

УДК 539.23, 621.372.8  
PACS 42.81.-i, 42.81.Pa  
DOI 10.24144/2415-8038.2020.48.30-37

І. І. Трикур<sup>1</sup>, М. Ю. Січка<sup>1</sup>, С. О. Корпош<sup>2</sup>, Т. І. Ясінко<sup>3</sup>, Р. П. Пісак<sup>3</sup>,  
А. М. Потапчук<sup>1</sup>, В. М. Різак<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54, Україна,  
e-mail: ivan.trikur@uzhnu.edu.ua

<sup>2</sup>The University of Nottingham, Nottingham, University Park, NG7 2RD, United Kingdom

<sup>3</sup>Ужгородська лабораторія матеріалів оптоелектроніки та фотоніки Інституту проблем реєстрації  
інформації НАН України, 88000, Ужгород, вул. Замкові сходи 4

## ВПЛИВ АМІАКУ НА ОПТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ПЛІВОК ПУРПУРНИХ МЕМБРАН, МОДИФІКОВАНИХ ДЕТЕРГЕНТОМ, В ЗОЛЬ-ГЕЛЬНІЙ МАТРИЦІ

Проведено дослідження впливу аміаку у газовій фазі та у водних розчинах на оптичні властивості плівок бактеріородопсину у золь-гельних матрицях. Для порівняння взято плівки отримані згідно стандартних методик та плівки з використанням пурпурних мембран додатково оброблених детергентом Тритон Х100. Обробка детергентом приводить до зменшення розмірів фрагментів пурпурних мембран і покращення оптичної якості плівок. Показано що такі плівки демонструють зростання чутливості до аміаку як у водних розчинах так і у паро-газових сумішах при зменшенні шумів.

**Ключові слова:** золь-гель технологія, бактеріородопсин, плівкові структури, спектральний аналіз, детергенти, тритон Х100.

### Вступ

Недорогі, механічно міцні, хімічно інертні, водонерозчинні матеріали з розвиненою структурою пор різного розміру, які можна отримати за допомогою низькотемпературного золь-гельного процесу шляхом гідролізу і поліконденсації лужних оксидів, знаходять широке використання в різних галузях сучасної електроніки. Незважаючи на певні недоліки, такі як більш тривалий час гелеутворення, значна усадка, менше оптичне пропускання і вища густина [1], для практичного використання перевагу надають матеріалам на основі тетраетилортосилікатів, оскільки для тетраметилортосилікатів характерна висока токсичність. Одним з перспективних напрямків використання таких матеріалів є створення нанокомпозитних плівкових структур на основі золь-гельної скля-

ної матриці в яку включені різні біологічні макромолекули [2]. Для успішного інкапсулювання у матрицю, отриману за допомогою золь-гель технології, біологічні молекули повинні бути водорозчинними та стійкими до денатурації спиртом, який виділяється під час підготовки золь-гелю. Опубліковано ряд робіт [3–5] у яких розглянуто можливість впровадження в золь-гельне скло бактеріородопсину (БР). БР повністю зберігає свої фотохромні оптичні властивості під час золь-гельного процесу [2, 5], тому дану методику можна використати для виготовлення елементів біоелектроніки та біосенсорики. Кінцеві властивості таких плівкових структур будуть визначатися вихідними компонентами суміші та технологічними умовами висушування плівок. При внесенні фрагментів пурпурних мембран (ПМ) у розчин прекурсорів, за рахунок гідролізу та конденса-

сації тетраалкосиланів, навколо них формується тверда силікатна матриця [4]. На етапі старіння гелю відбувається випаровування розчинника і у зразках виникають внутрішні механічні напруги, які можуть приводити до виникнення мікротріщин і дефектів. Зменшуючи розміри фрагментів ПМ можна домогтися зменшення внутрішніх напруг у зразку, що приводить до покращення його оптичної якості та розширює можливості застосування БР для виготовлення елементів біосенсорики.

