

УДК 539.19  
 PACS 87.15  
 DOI 10.24144/2415-8038.2020.47.112-119

В.Ю. Шпеник, М.І. Шафраньош, Ш.Б. Молнар, О.О. Шпеник, Ю.Ю. Свида, М.І. Суховія, І.І. Шафраньош

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54, Україна,  
 e-mail: shpenik@hotmail.com

## ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ НУКЛЕОТИДНОЇ ОСНОВИ ГУАНІНУ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ЗБУДЖЕННЯ

В проведених дослідженнях отримані спектри фотолюмінесценції розчинів молекул азотистих основ НК гуаніну з різними значеннями рН та спектри люмінесценції ізольованих молекулах під дією повільних електронів в області довжин хвиль від 200 до 500 нм. Максимум люмінесценції для нейтрального розчину гуаніну спостерігається в області 360 нм. Для слабкого розчину максимум люмінесценції спостерігається в області 380 нм. Протилежна картина має місце для слабкого розчину. Тут максимум люмінесценції зсувається в бік менших довжин хвиль і знаходиться біля 340 нм. Показано, що рН розчину помітно впливає на розташування максимуму та інтенсивність люмінесценції. Приведені спектри відображають флуоресценцію молекул гуаніну, а фосфоресценція практично відсутня. Мінімальний вплив на спектр люмінесценції гуаніну має місце з боку нейтрального середовища. В спектрах люмінесценції гуаніну під дією електронів спостерігаються більш ніж 20 спектральних смуг та ліній які були ідентифіковані на базі наявних літературних даних.

**Ключові слова:** люмінесценція, збудження, гуанін, повільні електрони, молекулярна смуга.

### Вступ

Вивчення наслідків взаємодії живої тканини з високоенергетичним випромінюванням різного роду є дуже важливим і дає змогу не лише зрозуміти процеси руйнування біоструктур, але й відкриває можливість практичного використання отриманих даних, зокрема, в галузі біомедицини інженерії. Відомо, що взаємодія високоенергетичної радіації з живими клітинами, в основному, не приводить прямо до деградації біополімерних молекул, зокрема, до розривів ковалентних зв'язків у первинній структурі нуклеїнових кислот – цю «функцію» виконують вторинні електрони, які утворюються у біоречовині. Вторинні електрони в більшості повільні, з малою енергією, і саме з ними пов'язують основну частину негативних змін на молекулярному рівні таких біомолекул, як ДНК, РНК та інші. Важливими складовими ДНК та РНК є азотисті основи нуклеотидів: аденін, тимін, гуанін, урацил та цитозин. Природний енергетичний стан цих мо-

лекул забезпечує стабільність зв'язків у комплексарних пар азотистих основ, синтез білків і функціонування нуклеїнових кислот як генетичних носіїв. Структурні зміни молекул азотистих основ під дією зовнішніх чинників можуть бути виявленими в модельних дослідженнях процесів збудження та іонізації вказаних молекул.

На сьогодні, досліджень люмінесценції, як прояв процесів збудження молекул азотистих основ НК у різних фазових станах небагато. Піонерські дослідження [1–3] в цьому напрямі виявили важливе явище – при взаємодії електронів з молекулами азотистих основ (цитозин, аденін, тимін), які знаходяться у газовій фазі ефективно проходять процеси їх збудження, дисоціативного збудження, іонізації та дисоціативної іонізації. Поряд з цим найменш вивчені люмінесцентні характеристики молекул гуаніну. Так, у роботі [4] досліджувалися спектри поглинання та люмінесценції плівок молекул гуаніну в залежності від довжини хвилі збуджувального випромінювання в області 110-300 нм. Бу-

ло виявлено, що при кімнатній температурі появляється короткохвильова смуга люмінесценції при максимумі близько 350 нм. Автори цього дослідження приписати цю смугу флуоресценції, яка при низькій температурі пригнічується фосфоресценцією. Флуоресценція водних розчинів пуринів і піримідинів при кімнатній температурі досліджувалася Борресеном [5]. Було показано, що гуанін практично не дає флуоресценцію в нейтральному розчині, але свічення з'являється і збільшується при переході в більш лужне або кислотне середовище. При цьому максимальний вихід люмінесценції для кислих середовищ спостерігається при рН 2 (максимум флуоресценції лежить при 340 нм), а для лужних - при рН 11 (максимум флуоресценції лежить при 355 нм). Очевидно, що рН середовища певним чином впливає на структуру молекули гуаніну.

