_{\max} і ϵ_{\max} смуги поглинання. Деякі атоми або групи атомів, приєднані до хромофорної системи, зміщують характерні смуги поглинання. Такі атоми і групи називаються ауксохромами [1].

Всі ці та інші взаємозалежності, використовуються для встановлення будови хімічного з'єднання, вивчення впливу різних умов на стан молекул досліджуваної речовини.

Характеристичне поглинання типових хромофорів [2]

Хромофор	λ_{\max} , нм	ϵ_{\max} , л, моль·см
C = C	180	10000
C = C – C = C	220	20000
C ₆ H ₅	200	7000
- N = N -	350	100
Cl ⁻	181	10000
Br ⁻	199,5	11000
I ⁻	226	12600
OH ⁻	194	12600
NO ₃ ⁻	302,5	7500

Аніони деяких елементів при певних ступенях окислення, наприклад хрому, марганцю у вигляді сполук K₂Cr₂O₇, K₂CrO₄, KMnO₄, поглинають в різних частинах видимого діапазону. Катіони елементів перших періодів системи Менделєєва у видимій та ближній УФ-частинах спектра не поглинають, тобто їх розчини безбарвні [11].

Як видно з табл. 1, молекулярні спектри поглинання в УФ і видимій областях (особливо в УФ) мають низьку специфічність – смуги поглинання багатьох хромофорів перекриваються, вони широкі і дуже сильно спотворюються домішками, зміщуються під дією розчинників. Тому проводити ідентифікацію невідомої речовини тільки по її спектру поглинання практично не можна, за винятком деяких іонів і їх сольваток комплексів, наприклад, лантанодів (елементи 58-71) актиноідів (елементи 90-103), які мають дискретну структуру, подібну до структури спектрів атомарних газів [4, 11].

Однією із важливих умов достовірної детекції відгуків досліджуваних зразків при методиках люмінесцентної фотометрії є необхідність відмежувати явище люмінесценції від інших способів випромінювання світла молекулами. За визначенням С. І. Вавилова, люмінесценцією тіла в даній спектральній області називають надлишок випромінювання над температурним за умови, що це надмірне випромінювання має кінцеву тривалість, що перевищує період світлових коливань.

Фото- і спектрофотометричні методики кількісного визначення розроблені для більшості контрольованих компонентів харчових продуктів, дуже багатьох компонентів промислової продукції.

У вихідному (не збудженому) стані молекули перебувають на найнижчому з можливих енергетичних рівнів (див. рис. 2), тобто на нижньому коливальному підрівні основного стану. У органічних молекул, що мають систему зв'язаних подвійних зв'язків, це стан синглетний, при якому спіни електронів на верхній заповненій орбіталі (S₀) антипаралельні.

Зазвичай доводиться вирішувати зворотну задачу: знаючи структуру спектра поглинання, будувати схему електронних рівнів. Приклад такої побудови наведено на рис. 2 [6].

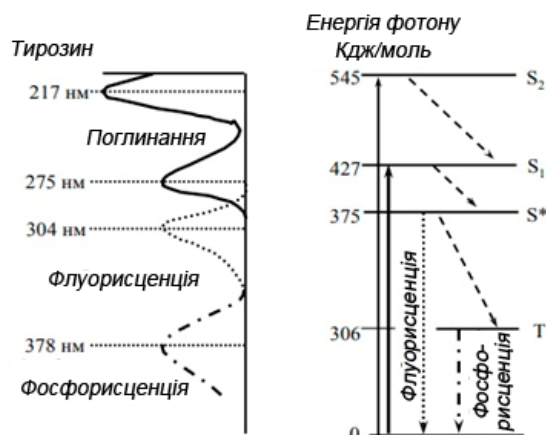


Рис. 2. Схеми енергетичних рівнів і електронних переходів за спектрами поглинання і люмінесценції [6]. *Зліва:* спектри поглинання і люмінесценції в шкалі енергій (або частот) фотонів, положення максимумів вказані в нанометрах; *справа:* енергетичні електронні рівні