Відомо, що аміак, навіть у малих кількостях присутній в середовищі довкола плівки, БР може суттєво впливати на перебіг фоточиклу та спектральні особливості поглинання плівок [9]. Це дозволяє рекомендувати такі структури для первинних перетворювачів датчиків аміаку. Висока чутливість таких елементів може бути забезпечена лише за умови високої оптичної якості плівок, яка досягається за рахунок зменшення розмірів використаних ПМ. В даній роботі розглянуто порівняльне дослідження чутливості зольгельних плівок які були отримані з пурпурних мембран, оброблених та не оброблених детергентом Тритон Х100, до аміаку у парогазових сумішах та водних розчинах.

## Методи і матеріали

Для дослідження впливу аміаку на спектральні характеристики та динаміку фотоіндукованих змін у плівках БР в золь-гельній матриці були виготовлені плівки з використанням звичайної суспензії ПМ [6] (надалі – звичайна плівка) і суспензії ПМ обробленої детергентом (надалі – вдосконалена плівка). Для зменшення розмірів фрагментів ПМ була використана методика описана в [7]. Суспензію ПМ розводили у 5 mM Tris-HCl буферному розчині (рН = 7.0), до концентрації приблизно 10 mM. До отриманого розчину в темноті додавали Тритон Х100 з концентрацією 1 mM, витримували протягом 2 годин при температурі 35 °C і після цього центрифугували при 105,000 g протягом 60 хвилин при 4 °C. Фрагменти ПМ, які не піддалися повній солюбілізації, осаджуються на дно при центрифугуванні. Осаджені фрагменти

розводили в 5 мл дистильованої води і використовувалися для всіх подальших досліджень. Підготовка плівкоутворюючої суміші здійснювалася згідно методики описаної в [4]. Плівки наносили методом поливу. Двошарові структури отримували методом описаним у [8].

Проводилися дослідження впливу аміаку у паро-газових сумішах та водних розчинах на властивості звичайних та вдосконалених плівок БР. Для дослідження спектральних параметрів плівок БР використовували оптоволоконний спектрофотометр Ocean Optics USB4000. Як джерело світла використовували кварцову галогенну лампу КГМ 24-250. Для стабілізації живлення лампи використовували випрямляч змінного струму ВСА-5А-К. Підведення випромінювання до зразка та до спектрофотометра здійснювалося за допомогою 600-мікронного оптичного волокна Ocean Optics FIBER-600-UV. Для зменшення втрат світла всі з'єднання оптичних волокон проводилися з використанням стандартних роз'ємів Ocean Optics Premium-Grade SMA 905 Connector. Світло від лампи фокусувалося за допомогою системи лінз та вводилося у оптичне волокно за допомогою спеціальної колімаційної лінзи (Ocean Optics 74UV Collimating Lens), яка під'єднувалася безпосередньо до SMA-конектора на волокні. Для дослідження спектрів відбивання плівок використовували 600-мікронний волоконно-оптичний Y-розгалуджувач.

У випадку досліджень паро-газових сумішей проводився моніторинг пропускання плівки БР на довжині хвилі 570 нм при збільшенні концентрації аміаку з використанням камери описаної в [9].

У випадку водних розчинів аміаку досліджувалися зміни спектру відбивання плівки БР під дією різних концентрацій розчину аміаку. Для дослідження впливу аміаку на параметри плівок БР реєструвалися зміни пропускання на довжинах хвиль 410 та 570 нм в режимі реального часу, крім того регулярно проводився запис загального спектру пропускання плівки. Для виключення похибки спричиненої можливими збоями у роботі приладів паралельно проводився моніторинг на 800 нм. Для проведення досліджень в ла-

бораторії була спеціально розроблена і створена герметична сенсорна камера, детальний опис якої наведено в [10].

## Результати досліджень

Чим більша концентрація БР у плівці - тим більші зміни пропускання будуть виникати під дією аміаку і тим легше буде їх відслідковувати. Тобто збільшення концентрації БР у плівці буде підвищувати її чутливість до впливу зовнішніх факторів. З іншого боку, велика кількість фрагментів ПМ впроваджених у  $\text{SiO}_2$  матрицю буде зменшувати її міцність і приводити до значного погіршення оптичної однорідності таких плівок. Саме така ситуація і має місце при виготовленні плівок на основі ПМ у золь-гельній матриці за класичною методикою [6]. Додаткова обробка суспензії ПМ детергентом приводить до зменшення розмірів фрагментів останніх, що дозволяє ПМ легше вбудовуватися у пори золь-гельного скла, не викликаючи великих внутрішніх механічних напруг у плівці. Таким чином ми можемо збільшити концентрацію БР, а отже чутливість плівки, без погіршення її оптичної якості. Слід також відмітити, що така обробка приводить до втрати частини БР.