В даній роботі досліджується люмінесценція азотистої основи ДНК та РНК гуаніну в його газовій фазі та у різних розчинах під дією фотонів та електронів.

## Постановка експерименту

**Фотолюмінесценція.** Фотолюмінесценція розчинів гуаніну вивчалася за допомогою високочутливого, сучасного спектрофлуориметра RF-6000 компанії Shimadzu (див. рис. 1). Розчини готувалися на основі дистилляту води. Був використаний препарат гуаніну фірми Sigma-Aldrich (чистота 99

Люмінесценція під дією електронів. Блок-схема експерименту приведена на рис. 2. Формування газової фази гуаніну відбувалося шляхом його нагріву в окремому металевому контейнері. Утворена газова фаза гуаніну по паропроводу поступала в комірку кубічної форми з об'ємом  $2 \text{ см}^3$ . Температура контейнера з порошком гуаніну не перевищувала 350 К. На одній із зовнішніх граней комірки монтувалася діафрагма з отвором (діаметр 1,5 мм) для вводу електронного пучка та джерело пучка, а на протилежній – приймач пучка електронів (циліндр Фарадея). Пучок електронів формувався трианодною гарматою з вольфрамовим катодом. Комірка поміщалася у магнітне поле так, що

його силові лінії були паралельними електронному пучку. Калібрування шкали енергій електронів здійснювалося за значенням

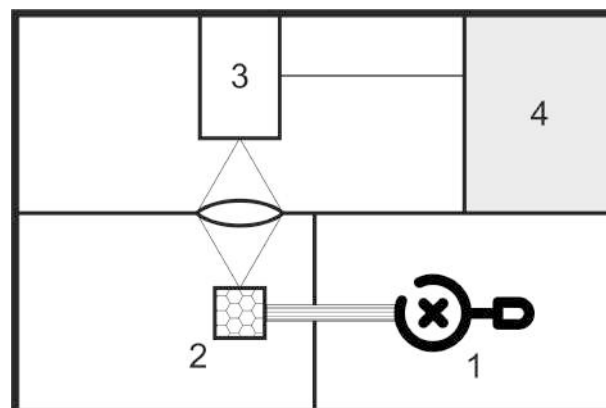


Рис. 1: Блок-схема експерименту з дослідження фотолюмінесценції гуаніну: збудження молекул гуаніну у різних розчинах: 1 – ксенонова лампа; 2 – кювета з розчином гуаніну; 3 – дифракційний монохроматор; 4 – вихід на ПК.

енергетичного порогу збудження смуги молекулярного азоту з  $\lambda=315,9 \text{ нм}$  (електронний перехід  $X^1\Sigma^+g - C^3\Pi$  - друга позитивна система) з похибкою  $\pm 0,25 \text{ eV}$ . Для виведення випромінювання із комірки на її грані було змонтоване кварцове віконце. Для реєстрації випромінювання був використаний спектрофотометр, який складався із дифракційного монохроматора з оберненою дисперсією  $1 \text{ нм/мм}$ , фотоелектронного помножувача (ФЭУ-106) та системи реєстрації фотосигналу. Для покращення відношення сигнал/шум система реєстрації працювала у режимі рахунку фотоелектронних імпульсів разом з модуляцією електронного пучка. Експерименти проводилися при таких умовах: сила струму пучка електронів знаходилася у межах  $(3-4) \cdot 10^{-5} \text{ А}$  при енергетичній неоднорідності електронів на пів-висоті їх енергетичного розподілу  $\Delta E^{1/2} \approx 0,5 \text{ eV}$ ; ступінь вакууму у камері, де розміщувалася комірка з парами гуаніну, становив  $1 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ; для уникнення конденсації парів гуаніну на віконцях та електродах електронної гармати комірка нагрівалася до температури 370 К; індукція магнітного поля становила  $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ .

