

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.02.054>

УДК 539.188; 537.186

Ю.А. Бандурин¹, <https://orcid.org/0000-0002-8047-1034>

Ш.Б. Молнар², <https://orcid.org/0000-0002-5581-7435>

А.М. Завілопуло¹, <https://orcid.org/0000-0001-8334-2804>

О.О. Бандурин³, <https://orcid.org/0009-0009-0253-8414>

¹ Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна

² ДВНЗ Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

³ Ужгородський науковий ліцей Закарпатської обласної ради, Ужгород, Україна

E-mail: bandurin_unc@ukr.net

Особливості спектрів фотолюмінесценції чорних неметалевих поверхонь

Представлена член-кореспондентом НАН України Г.М. Гомонай

Досліджено спектри фотолюмінесценції зразків чорних неметалевих поверхонь, а саме пластику, фотонаперу та оксамиту. Проведений аналіз показав, що на характеристики цих спектрів впливає процес фотозбудження молекул, які входять до складу цих матеріалів. Експериментально визначені спектри фотолюмінесценції чорної поверхні оксамиту після її покриття сажею та аквадагом. Встановлено, що оксамит, вкритий аквадагом має найменшу інтенсивність фотолюмінесценції. Запропоновано методику вимірювань випромінювальних властивостей рідини на чорних поверхнях методом оптичної спектроскопії. Вперше на поверхні оксамиту в області довжин хвиль $\lambda = 400\div 700$ нм отримано спектри фотолюмінесценції крапель рідин – води, спирту та 40% розчину глюкози. Ретельний розгляд цих спектрів дозволив ідентифікувати випромінювання радикалів ОН й СН та показати вплив типу зв'язку ОН з остовом молекул досліджених рідин. Запропонована методика вивчення фотолюмінесценції рідин дозволяє безпосередньо вимірювати спектри їх люмінесценції без використання пробірок, кювет.

Ключові слова: чорне тіло, оксамит, аквадаг, спектр люмінесценції, енергія фотонів, фотолюмінесценція.

Вступ. Розробка нових детекторів фотонів, джерел випромінювання у різних ділянках спектра постійно стимулює нові напрями застосування спектрофотометрії. Так, наприклад, за останнє десятиріччя широко досліджують можливість застосування явища фотолюмінесценції (ФЛ) для швидкого та надійного виявлення бактерій [1—7], йдеться про

Ц и т у в а н н я: Бандурин Ю.А., Молнар Ш.Б., Завілопуло А.М., Бандурин О.О. Особливості спектрів фотолюмінесценції чорних неметалевих поверхонь. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2025. № 2. С. 54—64. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.02.054>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

розвиток діагностичних методик [8—13]. Разом з тим, під час проведення експериментальних досліджень з ФЛ потрібно:

- *вибрати певний матеріал (підкладка) для розташування зразків, поверхня якого має бути інертною для досліджуваних бактерій та хімічних сполук;*
- *підкладка має давати мінімальний внесок в інтенсивність ФЛ досліджуваних об'єктів.*

Для запобігання процесам відбивання та розсіяння збуджуючих фотонів матеріал підкладки має бути чорного кольору з шорсткою поверхнею. Такими матеріалами можуть бути: пластмаси, папір, тканини, які не володіють люмінесцентними властивостями. Тому задача створення та експериментальної перевірки такого матеріалу на ФЛ властивості залишається вельми актуальною. Більшість досліджень ФЛ характеристик різних об'єктів виконується у видимому, 400—800 нм, діапазоні спектра при збудженні фотонами ультрафіолетового діапазону.

На сьогодні мало результатів з експериментальних досліджень спектрів флуоресценції води, спирту, глюкози, що стосується спектрів ФЛ неметалевих поверхонь то такі дані взагалі відсутні. У фундаментальній монографії [15] розглянуті теоретичні аспекти водних систем та закономірності молекулярної організації в приповерхній області. В [16] показано, що водний розчин глюкози не має флуоресценції взагалі, а в монографії [17] вказано на складності ідентифікації випромінювачів при флуоресцентному аналізі органічних сполук. Тому проведені вперше дослідження спектрів ФЛ зразків чорних неметалевих поверхонь та розташованих на них крапель рідин дозволили отримати нові дані про процеси фотозбудження молекул.

Мета даної роботи — методом оптичної спектроскопії виконати дослідження в області $\lambda = 400\div 700$ нм спектрів ФЛ поверхонь пластику, фотопаперу та оксамиту, а також крапель води, спирту та 40% розчину глюкози, які нанесені на поверхню чорного оксамиту, вкритого аквадагом.

Експеримент. Спектри люмінесценції досліджували на Spectrofluorophotometer RF-6000 (Shimadzu Corporation. 86, 2015), який має високу чутливість, широкий спектральний діапазон і дозволяє вимірювати спектри флуоресценції, біоломінесценції, хемілюмінесценції, електролюмінесценції зразків різної природи: рідин, порошків. Цей прилад складається з трьох частин: у першій знаходиться джерело фотонів (ксенонова лампа) для опромінення зразків та монохроматор для вибору необхідної енергії (довжини хвилі) фотонів, у другій — тримач зразків, а у третій — дифракційний монохроматор та детектор фотонів — фотоелектронний помножувач. Всі налаштування приладу, вибір опцій експерименту, виведення інформації на монітор здійснювались за спеціальною програмою. В наших експериментах ширини щілин монохроматорів обирались такими, щоб забезпечити смугу пропускання фотонів у 5 нм. Швидкість сканування спектрів складала 600 нм/хв. Крок зміни довжини хвилі складав 1 нм. Вимірювання, контроль та обробка корисного сигналу проводили автоматично персональним комп'ютером у режимі пошуку оптимальної довжини хвилі збудження/емісії. Корекцію вимірюваного сигналу на спектральну чутливість здійснювали за програмою LabSolutions RF.