Якісний люмінесцентний аналіз заснований на порівнянні форми спектрів досліджуваної суміші речовин з формою спектра індивідуальних сполук, які можуть входити до складу досліджуваної суміші. З причин, викладених нижче, необхідно використовувати розчини з низькою оптичною щільністю (наприклад, менше 0,1), інакше потрібно враховувати ефекти екранування і реабсорбції. Як і в випадку абсорбційної спектрофотометрії, для ідентифікації флуоресціюючої речовини найбільше значення мають положення максимуму, наявність та характер тонкої структури спектрів, півширина смуг флуоресценції. Важлива

особливість флуоресценції суміші декількох з'єднань полягає в тому, що спектр суміші змінюється при зміні довжини хвилі збудження, оскільки при різних довжинах хвиль можуть переважно порушуватися різні сполуки.

У випадку кількісного визначення флуоресцентної речовини в розчині на кювету з розчином здатної до флуоресценції речовини падає монохроматичний пучок світла з потужністю I_0 . Кількість поглиненої світлової енергії дорівнює $I_0 \cdot (1 - T)$, де T — пропускання розчину. Із загальної кількості поглинених фотонів частина, рівна квантовому виходу флуоресценції η , висвітлиться зразком в різних напрямках і в усій спектральній області люмінесценції. З цього загального світлового потоку за допомогою світлофільтрів або монохроматора можна виділити і сфокусувати на приймач світла світловий потік, який буде зареєстрований у вигляді фотоструму $I_{\text{люм}}$ [3, 6]:

$$I_{\text{люм}} = K \cdot I_0 \cdot (1 - T) \cdot \eta \quad (1)$$

Таким чином, інтенсивність люмінесценції $I_{\text{люм}}$ пропорційна інтенсивності збуджуючого світла I_0 , квантовому виходу люмінесценції η , коефіцієнту поглинання світла $(1 - T)$.

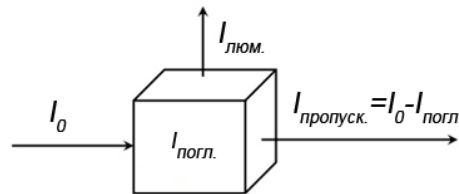


Рис. 3. Схема проведення кількісного люмінесцентного аналізу [3]

Коефіцієнт пропорційності K залежить від тілесного кута, в межах якого зібране світло люмінесценції, ширини вирізуючої монохроматором або світлофільтром спектральної області, пропускання монохроматора або світлофільтру і чутливості приймача світла (рис. 4).

Основна частина наших досліджень проводилася на базі та з використанням обладнання науково-дослідного підприємства «ЛІАМБІТ» інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського НАН України, результатом чого стала розробка макету вимірювального засобу «Люмінес» здатного до визначення відносних концентрацій слаболомінесцюючих сполук в колоїдних розчинах з межею виявлення 10^{-4} – 10^{-6} мг флуоресцена на 1000 мл. Застосований у дослідях випромінювач – 2-канальна система світлодіодів з довжинами хвиль 365 нм та 385 нм, загальною світловипромінювальною потужністю 1 Вт в УФ-діапазоні. Детектор: PIN-фотодіод, верхнє зчитування. Динамічний діапазон: 6 log, залежить від хімічної природи досліджуваних речовин. При виборі способу детекції виходу люмінесценції досліджуваних зразків ми зупинилися на способі реєстрації люмінесценції при якому фотоприймач розміщено під кутом 90° до нормалі проходження збуджуючого випромінювання.