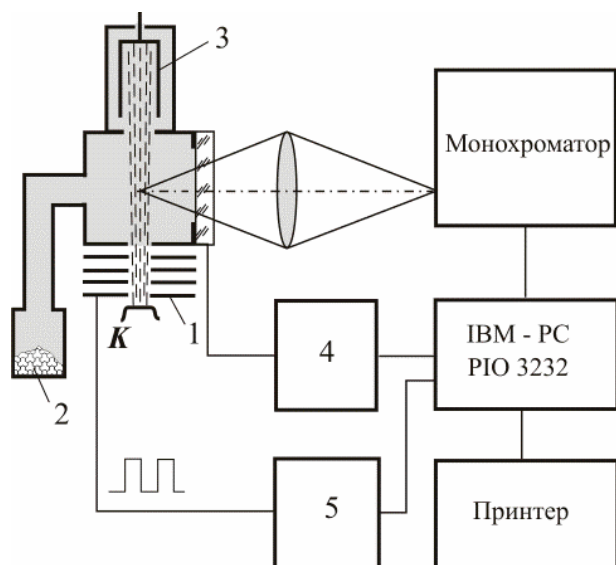


Рис. 2: Блок-схема експерименту для вивчення люмінесценції молекул гуаніну в газовій фазі під дією електронів: 1 – електронна гармата; К – емітер електронів; 2 – препарат гуаніну; 3 – колектор електронів (циліндр Фарадея); 4 – джерело скануючого потенціалу електронного пучка; 5 – джерело модуляції електронного пучка.

## Результати дослідження

Спектри люмінесценції різних розчинів гуаніну при довжині хвилі збуджуючого випромінювання 220 нм приведені на рис. 3 – 5, де по осі абсцис показані довжини хвиль в нанометрах, а по осі ординат інтенсивність люмінесценції у відносних одиницях. Максимум люмінесценції для нейтрального розчину (див. рис. 3) спостерігається в області 360 нм. Для слабкого розчину максимум люмінесценції спостерігається в області 390 нм, тобто зміщується в довгохвильову частину спектра. Протилежна картина має місце для слабкого розчину (див. рис. 5). Тут максимум люмінесценції зсувається в бік менших довжин хвиль. При цьому інтенсивність люмінесценції для випадків лужного та кислого розчинів зростає більш ніж в два рази по відношенню до нейтрального розчину гуаніну. Таким чином рН розчину помітно впливає на розташування максимуму та інтенсивність люмінесценції. Мінімальний вплив на вигляд спектру люмінесценції гуаніну має місце боку нейтрального середовища. Очевидно, що приведені спектри на рис. 3 та рис. 5 відображають флуоресцен-

цію молекул гуаніну, а фосфоресценція практично відсутня. Щодо спектру приведеного на рис. 4 то наявність розмитого, вторинного максимуму при довжині хвилі  $\sim 420$  нм, а також повільний спад інтенсивності люмінесценції можуть свідчити про появу фосфоресценції малої інтенсивності.

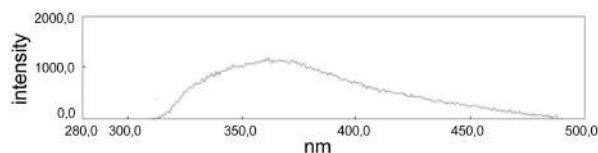


Рис. 3: Спектр люмінесценції водного розчину гуаніну під дією збуджуючого випромінювання з довжиною хвилі 220 нм.

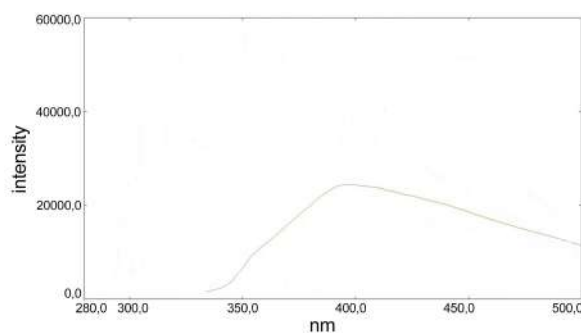


Рис. 4: Спектр люмінесценції димексиду розчину гуаніну під дією збуджуючого випромінювання з довжиною хвилі 220 нм.

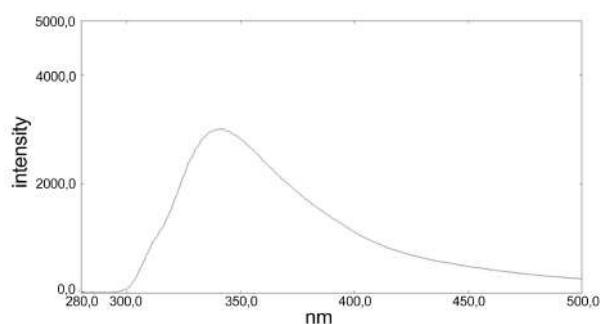


Рис. 5: Спектр люмінесценції бікарбонату натрію розчину гуаніну під дією збуджуючого випромінювання з довжиною хвилі 220 нм.