Для дослідження впливу паро-газових сумішей аміаку на властивості плівок БР, вони розміщувалися в камері, концентрація аміаку в яких поступово збільшувалася. Результати досліджень зміни пропускання плівок БР в золь-гельних матрицях на 570 нм при поступовому збільшенні концентрації аміаку у атмосфері довкола плівки наведено на рис. 1. Максимальні спектральні зміни пропускання під дією аміаку відбуваються в області смуги поглинання основного стану ( $\text{BR}_{570}$ ). Зростання пропускання можна пояснити збільшенням часу життя проміжних інтермедіатів, спричинене впливом аміаку [10]. Як видно з наведених кривих, зміни пропускання індуковані наявністю аміаку, пропорційні його концентрації.

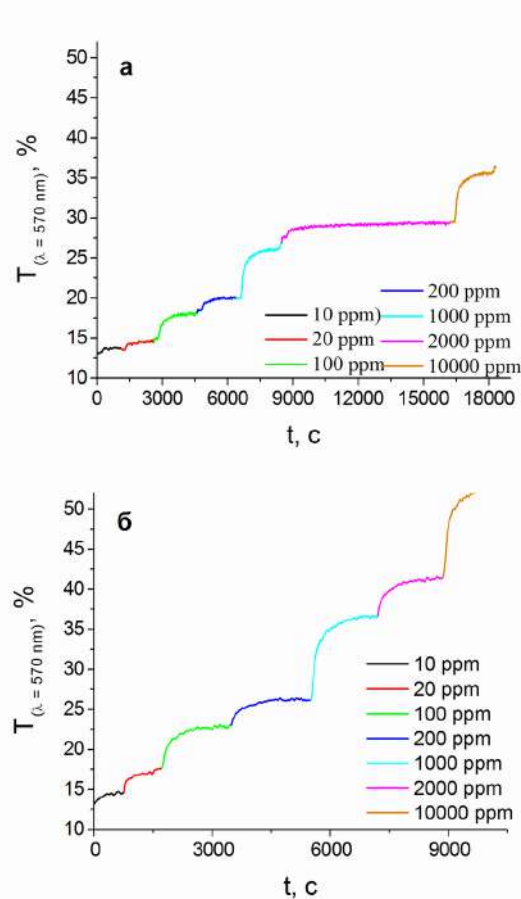


Рис. 1: Зміна пропускання звичайної (а) та вдосконаленої (б) плівок БР в золь-гельних матрицях на 570 нм при зростанні концентрації аміаку.

Як видно з порівняння кривих, для вдосконаленої плівки характерна більша амплітуда змін пропускання індукованих аміаком та менші шуми порівняно з плівкою, отриманою за традиційною технологією.

У випадку дослідження впливу водного розчину аміаку на параметри плівок, отриманих з використанням оброблених та необроблених ПМ, камера спочатку заповнювалася дистильованою водою, а після стабілізації сигналу додавалися порції концентрованого розчину аміаку для отримання потрібної концентрації розчину. Контроль відбивання проводився в динамічному режимі на довжинах хвиль 410, 570 та 800 нм. Оскільки на довжині хвилі 800 нм ніяких смуг поглинання у плівок БР немає, зміни відбивання на даній довжині хвилі будуть відображати зміни, не пов'язані з БР. Таким чином, розділивши значення відбивання на 410 та 570 нм на значення відбивання на 800 нм, ми можемо виключити впливи пов'язані з нестабіль-

ністю роботи обладнання.

На рис. 2. приведена динаміка відбивання на 570 нм, де відбуваються найбільші зміни в процесі додавання аміаку, отримана в результаті такої обробки даних. Як видно з даного графіку, після додавання аміаку фіксується зростання інтенсивності відбивання на 570 нм. Це можна пояснити тим, що наявність аміаку збільшує час життя інтермедіату  $M_{412}$ , що, в свою чергу, приводить до зростання кількості молекул, які знаходяться у проміжному стані і зменшення кількості молекул в основному стані. Звідси маємо зменшення інтенсивності поглинання (а значить зростання інтенсивності відбивання) на 570 нм.