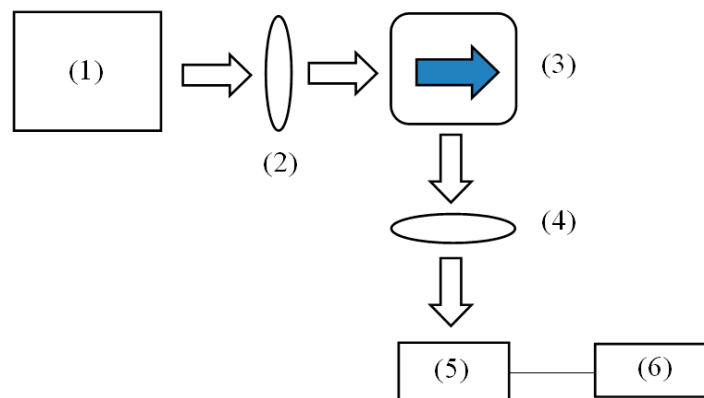


Рис. 4. Функціональна схема малогабаритного одного вимірювального каналу люмінесцентного реєстратора (вимірювача)

Для перших експериментальних робіт були обрані водні розчини барвників Родамін 6G та Нільський синій у якості тестових зразків. Спектри поглинання даних речовин у водному розчині знаходяться в області 500-650 нм [9], що добре узгоджується зі спектром випромінювання сучасних напівпровідникових джерел (LED). В кожному каналі експериментального пристрою використано світлодіодний випромінювач серії LTPL-C034UVH365 (1) з робочою вихідною потужністю 480 мВт в області 60 градусів, оптична формуюча система – короткофокусний об'єктив (2), кварцова кювета (3) з оптичним ходом до 10 мм. Реєстрацію люмінесценції здійснювали за допомогою напівпровідникового малощумного фотоприймача TSL267 фірми «TAOS» (5) з аналого-цифровою обробкою (6). Для екранування випромінювання збудження використовували синьо-зелений світлофільтр СЗС-21. Синьо-зелений світлофільтр СЗС-21 має діапазон поглинання в області 620-1500 нм, в комбінації зі склом ОС-11, ОС-12, ОС-13, ОС-14 дозволяє виділення

ділянок спектру в області 520-600 нм. Функціональна схема макету вимірювальної установки представлена на рис. 4.

Застосований нами у першій частині досліджень ксантеновий барвник Родамін 6G (R6G) або Родамін 590 є катіонним барвником з сильним поглинанням у видимому спектрі та високим показником виходу флуоресценції. R6G широко використовується як барвник для відслідковування наявності домішок у воді. Деякі приклади застосування родамін-барвника – флуоресцентна мікроскопія, проточна цитометрія, флуоресцентна кореляційна спектроскопія та інші [12].

Відзначено, що спектр випромінювання барвника R6G має два відмінні піки, на довжинах хвиль 550 нм та 602 нм. Концентрація барвника R6G впливає на ці максимуми. Зі зростанням концентрації R6G пік викидів зміщується з 550 нм, в якому домінує мономер, до 602 нм, в якому переважають димерні випромінювання.

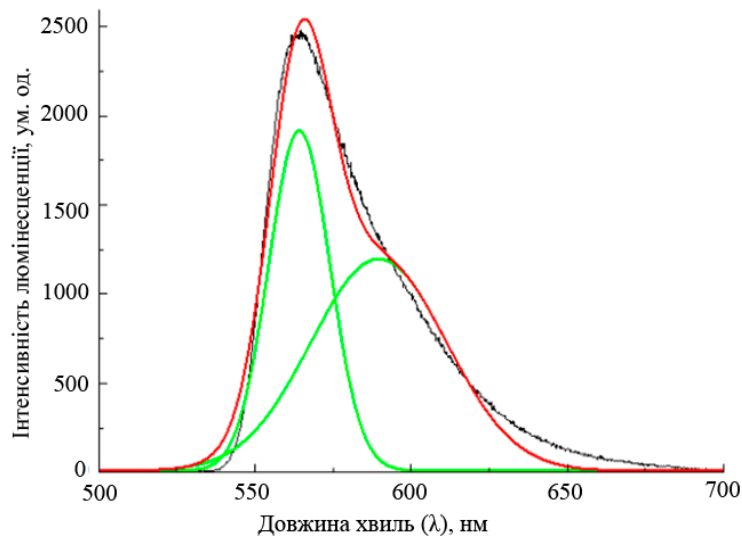


Рис. 5. Порівняння піків емісії та спектрів випромінювання люмінесценції Родамін G (R6G) визначених концентрації (г/мл) в колоїдному розчині (багатокомпонентна система)