Спектри люмінесценції газової фази гуаніну під дією електронів [6], (див. рис. 6), принципово відрізняються від вищенаведених спектрів. Як видно з рис. 6, у спектрах

гуаніну виразно проявляються 19 молекулярних смуг і ліній, максимуми яких знаходяться при таких довжинах хвиль:  $\lambda_{\text{млм}} = 289,2; 304,2; 307,2; 315,9; 326,5; 337,0; 355,3; 357,7; 362,0; 367,1; 386,1; 388,2; 391,6; 395,7; 415,5; 430,5; 434,4; 447,3; 486,1$  нм. Кількість і форма спектральних смуг свідчать про те, що природа їх походження пов'язана зі збудженням електронних станів як цілої молекули, так і її іонізованих (дисоціативно збудження з іонізацією) чи нейтральних фрагментів (дисоціативно збудження). Повна, коректна ідентифікація спектральних смуг на існуючій базі літературних даних є непростим завданням. Пошук літературних джерел та їх аналіз дав можливість провести наступний аналіз природи походження смуг у спектрах люмінесценції гуаніну. Для цієї мети були використані дані отримані нами раніше [7, 8] та проаналізовані фотоemisійні спектри багатоатомних хімічних сполук [9–12].

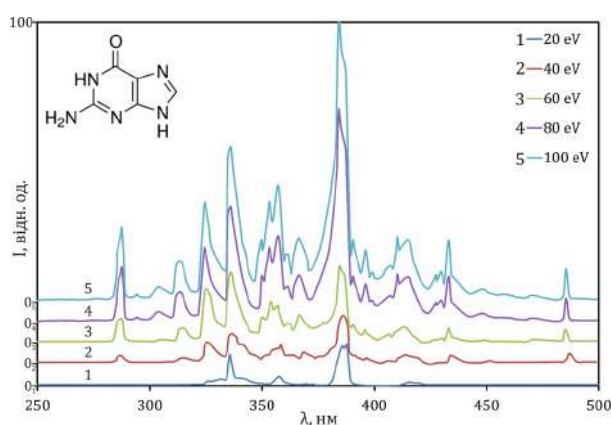


Рис. 6: Спектр люмінесценції гуаніну при різних енергіях пучка електронів [6].

Спектральна лінія з довжиною хвилі  $\lambda = 486,1$  нм належить атому гідродену (H серія Бальмера) і, до речі, спостерігається у спектрах інших азотистих основ [6]. Зауважимо, що в спектрах в області 200–250 нм не спостерігається молекулярних смуг помітної інтенсивності. До цього слід додати, що згідно даних дослідження [7] в області вакуумного ультрафіолету зареєстровано лише лінії які ототожнюють з випромінювання атому гідродену серії Лаймана. Смуги з довжинами хвиль  $\lambda = 447,3; \lambda = 430,5$  нм ймовірно належать групі CO ( $B^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi$ ). У формуванні смуги з  $\lambda = 434,4$  нм можуть брати