Методика експерименту полягала у збудженні ФЛ досліджуваних поверхонь випромінюванням від ксенонової лампи з подальшим аналізом спектрів люмінесценції при різних енергіях фотонів збудження. Для вимірювання ФЛ поверхні нами сконструйовано спеціальний тримач зразків [14], який значно покращує можливості детектування корисного сигналу завдяки зменшенню кількості відбитих від поверхні та розсіяних фотонів.

Не зважаючи на високоякісне затемнення внутрішніх поверхонь оптичних приладів, завжди існує проблема розсіяння та відбиття від них фотонів ($\sim 3\text{—}5\%$), що збуджують ФЛ. Інша проблема полягає у їх можливій ФЛ. Ці обидва процеси збільшують фоновий «шум» всередині оптичних приладів, що заважає виділяти корисний сигнал у випадку малої інтенсивності люмінесценції. Попередні дослідження [18] показали, що, окрім правильного вибору геометрії експерименту, при вимірюваннях потрібно визначити характеристики потоку розсіяного світла всередині приладу (для визначення внеску «фоновому сигналу») для кожного значення енергії збуджуючих фотонів.

Для досліджень ФЛ зразки чорного кольору (пластик, фотопапір, оксамит) вертикально фіксувалися у тримачі таким чином, що збуджуючі фотони падали на поверхню зразка під кутом 15° . Відповідно, спостереження ФЛ відбувалось під кутом 75° до поверхні. Така геометрія досліду забезпечила значне зниження впливу потоків розсіяних та відбитих від поверхні зразка фотонів.

Для зменшення кількості «зайвих» фотонів на вихідну щілину відсіку з лампою встановлювали світлофільтр УФС-5 (смуга пропускання $300\text{—}400\text{ нм}$ з максимумом пропускання при 360 нм). На вхідну щілину 3-ї частини приладу (детектор) встановлювали світлофільтр ЖС-11 (смуга пропускання починається з 400 нм , коефіцієнт пропускання сягає 95% у спектральній області до 900 нм). В якості зразків з чорною поверхнею були використані:

- 1) чорна пластмаса від 3,5 дюйма дискети (матова поверхня);
- 2) чорний фотопапір, оброблений шліф шкуркою із зерном 600;
- 3) чорний оксамит (матова поверхня, використовується для затемнення в оптичних дослідах).

Зразки являли собою пластини розміром $20 \times 20\text{ мм}^2$, які вертикально розташовували на тримачі зразків таким чином, що опромінювана поверхня знаходилась завжди в однаковому місці по відношенню до потоку фотонів збудження.

Поверхні зразків чорного оксамиту мали різні покриття. На один зразок наносили шар сажі від парафінової свічки, на другий — шар аквадагу, а третій був вкритий лаком ТЛС (створений на основі саже-графітової композиції для відновлення струмопровідних поверхонь) чорного кольору. Аквадаг та лак ТЛС створені на основі атомарного карбону, тому спектри ФЛ цих поверхонь майже ідентичні.

Результати дослідження та їх обговорення. Для кожного матеріалу в спектральній області $400\text{—}700\text{ нм}$ досліджені спектри ФЛ (СФЛ) збуджуючими фотонами енергій, що відповідають довжинам хвиль $\lambda_{36} = 380, 351, 323$ та 275 нм . На рис. 1—4 для найбільшої довжини $\lambda_{36} = 380\text{ нм}$ приведені СФЛ від поверхонь, що підготовлені за різних умов. Аналогічні результати отримані нами і для інших довжин хвиль збуджуючих фотонів.

Спектри ФЛ зразків поверхонь пластику, фотопаперу та оксамиту показані на рис. 1, де видно, що кожен зразок володіє власними люмінесцентними властивостями. Так, у спектрі фотопаперу спостерігається найбільша ФЛ, інтенсивність якої вдвічі перевищує сигнал від пластику та оксамиту. Всі три спектри демонструють чітку структуру з двома максимумами поблизу 440 та 470 нм . Лише в діапазоні $520\text{—}650\text{ нм}$ спостерігаються невеликі відмінності між спектрами пластику та оксамиту. Це дозволяє припустити, що поява цих двох максимумів є наслідком протікання процесів фотозбудження однакових молекулярних фрагментів, що входять до складу всіх трьох зразків.

Оскільки папір виготовлено із целюлози, а до складу пластику та оксамиту входять органічні молекули, то очевидно, саме вони однаково збуджуються під дією фотонів. Аналіз

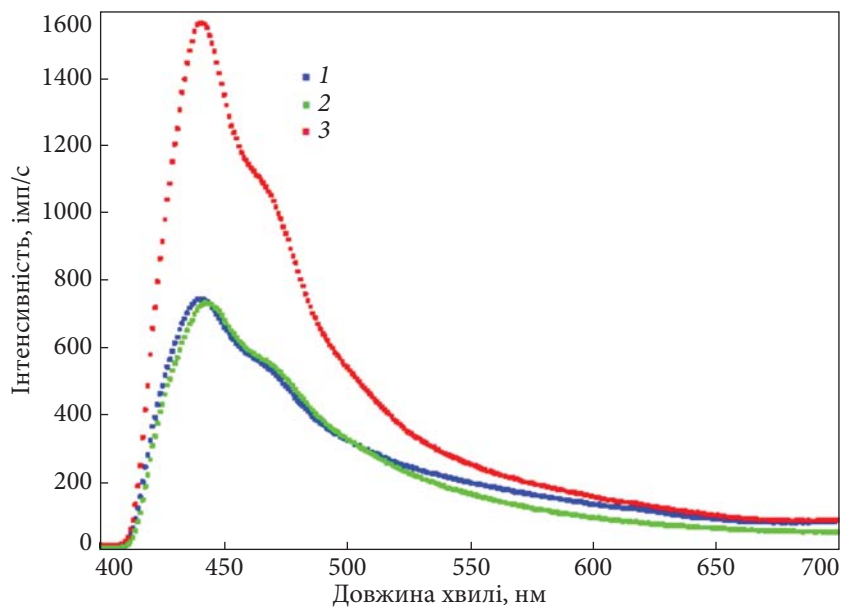


Рис. 1. СФЛ поверхонь пластику (1), оксамиту (2) та фотопаперу (3)