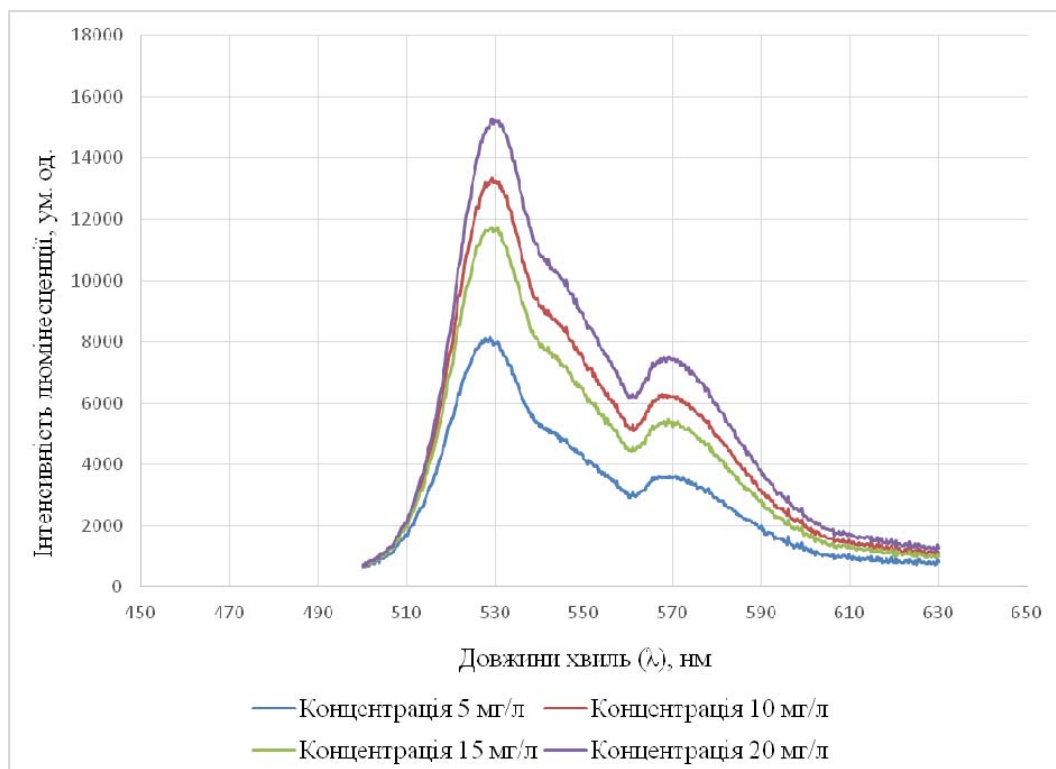


Рис. 6. Зміна інтенсивності (у відносних одиницях) люмінесценції залежно від концентрації (від 5 мг до 20 мг) барвника Родамін 6G у воді.

Родамін-барвники, що належать до сімейства ксантен, мають відмінну фотостабільність та фотофізичні властивості. Родамін 6G як і його попередники, має ксантен хромофор і показує високий

флуоресцентний квантовий вихід. Чутливість визначення люмінесценції R6G у водних розчинах становить до $\sim 1 \cdot 10^{-15}$ г/мл з межею виявлення $6 \cdot 10^{-15}$ г/мл. Робоча крива лінійна понад чотири порядки і може бути продовжена до більш високих концентрацій [10].

В результаті проведення вимірів із використанням приладу формування і обробки сигналу (ПФОС) відгуків досліджуваних зразків на базі плати розширення Arduino UNO R3 (мікроконтролер ATmega328) і використанням синьо-зеленого світлофільтру СЗС-21 були отримані наступні залежності інтенсивності квантового виходу люмінесценції від концентрації (мг/л) при роботі із розчином в воді барвником Родамін 6G різних концентрацій [7, 8]

В даному випадку, динамічний діапазон вимірюваних значень по напрузі становив 18000 відносних одиниць що відповідають робочому діапазону по напрузі $U_{\text{роб.}} = 2,4\text{--}32,4$ В на виході фотодетектору з підключеним трансімpendантним підсилювачем.