участь збуджені фрагменти CH ( $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ ),  $N_2$  ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ), і  $H_2CN_2$  ( $\tilde{A} \rightarrow X$ ). Ми схилиємося до думки про переважний внесок фрагменту  $H_2CN_2$ , а вузька лінія при  $\lambda = 434,1$  належить  $H\gamma$  серії Бальмера. Широку смугу з максимумом при  $\lambda = 415,5$  нм можуть формувати переходи  $B^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi$  і  $\tilde{A} - X$  груп CO і  $N_2CN_2$  відповідно. Інтенсивна смуга з  $\lambda = 388,2$  нм формується фрагментами CO ( $C^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi$ ) і CN ( $B^2\Sigma \rightarrow A^2\Pi$ ). Тут основний внесок слід віддати групі CO, оскільки ефективний переріз збудження електронного переходу ( $C^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi$ ) в CO є значний [6]. Інтенсивна смуга з  $\lambda = 386,6$  нм формується фрагментами CN ( $B^2\Sigma \rightarrow A^2\Pi$ ) і CNC ( $\Delta^2 \rightarrow ^2\Pi$ ). Внесок від радикалу CN можна вважати переважаючим. Незначної інтенсивності смуга з  $\lambda = 367,1$  нм належить  $CO^+$  ( $B^2\Sigma^+ \rightarrow A^2\Pi$ ). Смуга з  $\lambda = 355,3$  нм, ймовірно формується фрагментами HNCN ( $\tilde{A} \rightarrow X$ ) та  $N_2$  ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ), при чому внесок кожного з них у формування цієї смуги поки що невідомий. Смугу з  $\lambda = 337,0$  нм слід ідентифікувати як суперпозицію переходів  $N_2$  ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ) та  $NCN$  ( $^3\Pi_u \rightarrow ^2\Sigma_g^-$ ). Смуга з  $\lambda = 326,5$  нм може формуватися фрагментами  $CN^+$  ( $C^1\Sigma \rightarrow A^1\Sigma$ ) та  $NCN$  ( $\Delta^2 \rightarrow ^2\Pi$ ), однак внесок кожного на даний час ще не визначений. Звертаємо увагу на випромінювання в діапазоні довжин хвиль 327,2 нм – 341,5 нм і 410,3 нм – 419,7 нм у вигляді широких смуг, які підсилюються з підвищенням енергії електронів та, на нашу думку, є проявом відповідно флюоресценції і фосфоресценції молекул гуаніну.

## Висновки

В проведених дослідженнях було виявлено, що максимум люмінесценції для нейтрального розчину гуаніну спостерігається в області 360 нм. Для слабкого розчину максимум люмінесценції спостерігається в області 380 нм, тобто зміщується в довгохвильову частину спектра. Протилежна картина має місце для слабкого розчину. Тут максимум люмінесценції зсувається в бік менших довжин хвиль. Таким чином рН розчину помітно впливає на розташування максимуму та інтенсивність люмінесценції. Показано,

що приведені спектри різних розчинів відображають лише флуоресценцію молекул гуаніну, а фосфоресценція практично відсутня. Мінімальний вплив на спектр люмінесценції гуаніну має місце з боку нейтрального середовища. Взаємодія повільних електронів з молекулами гуаніну в газовому стані супроводжується виникненням емісійного спектру складної форми у діапазоні 200–500 нм, що свідчить про інтенсивну фрагментацію мо-

лекул гуаніну, а саме руйнування структури гуаніну за рахунок процесів дисоціативного збудження, дисоціативного збудження з іонізацією, збудження електронних рівнів вихідної молекули та молекулярного іону. Отримані дані можуть бути використані для оцінки радіаційних змін у молекулах ДНК і РНК при внутрішньому  $\beta$ -опроміненні біоб'єктів та практичних завдань в галузі біомедицинської інженерії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Суховія М.І., Шафраньош І.І. О возбуждении азотистых оснований нуклеиновых кислот низкоэнергетическими электронами // Механизмы радиационного поражения и восстановления нуклеиновых кислот. — 1980. — С. 51.
- [2] Суховія М.І., Славик В.Н., Шафраньош І.І., Шимон Л.Л. Особенности взаимодействия молекул оснований нуклеиновых кислот с электронами малых энергий // Биополимеры и клетка. — 1991. — №7, вып.6. — С. 77-82.
- [3] I.I. Shafranyosh, M.I.Sukhoviya. Excitation of thymine molecules in the gaseous phase by an electron impact // OpticsandSpectroscopy. — 2007. — V. 102, № 4. — P. 553-556.
- [4] N.Ya. Dodonova. Vacuum UV – photophysics and photochemistry of biomolecules // J. Photochem. Photobiol. B: Biol. — 1993. — V. 18, № 111.
- [5] H.C. Borresen. On the luminescence properties of some purines and pyrimidines // Acta ChemicaScandinavica — 1963. — V. 17, № 921.
- [6] Ю.Ю. Свида, М.І. Шафраньош, Е. Шамудовський, І.І. Перчак, М.О. Маргітич, М.І. Суховія, М.М. Чаварга, І.І. Шафраньош. Люмінесценція молекул гуаніну в газовій фазі під дією пучка електронів // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика — 2016. — №39 — С. 106-112.
- [7] B.F. Minaev, M.I. Shafranyosh, Yu.Yu Svida, M.I. Sukhoviya, I.I. Shafranyosh, G.V. Baryshnikov and V.A. Minaeva. Fragmentation of the adenine and guanine molecules induced by electron collisions // The Journal of Chemical Physics — 2014. — V. 140, 175101.
- [8] I.I. Shafranyosh, M.I. Sukhoviya. Inelastic collisions of the uracil molecules with electrons // The Journal of Chemical Physics — 2012. — V. 137, 184303.
- [9] Huber K.P., Herzberg G. Molecular spectra and molecular structure. IV. Constants of diatomic molecules. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1979. – 716 p
- [10] Herzberg G. Molecular spectra and molecular structure. III. Electronic spectra and electronic structure of polyatomic molecules. – New Jersey: Van Nostrand, 1966. – 745 p.
- [11] Pearse R.W., Gaydon A.G. The identification of molecular spectra. – London: Chapman, 1963. – 562 p.
- [12] Skubenich V.V., Zapesochnyi I.P. Excitation of diatomic molecules by collisions with monoenergetic electrons // High Energy Chem. — 1975. — V. 9, 5 — P. 339–346