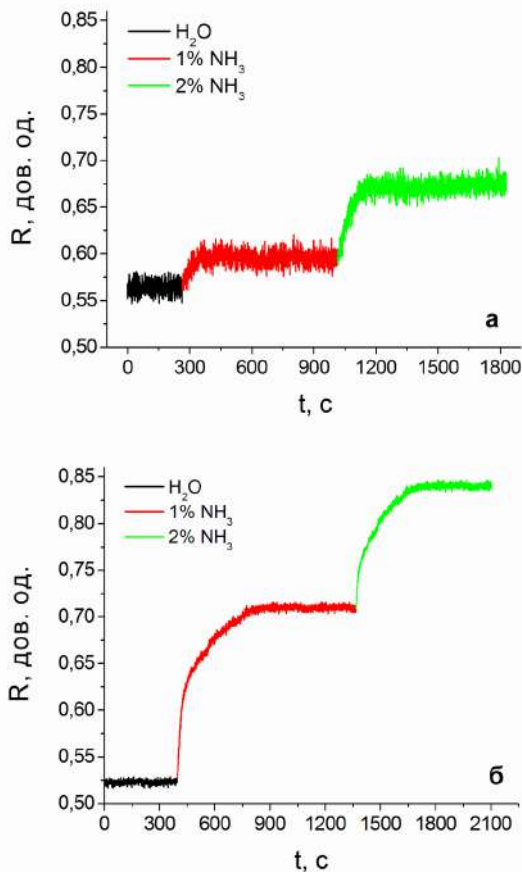


Рис. 2: Приведена зміна відбивання від звичайної (а) та вдосконаленої (б) плівок БР у матриці золь-гелю у процесі занурення у воду і додавання аміаку.

Як видно з рис. 2. для вдосконаленої плівки спостерігається значне зменшення шумів і зростання чутливості до зміни концентрації аміаку. Даний ефект можна по-

яснити зменшенням розсіювання на неоднорідностях та дефектах плівки.

Аналогічно було проведено дослідження впливу водних розчинів на характеристики багатошарових плівок на основі БР та  $\text{SiO}_2$  золь-гельного скла. У таких плівках шар чистого БР наносився методом поливу на скляну підкладку. Після повного висихання плівки вона покривалася плівкою чистого золь-гелю методом центрифугування. Отримані таким чином зразки мають хорошу оптичну якість та однорідну поверхню [8]. В той же час за рахунок високої пористості та малої товщини покривний шар золь-гелю не повинен обмежувати доступ аналітів до БР. Результати дослідження динаміки відбивання наведені на рис. 3.

Як видно з рис. 3, після додавання першої порції аміаку відбувається зростання відбивання на 570 нм. Дані зміни, як і у попередньому випадку, можна пояснити змінами у проходженні фотоциклу БР. Після додавання другої порції аміаку – спостерігаємо аналогічний процес. Як видно з графіка, для таких плівок характерна трошки менша амплітуда змін і більші часи стабілізації сигналу.

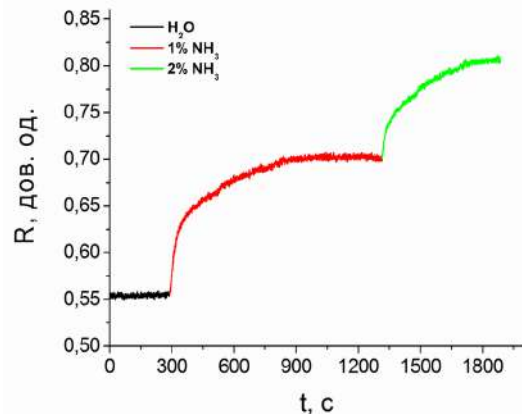


Рис. 3: Приведена зміна відбивання від плівки БР вкритої золь-гелем у процесі занурення у воду і додавання аміаку.

Спектральні дослідження показали що зростання концентрації аміаку приводить до зменшення смуги поглинання основного стану БР. Дані зміни аналогічні для всіх плівок, що дозволяє зробити висновок про те, що метод отримання плівки не впливає на механізм взаємодії бактеріородопсину з амі-

аком. Після того як розчин аміаку злили і плівка висохла, смуга поглинання повернулася до вихідного положення, що дозволяє судити про реверсивність змін спричинених впливом аміаку.