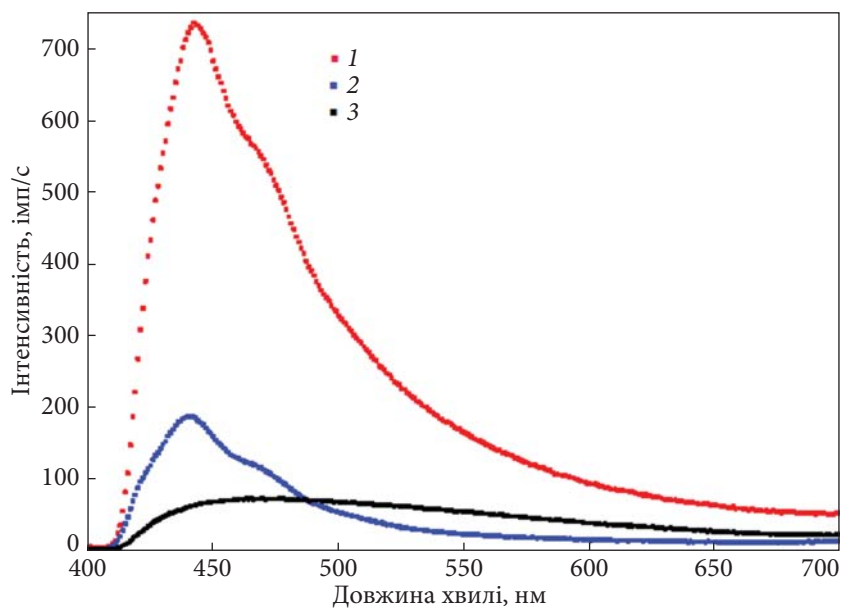


Рис. 2. СФЛ чистої поверхні оксамиту (1) та вкритого сажею (2) й аквадагом (3)

випромінювання можливих молекул, що дають внесок у СФЛ [8, 10, 11] показав, що найбільш імовірними кандидатами є двоатомні молекули ОН, СО та СН. Складність інтерпретації смуг у СФЛ полягає у співпадинні довжин хвиль випромінювання молекул ОН та СН. Оптичні спектри випромінювання цих молекул при збудженні електронним ударом парів валіну [8] та ацетону [20] це підтверджують.

На наш погляд поверхня чорного оксамиту найбільш перспективна для фотометричних вимірювань. Підготовлені зразки були вкриті сажею та аквадагом. Візуально «закопчена» поверхня оксамиту виглядала найбільш чорною. На рис. 2, для аналогічних умов

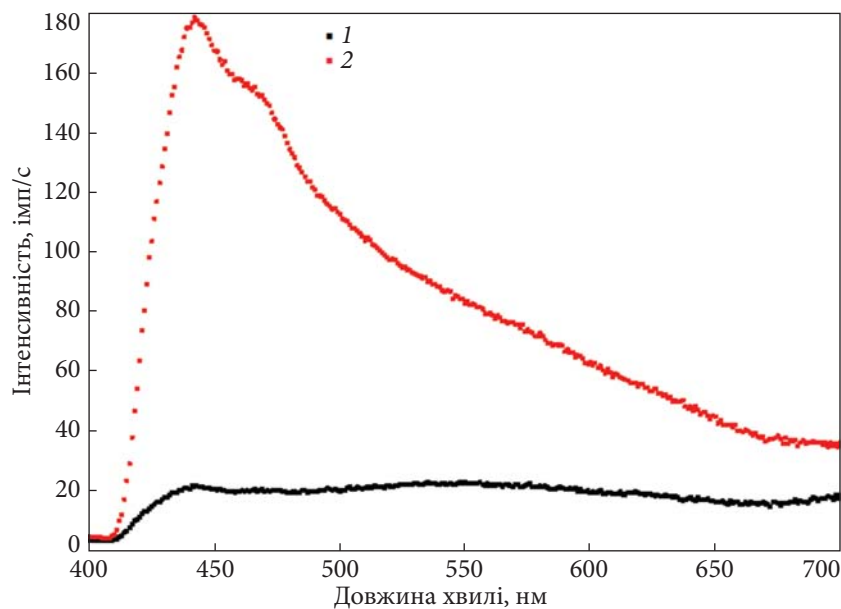


Рис. 3. СФЛ поверхні оксамиту, вкритою аквадагом: 1 — в темноті; 2 — під дією сонячних променів