- [13] C.J. Tiessen, J.A. Trocchi, J.D. Hein, J. Dech, W. Kedzierski, J.W. McConkey. VUV study of electron impact dissociative excitation of thymine // – V. 49, № 12 – 2016. P. 125204-4. [Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. — 2016. — V. 49, 125204-4.](#)

Стаття надійшла до редакції 20.05.2020

В.Ю. Шпенник, М.И. Шафраньош, Ш.Б. Молнар, А.А. Шпенник,  
Ю.Ю. Свида, М.И. Суховия, И.И. Шафраньош

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54, Украина, e-mail: shpenik@hotmail.com

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НУКЛЕОТИДНОГО ОСНОВАНИЯ ГУАНИНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

В проведенных исследованиях получены спектры фотолюминесценции растворов молекул азотистых оснований НК гуанина с различными значениями pH и спектры люминесценции изолированных молекулах под действием медленных электронов. в области длин волн от 200 до 500 нм. Максимум люминесценции для нейтрального раствора гуанина наблюдается в области 360 нм. Для слабокислого раствора максимум люминесценции наблюдается в области 380 нм. Противоположная картина имеет место для слабощелочного раствора. Здесь максимум люминесценции сдвигается в сторону меньших длин волн и находится при 340 нм. Показано, что pH раствора заметно влияет на расположение максимума и интенсивность люминесценции. Приведены спектры отражают флуоресценцию молекул гуанина, а фосфоресценция практически отсутствует. Минимальное влияние на спектр люминесценции гуанина имеет место со стороны нейтральной среды. В спектрах люминесценции гуанина под действием электронов наблюдаются более чем 20 спектральных полос и линий которые были идентифицированы на базе имеющихся литературных данных.

**Ключевые слова:** люминесценция, возбуждение, гуанин, медленные электроны, молекулярная полоса.

V. Shpenyk, M. Shafranyosh, Sh. Molnar, O. Shpenyk, Yu. Svyda, M. Sukhoviia,  
I. Shafranyosh

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshyna Str., 54, Ukraine,  
e-mail: shpenik@hotmail.com

## LUMINESCENCE OF GUANINE MOLECULES CAUSED BY DIFFERENT METHODS

**Purpose.** In our experiments, the luminescence spectra of different pH value guanine solutions and isolated molecules were obtained in the range of 200-500 nm under the action of slow electrons. The luminescence maximum is at 360 nm. For a weakly acidic solution, the luminescence maximum is observed in the range of 380 nm. For a slightly alkaline solution, the opposite is true. Here, the luminescence maximum shifts toward smaller wavelengths and is about 340 nm. It is clearly shown, that the luminescence maximum vastly depends from the pH value of the solution. The spectra in the article shows clear fluorescence, while phosphorescence is almost absent. The neutral environment changes the

spectra only slightly. The spectrum has more than 20 spectral lines and zones, that were identified based on available literature.

**Methods.** The photoluminescence of guanine solutions was studied optically using the high-sensitivity RF-6000 spectrofluorimeter from Shimadzu.

**Results.** Photoluminescence spectra of guanine solutions with different pH values and luminescence spectra of isolated molecules after slow electron impact excitation in the wavelength range from 200 to 500 nm were obtained.