Висновки

У випадку кількісного визначення хімічних сполук використовуються методи флуоресценції, які включають в себе різні операції з розділення, очищення складових, обробки продукту флуорохромами та ін. Абсолютна чутливість люмінесцентного методу досить висока. Відносна концентрація речовини також може бути дуже малою, – для яскраво люмінесцюючих речовин вона становить величину порядку 10^{-10} г/г. Даний метод застосовують для кількісного визначення поліциклічних органічних сполук, вітамінів, білків, нітратів, сульфідів, ціанідів, токсичних металів у складі продуктів, для діагностики псування овочів, плодів і виявлення в продуктах консервантів, лікарських препаратів, канцерогенних речовин та ін.

Якщо збудження люмінесценції здійснюється монохроматичним світлом, то з'являється можливість виміряти залежність інтенсивності люмінесценції від довжини хвилі збуджуючого світла. Характер цієї залежності ясний з рівняння (1).

Оскільки квантовий вихід флуоресценції для конкретної флуоресцюючої речовини, відповідно до закону Вавілова, від довжини хвилі збудження не залежить (так само як і константа K), ясно, що форма спектра збудження повторює форму залежності від довжини хвилі коефіцієнта поглинання, тобто функції $(1 - T) = f(\lambda)$. Таким чином враховуючи Стоксів зсув і правило Левшина можна вибрати спектральний діапазон досліджень, у якому буде знаходитися максимум енергії квантового виходу люмінесценції. Виділивши «спектральне вікно» певного діапазону за допомогою смугових фільтрів і оптичного скла з відомим коефіцієнтом поглинання, можна проводити в ньому вимірювання інтенсивності люмінесценції без використання складних диспергуючих елементів на базі монохроматорів та дифракційних решіток.

Проведені нами дослідження квантового виходу люмінесценції вибраних хімічних сполук та наведені в роботі статистичні дані показують переваги використання сильно люмінесцюючих речовин, до яких відносяться усі без винятку натуральні та штучні барвники, в якості опорних зразків для калібрування вимірювального засобу придатного до вимірювання квантового виходу люмінесценції. Дані сполуки заданих концентрацій дозволяють калібрувати динамічний діапазон вимірювального засобу у досить широких межах, та можуть служити джерелами опорного сигналу у випадку застосування вимірювального каналу контролю у схемі дослідів.

Література

1. Власова И. В. Методология спектрофотометрического анализа смесей органических соединений. Проблема неаддитивности светопоглощения / И. В. Власова, В. И. Вершинин, Т. Г. Цюпко // Журн. аналит. химии. – 2011. – Т. 66, № 1. – С. 25–33.
2. Глоба И.И. Оптические методы и приборы контроля качества / Глоба И.И. – Минск : БГТУ, 2003. – 424 с.
3. Григорьянц А.Г. Инструментальные методы контроля состава и свойств полидисперсных сред / А.Г. Григорьянц, М.А. Коротаева, В.И. Алехнович, И.Н. Шиганов // Наука и образование : научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 2. – С. 51–64.
4. Орлова А.О. Анализ многокомпонентной смеси по двумерным спектрам люминесценции. Современные технологии. Труды молодых ученых ИТМО / под ред. С.А. Козлова. – СПб : СПб ГИТМО (ТУ), 2001. – С. 24–31.
5. Перьков И. Г. Спектры аддитивных свойств и их модификация в неселективных методах анализа многокомпонентных систем / И. Г. Перьков // Журн. аналит. химии. – 1991. – Т. 46. – Вып. 10. – С. 2069–2087.
6. Прикладная физическая оптика / под ред. В.А. Москалева. – СПб : Политехника, 1995. – 316 с.
7. Специфікація мікроконтролеру ATmega328 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf
8. Специфікація плати розширення Arduino UNO R3 на базі мікроконтролера ATmega328 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>
9. Niki K., Kiso Y., Takeuchi T. et al. // Analytical Methods. – 2010. – V.2. – P. 678–683.
10. Sugiarto I.T. Analysis of dual peak emission from Rhodamine 6G organic dyes using photoluminescence // I.T. Sugiarto, Isnaeni and K.Y. Putri Research Center for Physics – Indonesian Institute of

Sciences Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Indonesia – 2017. – V. 10. – P. 312–314.