## Висновки

Підсумовуючи отримані результати, можемо зробити висновок що у всіх випадках зростання концентрації аміаку приводить до зменшення кількості молекул, які знаходяться у основному стані, що відображається у зростанні пропускання або інтенсивності відбитого світла. Порівнюючи результати, отримані для плівок з різними розмірами фрагментів ПМ, бачимо, що вдосконалена плівка БР в золь-гельній матриці демонструє найбільшу амплітуду змін відбивання при зростанні концентрації аміаку у водно-

му розчині при менших часах відклику і стабілізації сигналу. Для багатошарової плівки на основі БР вкритої золь-гелем амплітуда зміни відбивання менша на 10% при збільшенні часу відклику. У плівках отриманих за допомогою класичної методики спостерігається найменша амплітуда зміни інтенсивності відбитого сигналу і значні шуми. На нашу думку даний факт можна пояснити значним розсіюванням корисного сигналу на неоднорідностях плівки. Зменшення шумів і зростання чутливості до аміаку для вдосконаленої плівки, порівняно з класичною, фіксується як у випадку паро-газової суміші так і для водного розчину аміаку. Виходячи з даних результатів, можна зробити висновок, що вдосконалені плівки бактеріородопсину у водонерозчинних золь-гельних матрицях можуть бути використані для покращення чутливості датчиків контролю концентрації аміаку у водних розчинах та паро-газових суішах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Rao A. V. Synthesis and physical properties of TEOS-based silica aerogels prepared by two step (acid-base) sol-gel process / A. V. Rao, S. D. Bhagat // [Solid State Sciences.](#) — 2004. — V. 6. — P. 945–952.
- [2] Dave B. C. Encapsulation of Proteins in Bulk and Thin Film Sol-Gel Matrices / B. C. Dave, J. M. Miller, B. Dunn. // [Journal of Sol-Gel Science and Technology](#) — 1997. — V. 8. — P. 629–634.
- [3] Wu S. Bacteriorhodopsin Encapsulated in Transparent Sol-Gel Glass: A Now Biomaterial / S. Wu, L. M. Ellerby, J. S. Cohan // [Chem. Mater.](#) — 1993. — V. 5. — P. 115–120.
- [4] Films based on bacteriorhodopsin in sol-gel matrices / S. O. Korposh, M. Y. Sichka, I. I. Trikur, [et al.] // [Proc. SPIE.](#) — 2005. — V. 5956. — P. 312–320.
- [5] Weetall H. H. Retention of bacteriorhodopsin activity in dried sol-gel glass / H. H. Weetall // [Biosensors & Bioelectronics.](#) — 1996. — V. 11(3). — P. 327–333.
- [6] Одержання та структурні особливості нанокомпозитних плівок бактеріородопсин – квантові точки CdSe/ZnS – мікропориста золь-гельна матриця. // Й. П. Шаркань, Дж. Дж. Рамсен, І. І. , [та інші] / *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2010. - Т. 11/1. С. 170-175.
- [7] Дослідження впливу детергенту тритон Х100 на властивості пурпурних мембран. / І. І. Трикур, М. Ю. Січка, І. Й. Цьома, [та інші] // [Науковий вісник Ужгородського університету, серія Фізика.](#)- 2018.- Т. 44. - С. 75-81.
- [8] Методика пошарового нанесення плівок та характеристики двошарових структур на основі бактеріородопсину / І. І. Трикур, М. Ю. Січка, І. Й. Цьома, [та інші] // [Науковий вісник Ужгородського університету, серія Фізика.](#)-2019.- Т. 46. - С. 48-53.

- [9] Вплив параметрів оточуючого середовища на характеристики нанокompозитних плівкових структур золь-гельна SiO<sub>2</sub> матриця – бактеріородопсин – квантові точки CdSe/ZnS / І.І. Трикур, І.І. Сакалош, Г. Т. Горват, [та інші] // Науковий вісник Ужгородського університету, серія Фізика.- 2012.- Т. 31. - С. 211-219.
- [10] Дослідження впливу аміаку на чутливі елементи на торці Y-подібного волоконно-оптичного розгалужувача / І. І. Сакалош, І.І. Трикур, Й.П. Шаркань, [та інші] // Науковий вісник Ужгородського університету, серія Фізика - 2014. - Т. 35. - С. 79-83.