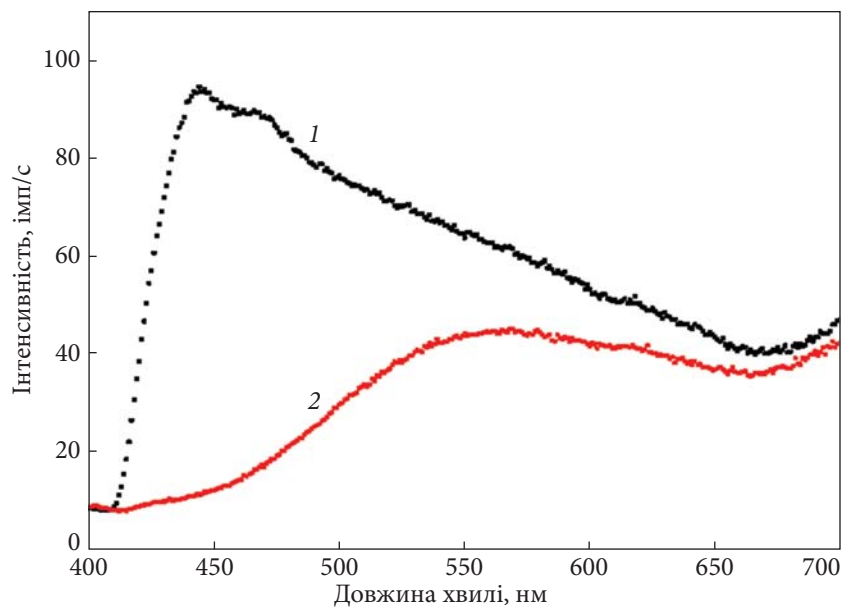


Рис. 4. СФЛ зразка (оксамит вкритий аквадагом) (1) та світла розсіяного на внутрішніх елементах приладу (2)

фотозбудження, представлені СФЛ оксамиту у порівнянні з поверхнями, вкритими сажею та аквадагом. Наявність сажі на поверхні оксамиту істотно зменшує інтенсивність ФЛ, проте прояв двопікової структури в спектрі залишається та навіть з'являється третій, короткохвильовий максимум поблизу 420 нм. Сажа від горіння парафінової свічки, отримана на поверхні оксамиту, принаймні містить молекули СН та ОН, що у подальшому призводить до їх фотозбудження. Зазначимо також, що утворення сажі на поверхні оксамиту істотно (більш ніж у 4 рази) зменшує сигнал у довгохвильовій області спектра 500—700 нм, де відбувається випромінювання фотозбуджених радикалів ОН. Таким чи-

ном, можна стверджувати, що наявність молекул СН на поверхні оксамиту пригнічує вихід фотонів від радикалів ОН.

Найменша та безструктурна інтенсивність випромінювання СФЛ зафіксована нами для поверхні оксамиту (див. рис. 2), вкритої аквадагом — більш ніж у 15 разів. Аквадаг — це розчин атомарного карбону. Можливо відсутність молекулярних фрагментів на поверхні і є причиною цього. Наявність такої плівки на поверхні оксамиту також пригнічує фотозбудження молекулярних складових самої підкладки.

Для поверхні оксамиту нами отримано цікавий результат (рис. 3), який демонструє вплив на СФЛ різних способів нанесення шарів покриття аквадагом: у темряві та під дією сонячних променів. Спектр зразка без доступу світла (1) має мінімальну інтенсивність й відсутність яскраво виражених молекулярних емісій, а під дією сонячних променів інтенсивність СФЛ збільшується майже в 2,5 раза та спостерігаються особливості, які свідчать про наявність у спектрі фотостимульованих молекулярних сполук (2). Сонячні промені спрямовували на поверхню оксамиту крізь оптично непрозоре для ультрафіолетових променів скло, тому на поверхню оксамиту потрапляли кванти світла з енергією $\leq 3,1$ еВ. Виявляється, що вже при такій енергії відбувається процес фотодисоціативного утворення збуджених молекул на поверхні.

Таким чином, найкращі люмінесцентні характеристики серед експериментально досліджених має поверхня оксамиту, що вкрита аквадагом та висушена у темноті.

Вклад у фоновий сигнал можуть вносити розсіяні на внутрішніх елементах приладу фотони від ксенонової лампи. Для визначення цього вкладу було виміряно спектр за наявності і відсутності зразка (див. рис. 4). За відсутності зразка можливим джерелом фону залишався лише тримач зразків, металеві частини якого було вкрито аквадагом. Як бачимо (2), за відсутності зразка спостерігається дуже слабка інтенсивність випромінювання в короткохвильовій частині СФЛ (≤ 450 нм). В області 450—650 нм реєструється невеликий сигнал, зумовлений наявністю фотонів, що розсіялись на оптичних елементах внутрішньої

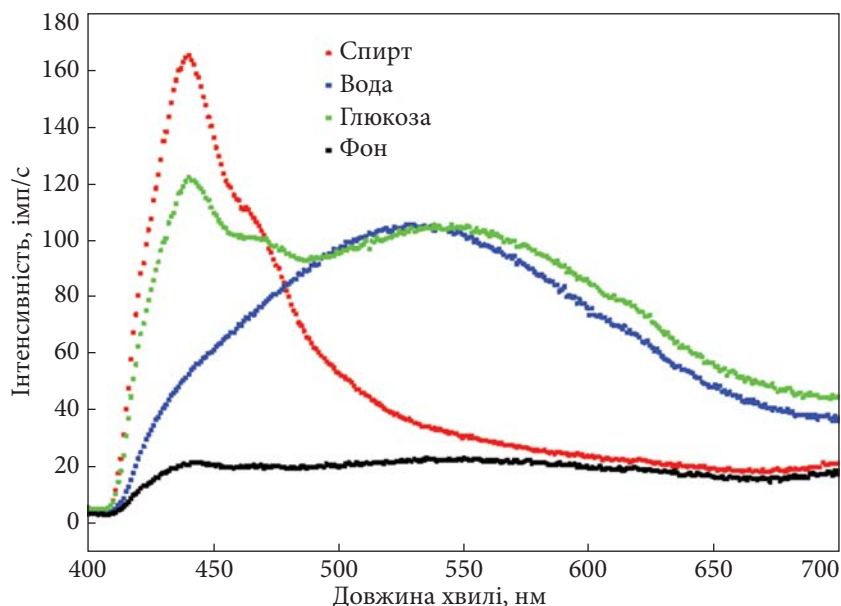


Рис. 5. СФЛ спирту, води, 40 % розчину глюкози та фону (оксамит, вкритий аквадагом)