11. Valeur, B.; Berberan-Santos, M.N. *Molecular Fluorescence: Principles and Applications*, 2nd ed.; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 2013, P. 138–142.

12. Würth C.I. Determination of the absolute fluorescence quantum yield of rhodamine 6G with optical and photoacoustic methods – providing the basis for fluorescence quantum yield standards. // Würth C.I., González M.G., Niessner R., Panne U., Haisch C., Genger U.R.: *Talanta*, 2012. – Vol. 90. – P. 30–37.

References

1. Vlasova I. V. Metodologiya spektrofotometricheskogo analiza smesey organicheskikh soedineniy. Problema neadditivnosti svetopogloscheniya / I. V. Vlasova, V. I. Vershinin, T. G. Tsyupko // *Jurn. analit. himii.* – 2011. – T. 66, № 1. – S. 25–33.

2. Globa I.I. *Opticheskie metody i pribory kontrolya kachestva* / Globa I.I. – Minsk : BGTU, 2003. – 424 c.

3. Grigoryants A.G. Instrumentalnye metody kontrolya sostava i svoystv polidispersnykh sred / A.G. Grigoryants, M.A. Korotaeva, V.I. Alehnovich, I.N. SHiganov // *Nauka i obrazovanie : nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana.* – 2012. – № 2. – S. 51–64.

4. Orlova A.O. Analiz mnogokomponentnoy smesi po dvumernym spektram lyuminetsentsii. *Sovremennyye tehnologii. Trudy molodykh uchenykh ITMO* / pod red. S.A. Kozlova. – SPb : SPb GITMO (TU), 2001. – S. 24–31.

5. Perkov I. G. Spektryy additivnykh svoystv i ih modifikatsiya v neselektivnykh metodah analiza mnogokomponentnykh sistem / I. G. Perkov // *Jurn. analit. himii.* – 1991. – T. 46. – Vyip. 10. – S. 2069–2087.

6. *Prikladnaya fizicheskaya optika* / pod red. V.A. Moskaleva. – SPb : Politehnika, 1995. – 316 c.

7. Spetsyifikatsiya mikrokontroleru ATmega328 [Elektronnyi resurs]. – Rezhyim dostupu : http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf.

8. Spetsyifikatsiya platy rozshyrennia Arduino UNO R3 na bazi mikrokontrolera ATmega328 [Elektronnyi resurs]. – Rezhyim dostupu : <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>.

9. Niki K., Kiso Y., Takeuchi T. et al. // *Analytical Methods.* – 2010. – V.2. – P. 678–683.

10. Sugiarto I.T. Analysis of dual peak emission from Rhodamine 6G organic dyes using photoluminescence // I.T. Sugiarto, Isnaeni and K.Y. Putri Research Center for Physics – Indonesian Institute of Sciences Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Indonesia – 2017. – V. 10. – P. 312–314.

11. Valeur, B.; Berberan-Santos, M.N. *Molecular Fluorescence: Principles and Applications*, 2nd ed.; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 2013, P. 138–142.

12. Würth C.I. Determination of the absolute fluorescence quantum yield of rhodamine 6G with optical and photoacoustic methods – providing the basis for fluorescence quantum yield standards. // Würth C.I., González M.G., Niessner R., Panne U., Haisch C., Genger U.R.: *Talanta*, 2012. – Vol. 90. – P. 30–37.

Рецензія/Peer review : 22.06.2018 р.

Надрукована/Printed : 11.07.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.Г. Здоренко