Стаття надійшла до редакції 25.06.2020

І. І. Трикур<sup>1</sup>, М. Ю. Сичка<sup>1</sup>, С. О. Корпош<sup>2</sup>, Т. І. Ясинко<sup>3</sup>, Р. П. Писак<sup>3</sup>,  
А. М. Потапчук<sup>1</sup>, В. М. Ризак<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54, Україна,  
e-mail: ivan.trikur@uzhnu.edu.ua

<sup>2</sup>The University of Nottingham, Nottingham, University Park, NG7 2RD, United Kingdom

<sup>3</sup>Ужгородська лабораторія матеріалів оптоелектроніки і фотоніки Інститута проблем  
реєстрації інформації НАН України, 88000, Ужгород, ул. Замкові сходи 4

## ВЛИЯНИЕ АММИАКА НА ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛЕНОК ПУРПУРНЫХ МЕМБРАН, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДЕТЕРГЕНТОМ, В ЗОЛЬ-ГЕЛЬНОЙ МАТРИЦЕ

Проведено дослідження впливу аміаку в газовій фазі і в водних розчинах на оптичні властивості плінок бактеріородопсина в золь-гельних матрицях. Для порівняння взяті плівки отримані за стандартними методиками і плівки з використанням пурпурних мембран додатково оброблених детергентом Тритон X100. Обробка детергентом призводить до зменшення розмірів фрагментів пурпурних мембран і покращенню оптичного якості плінок. Показано що такі плівки демонструють зростання чутливості до аміаку як в водних розчинах так і в парогазових сумісях при зменшенні шумів.

**Ключевые слова:** золь-гель технологія, бактеріородопсин, плівочні структури, спектральний аналіз, детергент, Тритон X100.

I. I. Trikur<sup>1</sup>, M. Yu. Sichka<sup>1</sup>, S. O. Korposh<sup>2</sup>, T.I. Yasinko<sup>3</sup>, R. P. Pisak<sup>3</sup>,  
A. M. Potapchuk<sup>1</sup>, V. M. Rizak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Uzhhorod National University, 88000, Voshyna Str., 54, Uzhhorod, Ukraine,  
e-mail: ivan.trikur@uzhnu.edu.ua <sup>2</sup>The University of Nottingham, Nottingham, University Park, NG7  
2RD, United Kingdom

<sup>3</sup>Uzhgorod laboratory of materials for optoelectronics and photonics IPRI NASU, Zamkovy schody str.,  
4A, 88000, Uzhgorod, Ukraine

## INFLUENCE OF AMMONIA ON THE OPTICAL PARAMETERS OF PURPLE MEMBRANES FILMS MODIFIED WITH A DETERGENT IN A SOL-GEL MATRIX

**Purpose.** This article is devoted to the study of the effect of ammonia in the gas phase and in aqueous solutions on the optical properties of bacteriorhodopsin films in sol-gel matrices. For comparison, we took films obtained by standard methods and films using purple membranes additionally treated with a detergent Triton X100.

**Methods.** To assess the effect of ammonia on the optical properties of bacteriorhodopsin films obtained by different methods, the transmission and reflection spectra of the films were investigated at different ammonia concentrations.

**Results.** Detergent treatment reduces the size of the purple membranes fragments and improves the optical quality of the films. It is shown that such films demonstrate an increase in sensitivity to ammonia both in aqueous solutions and in vapor-gas mixtures with a decrease in noises.

**Conclusions.** Reduction of noise and increase of sensitivity to ammonia for the improved film, in comparison with classical, is fixed both in case of steam-gas mix and for aqueous solution of ammonia. Based on these results, it can be concluded that improved bacteriorhodopsin films in water-insoluble sol-gel matrices can be used to improve the sensitivity of ammonia concentration control sensors in aqueous solutions and vapor-gas mixtures.