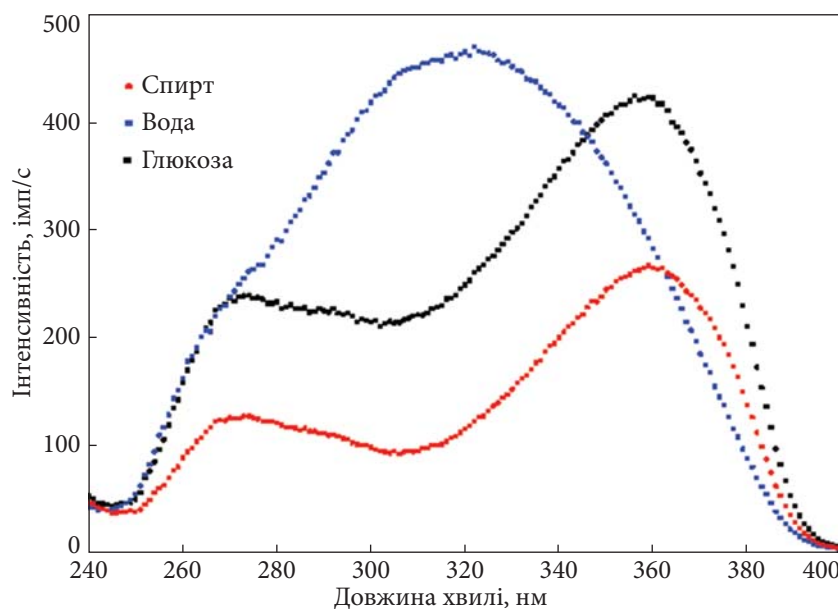


Рис. 6. Залежності інтенсивності ФЛ ($\lambda = 440$ нм) від довжини хвилі збуджуючих фотонів у СФЛ молекул води, спирту та глюкози

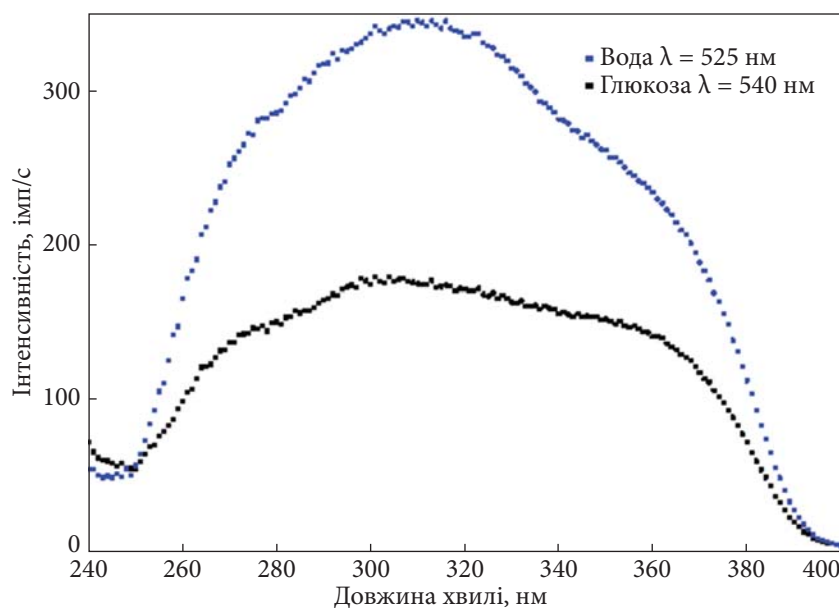


Рис. 7. Залежності інтенсивності ФЛ від довжини хвилі збуджуючих фотонів у СФЛ води та глюкози

частини приладу (поверхнях світлофільтрів, поверхнях вікон на виході відсіку з лампою та на вході в детектуючу частину приладу). Невелике зростання сигналу при довжинах хвиль понад 660 нм пов'язане із початком невеликої смуги пропускання (~20 %) світлофільтра УФС-5 і на дослідження спектрів ФЛ істотно не впливає.

З використанням описаної вище методики виконано дослідження спектрів фотолюмінесценції рідин нанесених на поверхню чорного оксамиту, вкритого аквадагом. Проведені виміри СФЛ спирту-ректифікату (C_2H_5OH), дистильованої води (H_2O) та 40 % водного розчину глюкози ($C_6H_{12}O_6 + H_2O$).

СФЛ цих рідин та чистої поверхні чорного оксамиту з аквадагом (фон) представлені на рис. 5. В спектрах спирту та розчину глюкози спостерігаються два короткохвильових максимуми, при 440 і 470 нм, які є для пластику, фотопаперу та невикритого оксамиту (див. рис. 1). У спектрах води та розчину глюкози наявні широкі максимуми: 525 нм для води й 540 нм — для глюкози. Невелика різниця в положенні максимуму в спектрах води та розчину глюкози може бути пояснена різною величиною зв'язка радикалу ОН в цих молекулах.