**Conclusions.** It is shown that the given spectra of different solutions reflect only the fluorescence of guanine molecules, and phosphorescence is practically absent. Minimal effects on the luminescence spectra of guanine occur from a neutral medium. The interaction of slow electrons with guanine molecules in the gas phase is accompanied by the appearance of an emission spectra of complex shape in the range of 200–500 nm, which indicates intense fragmentation of guanine molecules.

**Keywords:** luminescence, excitation, guanine, slow electrons, molecular zone

## REFERENCES

- [1] Суховія М.І., Шафраньош І.І. О возбуждении азотистых оснований нуклеиновых кислот низкоэнергетическими электронами // Механизмы радиационного поражения и восстановления нуклеиновых кислот. — 1980. — С. 51.
- [2] Суховія М.І., Славик В.Н., Шафраньош І.І., Шимон Л.Л. Особенности взаимодействия молекул оснований нуклеиновых кислот с электронами малых энергий // Биополимеры и клетка. — 1991. — №7, вып.6. — С. 77-82.
- [3] I.I.Shafranyosh, M.I.Sukhoviya. Excitation of thymine molecules in the gaseous phase by an electron impact [Zbudzhennya molekul tyminu v gazovij fazi pid dijeyu elektroniv] // Optics and Spectroscopy. — 2007. — V. 102, № 4. — P. 553-556.
- [4] N.Ya.Dodonova. Vacuum UV – photophysics and photochemistry of biomolecules [Vakuum UF - fotofizika i fotokhimiya biomolekul] // J. Photochem. Photobiol. B: Biol. — 1993. — V. 18, № 111.
- [5] H.C.Borresen. On the luminescence properties of some purines and pyrimidines [Pro luminescenciju dejakikh puryniv ta pirymidyniv] // Acta Chemica Scandinavica — 1963. — V. 17, № 921.
- [6] Ю.Ю. Свида, М.І. Шафраньош, Е. Шамудовський, І.І. Перчак, М.О. Маргітич, М.І. Суховія, М.М. Чаварга, І.І. Шафраньош. Люмінесценція молекул гуаніну в газовій фазі під дією пучка електронів // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика — 2016. — №39 — С. 106-112.
- [7] B.F. Minaev, M.I. Shafranyosh, Yu.Yu Svida, M.I. Sukhoviya, I.I. Shafranyosh, G.V. Baryshnikov and V.A. Minaeva. Fragmentation of the adenine and guanine molecules induced by electron collisions [Fragmentacija molekul adeninu ta guaninu pid dijeyu elektroniv] // The Journal of Chemical Physics — 2014. — V. 140, 175101.
- [8] I.I. Shafranyosh, M.I. Sukhoviya. Inelastic collisions of the uracil molecules with electrons [Inelastychni zitkennya molekul uracylu z elektronamy] // The Journal of Chemical Physics — 2012. — V. 137, 184303.
- [9] Huber K.P., Herzberg G. Molecular spectra and molecular structure. IV. Constants of diatomic molecules. [Spektry ta struktura molekul. IV. Konstanty biatomnykh molekul] – New York: Van Nostrand Reinhold, 1979. – 716 p

- [10] Herzberg G. Molecular spectra and molecular structure. III. Electronic spectra and electronic structure of polyatomic molecules. [Spektry ta struktura molekul. III. Konstanty biatomnykh molekul]– New Jersey: Van Nostrand, 1966. – 745 p.
- [11] Pearse R.W., Gaydon A.G. The identification of molecular spectra. [Identyfikacija spektr molekul] – London: Chapman, 1963. – 562 p.
- [12] Skubenich V.V., Zapesochnyi I.P. Excitation of diatomic molecules by collisions with monoenergetic electrons [Zbudzhennya biatomnykh molekul zitknennyam z monoenerhetychnymy elektronamy] // High Energy Chem. — 1975. — V. 9, 5 — P. 339–346
- [13] C.J. Tiessen, J.A. Trocchi, J.D. Hein, J. Dech, W. Kedzierski, J.W. McConkey. VUV study of electron impact dissociative excitation of thymine [VUV doslidzhennya zbudzhennya tyminu pid dijeyu elektroniv] // – V. 49, № 12 – 2016. P. 125204-4. [Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics.](#) — 2016. — V. 49, 125204-4.

©Ужгородський національний університет