**Keywords:** sol-gel technology, bacteriorhodopsin, film structures, spectral analysis, detergent, Triton X100.

### REFERENCES

- [1] Rao, A. V., Bhagat, S. D. (2004) "Synthesis and physical properties of TEOS-based silica aerogels prepared by two step (acid-base) sol-gel process" *Solid State Sciences*. — 2004. — V. 6. — P. 945–952.
- [2] Dave, B. C., Miller, J. M., Dunn, B. (1997) "Encapsulation of Proteins in Bulk and Thin Film Sol-Gel Matrices" *Journal of Sol-Gel Science and Technology* — 1997. — V. 8. — P. 629–634.
- [3] Wu, S., Ellerby, L. M., Cohan, J. S. (1993) "Bacteriorhodopsin Encapsulated in Transparent Sol-Gel Glass: A New Biomaterial" *Chem. Mater.* — 1993. — V. 5. — P. 115–120.
- [4] Korposh, S.O., Sichka, M.Y., Trikur, I.I., Sharkany, Y.P., Yang, D.H., Lee, S.W., Ramsden, J.J. (2005) "Films based on bacteriorhodopsin in sol-gel matrices" *Proc. SPIE*. — 2005. — V. 5956. — P. 312–320.
- [5] Weetall, H. H. (1996) "Retention of bacteriorhodopsin activity in dried sol-gel glass" *Biosensors & Bioelectronics*. — 1996. — V. 11(3). — P. 327–333.

- [6] Sharkan, Y. P., Ramsden, J. J., Sakalosh, I. I., Sichka, M. Y., Korposh, S.O., Trikur, I.I. (2010) “Obtaining and Structural Features of Nano-Composite Film Bacteriorhodopsin – Quantum Dots CdSe/ZnS – Microporous Sol-Gel Matrix” [Oderzhannya ta strukturni osoblyvosti nanokompozytnykh plivok bakteriorodopsyn - kvantovi tochky CdSe/ZnS – mikro-porysta zol'-hel'na matrytsya] *Physics and Chemistry of Solid State [Fizyka i khimiya tver-doho tila]*.— 2010. — V. 11/1. — P. 170–175.
- [7] Trykur, I. I., Sichka, M. Y., Tsoma, I. Y., Rizak, V. M. (2018) “Study of the detergent Triton X100 effect on the properties of purple membranes” [Doslidzhennya vplyvu deterhentu Triton X100 na vlastyvoli purpurnykh membran] *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics [Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fiz.]*.— 2018. — Iss. 44. — P. 75–81.
- [8] Trikur, I. I., Sichka, M. Yu., Tsoma, I. Y., Potapchuk, A. M., Rizak, V. M. (2019) “Methods of layer-by-layer deposition of films and characteristics of two-layer structures based on bacteriorhodopsin” [Metodyka posharovoho nanesennya plivok ta kharakterystyky dvosharovykh struktur na osnovi bakteriorodopsynu] *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics [Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fiz.]*.— 2019. — Iss. 46. — P. 48–53.
- [9] Trikur, I. I., Sakalosh, I. I., Horvat, G. T., Sichka, M. Y, Korposh, S. O., Sharkany, J. P., Rizak, V. M. (2012) “The influence of environmental parameters on the characteristics of nanocomposite film structures sol-gel SiO<sub>2</sub> matrix – bacteriorhodopsin – quantum dots CdSe/ZnS” [Vplyv parametriv otchuyuchoho seredovyshcha na kharakterystyky nanokom-pozytnykh plivkovykh struktur zol'-hel'na SiO<sub>2</sub> matrytsya – bakteriorodopsyn – kvantovi tochky CdSe/ZnS] *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics [Nauk. Visn. Uzh-horod. Univ. Ser. Fiz.]*.— 2012. — Iss. 53. — P. 211–219.
- [10] Sakalosh, I. I., Trikur, I. I., Sharkany, J. P., Sichka, M. Y., Rizak V. M. (2014) “Investigation of the influence of ammonia on the sensing elements at the end of shaped fiber-optic splitter” [Doslidzhennya vplyvu amiaku na chutlyvi elementy na tortsi Y-podibnoho volokonno-optychnoho rozhaludzhuvacha] *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics [Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fiz.]*.— 2014. — Iss. 53. — P. 79–83.

©Ужгородський національний університет