Аналізуючи відмінності в отриманих спектрах, можна зробити ряд важливих висновків. Очевидно, що СФЛ води формується виключно за рахунок процесів фотозбудження та випромінювання радикалів ОН. При цьому кількість збуджених коливальних рівнів настільки велика, що вплив їх випромінювальної релаксації спостерігається у всьому дослідженому спектральному діапазоні 400—700 нм. В складі молекули води відсутні радикали СН, але в області 440—450 нм спостерігаємо наявність невеликого максимуму, який належить суто радикалу ОН. Спроба інтерпретації цієї ділянки СФЛ валіну [18] за допомогою деконволюції спектра, засвідчила, що у ній є щонайменше чотири молекулярні смуги з максимумами при 425,6; 430,9; 443 та 451,6 нм, які, ймовірно, належать радикалу ОН.

В спектральній області 500—700 нм в СФЛ води та розчину глюкози спостерігається однаковий широкий максимум при 530—540 нм. Можна зробити висновок про однотипне збудження ОН (у випадку розчину глюкози частка молекул води складає 60 %). В складі молекули спирту C_2H_5OH концентрація радикалів ОН мала (одноатомний спирт), тому, хоча випромінювання на ділянці 530—540 нм фіксується, але його частка невелика та чітко не виражена.

Натомість, в СФЛ спирту домінує максимум поблизу 440 нм, де можливий прояв випромінювання від молекул СН. Як показали дослідження спектрів випромінювання, отриманих при збудженні електронним ударом пари молекул ацетону [19], в інтервалі довжин хвиль 415—441,8 нм спостерігається випромінювання інтенсивної смуги молекули СН (переходи системи $A^2\Delta-X^2\Pi$). Тому, ймовірно, в цій спектральній області у випадку спирту відбувається суперпозиція випромінювання як ОН, так і СН.

Наявність короткохвильового максимуму та схожість спектрів ФЛ розчину глюкози та спирту, свідчать що їх формування відбувається за рахунок внеску випромінювання ОН та СН. Внесок ОН залишається, однак можлива його зміна, оскільки принципову роль відіграє спосіб приєднання радикалу ОН до молекулярної сполуки. Якщо у випадку води це просто атом гідрогену, то у випадку глюкози та спирту це атом карбону. Внаслідок цього можливе ефективне збудження інших коливальних рівнів ОН.

Для підтвердження правильності запропонованої інтерпретації випромінювачів СФЛ виконано порівняльний аналіз спектрів збудження ФЛ, які представлені на рис. 6 та 7. Так, якщо форма спектрів спирту та розчину глюкози зовні схожа (див рис. 6), то спектр води (він збігається зі спектром розчину глюкози в діапазоні 240—270 нм) відрізняється від них як за формою, так і за положенням найбільшого максимуму. У випадку води максимум збудження ФЛ на $\lambda = 440$ нм спостерігається при 320 нм, тоді як у випадку спирту та розчину глюкози — при 358 нм. Ці відмінності підтверджують, що в СФЛ води на довжині хвилі 440 нм ми спостерігаємо випромінювання радикалів ОН (див. рис.5). У СФЛ спирту та розчину глюкози основний внесок на цій довжині хвилі, поряд з випромінюванням радикалів ОН, здійснюється за рахунок випромінювання радикалів СН. На рис. 7 наведені

аналогічні залежності для ФЛ води (при $\lambda=525$ нм) та розчину глюкози (при $\lambda=540$ нм) для довгохвильового максимуму СФЛ. Загалом спостерігається тотожність форми спектрів, що свідчить про однакову природу випромінювача, тобто це радикали ОН.

Висновки. Нами отримані та проаналізовані люмінесцентні характеристики різних чорних поверхонь для встановлення найменш відбиваючої поверхні з мінімальною фотолюмінесцентною здатністю. Зафіксовано внесок розсіяних та відбитих фотонів всередині спектрофлюорофотометра Shimadzu RF-6000 для різних довжин хвиль збуджуючих фотонів. В спектрах ФЛ ідентифіковано випромінювання радикалів ОН й СН та встановлено вплив типу зв'язку ОН з остовом молекул рідин — води, спирту та 40 % розчину глюкози. Використання поверхні чорного оксамиту, вкритого аквадагом, дозволило дослідити та проаналізувати спектральні особливості ФЛ низки органічних рідин у вигляді краплин.

Автори висловлюють подяку проф. Є.Ю. Реметі за цінні зауваження в процесі підготовки рукопису статті.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Benjian Shen, Liucun Gao, Jin Xing, Jing Fang, Jie Liang, Qiong Ma, Yingwei Fan, Hongxiang Kang. Bactericidal effects research of 470 nm blue light on *Pseudomonas aeruginosa*: in vitro and in vivo research. *Laser Phys.* 2019. **29**. P. 1—7. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aaf908>
2. Yujia Xu, Hongwei Zheng, Jianxin Sui, Hong Linand, Limin Cao. Rapid and Sen-sitive Fluorescence Detection of *Staphylococcus aureus* Based on Polyethyleneimine-Enhanced Boronate Affinity Isolation. *Foods*. 2023. **12**. P. 1366—1381. <https://doi.org/10.3390/foods12071366>
3. Foster T.J., Geoghegan J.A., Ganesh V.K., Hook M. Adhesion, invasion and evasion: The many functions of the surface proteins of *Staphylococcus aureus*. *Nat. Rev. Microbiol.* 2014. **12**(1). P. 49—62. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3161>
4. Lipcsei L.E., Brown L.G., Coleman E.W., Kramer A., Masters M., Wittry B.C., Reed K., Radke V.J. Foodborne illness outbreaks at retail establishments—National Environmental Assessment Reporting System, 16 state and local health departments, 2014–2016. *MMWR Surveill. Summ.* 2019. **8**. P. 1—20.
5. Kalyantanda G., Shumyak L., Archibald L.K. Cronobacter species contamination of powdered infant formula and the implications for neonatal health. *Front. Pediatr.* 2015. **3**. P. 56—64. <https://doi.org/10.3389/fped.2015.00056>
6. Hansen N.S., Nielsen L.T., Leth S. *Staphylococcus aureus* toxic shock syndrome originating from a split skin transplant. *Ugeskr. Laeger.* 2019. **181**. V08180580.
7. Hu Yaohua, Wang Chengcheng, Bai Bing, Li Mintong, Ronghui Wang, Yanbin Li. Detection of *Staphylococcus Aureus* using quantum dots as fluorescence labels. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 2014. **7**, No.1. P. 77—83.
8. Bandurin Yu.A., Zavilopulo A.N., Molnar Sh., Shpenik O.O. Excitation of L-valine molecules by electrons and photons. *The Eur. Phys. J. D.* 2022. **76**, № 9. <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00331-0/>
9. Sala L., Rakovsky J., Zerolov A., Kocisek J. Light-Induced Damage to DNA Origami Nanostructures in the 193nm-310nm Range. *J. Phys. B: Atomic, Molec. and Opt. Phys.* 2023. P. 1—12. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/acf3bd>
10. Бандурин Ю.А., Попик Т.Ю., Завілопуло А.М. Взаємодія фотонів з молекулами глюкози і фруктози. *Допов. Нац. акад наук Укр.* 2022. № 1. С. 58—63. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.01.058>
11. Bandurin Yu.A., Zavilopulo A.N. Fluorescence Excitation Spectroscopy of Glucose Molecules. *J. Phys. & Opt. Sci.* 2023. **5**(1). P. 1—7. [https://doi.org/10.47363/JPSOS/2023\(5\)177](https://doi.org/10.47363/JPSOS/2023(5)177)
12. Visaggio D., Pirolo M., Frangipani E. et al. A Highly Sensitive Luminescent Biosensor for the Microvolumetric Detection of the *Pseudomonas aeruginosa* Siderophore Pyochelin. *ACS Sensors*. 2021. **6**. P. 3273—3283. <https://doi.org/10.1021/acsensors.1c01023>
13. Kasai Y., Kobayashi H., Tsuchido Y. et al., *Staphylococcus aureus* Detection by Fluorescent Silica Nanoparticles Modified with Metal-Dipicolylamine Complexes. *Chem.Lett.* 2016. **45**. P. 749—751 <https://doi.org/10.1246/cl.160261>

14. Бандурин Ю.А., Шпирко Г.М., Завілопуло А.М., Бандурина Л.О. Пристрій для дослідження люмінесценції рідких та твердих матеріалів. Пат. України на кор. модель №151585. МПК G01J 3/28 (2006.01). Оpubл. Бюл. №33 від 17.08.2022.
15. Антонченко В.Я. и др. Основы физики воды (ред. М.С. Бродин). Киев: Наук. думка, 1991. 668 с.
16. Abdallah O. et al. Fluorescence spectroscopy by detection of glucose concentrations in DMEM-solutions and its perspectives for non-invasive measurement. *BIODEVICES-2011*. P. 411—414. <https://doi.org/10.5220/0003176504110414>
17. The Systematic Identification of Organic Compounds. Ed: R. Shriner, C. Hermann, T. Morrill, D. Curtin, and R. Fuson. Wiley, 2004. 723 p.
18. Bandurin Y.A., Fedurtsja Y.V., Rusin A.V., Molnar S.B., Bandurin O.Y. Photoluminescence of L-Valine Irradiated with Small Doses. *Med Discoveries*. 2024. **3**, № 6. P 1178. <https://doi.org/10.52768/2993-1142/1178>
19. Stachová B., Garcia Angulo E.L., Matejčík Š., Michalczuk B., Országh J. Dissociative excitation of acetone induced by electron impact. *Phys. Scr.* 2025. **100**. 015409. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad9c2b>

Надійшла до редакції 07.02.2025

REFERENCES

1. Benjian, Shen, Liucun, Gao, Jin, Xing, Jing, Fang, Jie, Liang, Qiong, Ma, Yingwei, Fan & Hongxiang, Kang. (2019). Bactericidal effects research of 470 nm blue light on *Pseudomonas aeruginosa*: in vitro and in vivo research. *Laser Phys.*, 29, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aaf908>
2. Yujia, Xu, Hongwei, Zheng, Jianxin, Sui, Hong, Linand & Limin, Cao. (2023). Rapid and Sen-sitive Fluorescence Detection of *Staphylococcus aureus* Based on Polyethyleneimine-Enhanced Boronate Affinity Isolation. *Foods*, 12, pp. 1366-1381. <https://doi.org/10.3390/foods12071366>
3. Foster, T. J., Geoghegan, J. A., Ganesh, V. K. & Hook, M. (2014). Adhesion, invasion and evasion: The many functions of the surface proteins of *Staphylococcus aureus*. *Nat. Rev. Microbiol.*, 12(1), pp. 49-62. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3161>
4. Lipcsei, L. E., Brown, L. G., Coleman, E. W., Kramer, A., Masters, M., Wittry, B. C., Reed, K. & Radke, V. J. (2019). Foodborne illness outbreaks at retail establishments.-National Environmental Assessment Reporting System, 16 state and local health departments, 2014–2016. *MMWR Surveill. Summ.*, 68, pp. 1-20.
5. Kalyantanda, G., Shumyak, L. & Archibald, L. K. (2015). *Cronobacter* species contamination of powdered infant formula and the implications for neonatal health. *Front. Pediatr.*, 3, pp. 56-64.
6. Hansen, N. S., Nielsen, L. T. & Leth, S. (2019). *Staphylococcus aureus* toxic shock syndrome originating from a split skin transplant. *Ugeskr. Laeger*, 181, V08180580.
7. Hu, Yaohua, Wang, Chengcheng, Bai, Bing, Li, Mintong, Ronghui, Wang & Yanbin, Li. (2014). Detection of *Staphylococcus Aureus* using quantum dots as fluorescence labels. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, 7, No.1, pp. 77-83.
8. Bandurin, Yu. A., Zaviropulo, A. N., Molnar, Sh. & Shpenik, O. O. (2022). Excitation of L-valine molecules by electrons and photons. *Eur. Phys. J. D*, 76, No. 9. <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00331-0/>
9. Sala, L., Rakovsky, J., Zerolov, A. & Kocisek, J. (2023). Light-Induced Damage to DNA Origami Nanostructures in the 193nm-310nm Range. *J. Phys. B: Atomic, Molec. and Opt. Phys.*, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/acf3bd>
10. Bandurin, Yu. A., Popik, T. Yu. & Zaviropulo, A. N. (2022). Interaction of photons with molecules of glucose and fructose. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 1, pp. 58-63 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.01.058>
11. Bandurin, Yu. A., Zaviropulo, A. N. & Popik, T. Yu., et al. (2023). Fluorescence Excitation Spectroscopy of Glucose Molecules. *J. Phys. Optics Sci.*, 5, No. 1, pp. 1-7. [https://doi.org/10.47363/JPSOS/2023\(5\)177](https://doi.org/10.47363/JPSOS/2023(5)177)
12. Visaggio, D., Pirolo, M. & Frangipani, E. et al. (2021). A Highly Sensitive Luminescent Biosensor for the Microvolumetric Detection of the *Pseudomonas aeruginosa* Siderophore Pyochelin. *ACS Sensors*, 6, pp. 3273-3283. <https://doi.org/10.1021/acsensors.1c01023>
13. Kasai, Y., Kobayashi, H. & Tsuchido, Y. et al. (2016). *Staphylococcus aureus* Detection by Fluorescent Silica Nanoparticles Modified with Metal-Dipicolylamine Complexes. *Chem. Lett.*, 45, pp. 749-751 <https://doi.org/10.1246/cl.160261>
14. Bandurin, Yu. A., Shpyrko, G. M., Zaviropulo, A. N. & Bandurina, L. O. Device for studying the luminescence of liquid and solid materials. Pat. of Ukraine for cor. model No. 151585. МПК G01J 3/28 (2006.01). Publ. Bull. No. 33. dated 17.08.2022 (in Ukrainian).

15. Antonchenko, V. Ya. et al. (1991). Fundamentals of Water Physics. Kyiv: Nauk. Dumka (in Russian).
16. Abdallah, O. et al. Fluorescence spectroscopy by detection of glucose concentrations in DMEM-solutions and its perspectives for non-invasive measurement. BIODVICES-2011. pp. 411-414. <https://doi.org/10.5220/0003176504110414>
17. The Systematic Identification of Organic Compounds (2004.) Ed. R. Shriner, C. Hermann, T. Morrill, D. Curtin, and R. Fuson. Wiley, Hoboken.
18. Bandurin, Y. A., Fedurtsja, Y. V., Rusin, A. V., Molnar, S. B. & Bandurin, O. Y. (2024). Photoluminescence of L-Valine Irradiated with Small Doses. Med Discoveries, 3, No. 6, pp. 1178. <https://doi.org/10.52768/2993-1142/1178>
19. Stachová, B., Garcia Angulo, E. L., Matejčík, Š., Michalczuk, B. & Országh, J. (2025). Dissociative excitation of acetone induced by electron impact. Phys. Scr., 100, 015409. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad9c2b>

Received 07.02.2025

Yu.A. Bandurin¹, <https://orcid.org/0000-0002-8047-1034>

Sh.B. Molnar², <https://orcid.org/0000-0002-5581-7435>

A.N. Zaviolupulo¹, <https://orcid.org/0000-0001-8334-2804>

O.O. Bandurin³, <https://orcid.org/0009-0009-0253-8414>

¹ Institute of Electron Physics of the NAS of Ukraine, Uzhhorod, Ukraine

² State University "Uzhhorod National University", Uzhhorod, Ukraine

³ Uzhhorod Scientific Lyceum of the Transcarpathian Regional Council, Uzhhorod, Ukraine

E-mail: bandurin_unc@ukr.net

FEATURES OF PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF BLACK NON-METALLIC SURFACES

The photoluminescence spectra of black samples with non-metallic surface — plastic, photographic paper and velvet — have been studied. The analysis showed that the characteristics of these spectra are influenced by the process of photoexcitation of molecules included in these materials. The photoluminescence spectra of the black velvet surface after its coating with soot and aquadag were experimentally determined. It was established that velvet coated with aquadag has the lowest photoluminescence intensity. It has also been established that exposure to sunlight significantly changes the photoluminescent characteristics of such a surface. A method for measuring the radiation properties of liquids on black surfaces using optical spectroscopy has been proposed. For the first time, in the wavelength range $\lambda = 400 \div 700$ nm, photoluminescence spectra of drops of liquids — water, alcohol and 40 % glucose solution — were obtained. Careful analysis of these spectra allowed us to identify the emission of OH and CH radicals and to show the influence of the type of OH bonding with the molecular basis of the liquids under study. The proposed approach to the study of photoluminescence of liquids allows direct measurements of their luminescence spectra without the use of tubes and cuvettes.

Keywords: black body, velvet, aquadag, luminescence spectrum, photon energy, photoluminescence.