

ECOLOGICAL STUDY OF MICROORGANISMS



O. M. Moroz 
G. I. Zvir
S. O. Hnatush

Cand. Sci. (Biol.), Sen. Res. Sci.
Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof.
Cand. Sci. (Biol.), Professor

UDK 579.81+579.68+546.3

*Ivan Franko National University of Lviv,
Hrushevskiy Str., 4, Lviv, Ukraine, 79005*


PIGMENTS SYNTHESIS BY PHOTOLITHOTROPHIC SULFUR BACTERIA *LAMPROCYSTIS* SP. Ya-2003 UNDER THE INFLUENCE OF HEAVY METALS SALTS

Abstract. Photolithotrophic sulfur bacteria at presence in medium H₂S as electron donor and CO₂ as electron acceptor at anaerobic conditions carry out anoxygenic photosynthesis using light as energy source. Main photosynthetic active pigments of purple sulfur bacteria are bacteriochlorophylls and carotenoids. Biosphere pollution by heavy metals negatively influence on living components of biocenoses. Synthesis of pigments by purple sulfur bacteria and their spectral characteristics under the influence of heavy metals are studied insufficiently. The aim of work was to investigate the influence of some bivalent metals (nickel, cobalt, iron and zinc) ions on pigments synthesis by purple sulfur bacteria cells of *Lamprocystis* genus, isolated from enriched by hydrogen sulfide water of Yavoriv Lake.

Bacteria *Lamprocystis* sp. Ya-2003 was cultivated under anaerobic conditions on lighting in van Niel medium for 10 days. To study the influence of heavy metals ions on quality and quantity composition of photosynthetic pigments the cells were sediment by centrifugation (centrifuge OS-6M) at 4025 g during 30 min and incubated during 1 h with metals salts: NiCl₂, CoCl₂, FeCl₂ × 4 H₂O, ZnCl₂ × 7 H₂O, at concentrations: 0; 0.5; 1; 1.5; 2; 2.5; 3; 4 mM. Biomass was determined by turbidimetric method, absorption spectra and pigments content in purple sulfur bacteria cells – by spectrophotometric method.

To obtaining pigment extracts the cells were dried at temperature 40 °C and destructed by rubbing with quarts sand. Pigments extraction carried out by mixture ethanol and acetone (1:1 v/v) to complete colorlessing of sediment. Obtaining extracts were using to registration of absorption spectra. Separation of pigments mixture was carried out by chromatography on silufol plates (“Sorbfil”, Russia) in the upflow of the system of solvents petrol : acetone : petroleum ether : hexane (10:10:3:10 v/v). Carotenoids were eluted from silikagel by an acetone or petroleum ether, bacteriochlorophyll – by an ethanol. Pigments identification carried out on coloring, by the sizes of *R_f* and basic maximums of absorption at a corresponding wave-length. Absorption spectra of extracted pigments of phototrophic sulfur bacteria were determined in the range of lengths of waves from 350 to 800 nm with the use of spectrophotometer SP-46.

It was established that photosynthetic purple sulfur bacteria *Lamprocystis* sp. Ya-2003 contain carotenoids of spirilloxanthin row, in particular, spirilloxanthin, likopin and rhodopin, and also bacteriochlorophyll *a*. Under the influence of 0.5–4 mM salts of nickel, cobalt, iron (II) and zinc there

 Tel.: +38067-811-86-44. E-mail: moroz_oksana@yahoo.com

DOI: 10.15421/031512

ISSN 1726-1112. *Ecology and noospherology*. 2015. Vol. 26, no. 1–2

107

are an insignificant changes of absorption spectra of extracted pigments. Under the influence of 1–4 mM Ni²⁺, 2–3 mM Fe²⁺ and 3–4 mM Zn²⁺ on the curves of absorption spectra appear maximums in area of 500 nm, 1–2 mM Ni²⁺ and 0.5–3 mM Fe²⁺ – in area of 600 nm. Negative influence of nickel, cobalt, iron (II) and zinc ions at the concentrations of 2.5–4 mM on pigments formation by cells of *Lamprocystis* sp. Ya-2003 is discovered.

Inhibition by bivalent metals ions of pigments synthesis in purple sulfur bacteria is a considerable obstacle for realization by them of natural detoxication of the lighted zones of technogenic reservoirs from high-toxic hydrogen sulfide in the process of his use as electrons donor of anoxygenic photosynthesis.

Key words: photolithotrophic sulfur bacteria, pigments, heavy metals.

УДК 579.81+579.68+546.3 **О. М. Мороз** канд. биол. наук, ст. науч. сотр.
 Г. И. Звир канд. биол. наук, доц.
 С. А. Гнатуш канд. биол. наук, проф.

*Львовский национальный университет им. И. Франка,
ул. Грушевского, 4, г. Львов, Украина, 79005,
тел.: +38067-811-86-44, e-mail: moroz_oksana@yahoo.com*

ОБРАЗОВАНИЕ ПИГМЕНТОВ ФОТОЛИТОТРОФНЫМИ СЕРОБАКТЕРИЯМИ *LAMPROCYSTIS* SP. Ya-2003 ПОД ВЛИЯНИЕМ СОЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация. Фотолитотрофные серобактерии, которые играют важную роль в круговороте соединений сульфура в природе, в освещенных глубинных слоях водоёмов осуществляют аноксигенный фотосинтез, используя высокотоксичный H₂S как донор электронов. Исследование взаимодействия пурпурных серобактерий с тяжелыми металлами важно для выяснения их роли в процессах возобновления биоценозов и возможного использования для биоремедиации загрязненных гидроген сульфидом и тяжелыми металлами водоемов.

Установлено, что фотосинтезирующие пурпурные серные бактерии *Lamprocystis* sp. Ya-2003 содержат каротиноиды спириллоксантинового ряда, в частности, спириллоксантин, ликопин и родопин, а также бактериохлорофилл *a*. Под влиянием 0,5–4 mM солей никеля, кобальта, ферума (II) и цинка наблюдается незначительное смещение абсорбционных спектров поглощения экстрагированных пигментов. Под влиянием 1–4 mM Ni²⁺, 2–3 mM Fe²⁺ и 3–4 mM Zn²⁺ на кривых спектров поглощения появляются пики в участке 500 нм, 1–2 mM Ni²⁺ и 0,5–3 mM Fe²⁺ – в участке 600 нм. Выявлено негативное влияние ионов никеля, кобальта, ферума (II) и цинка при концентрациях 2,5–4 mM на образование пигментов клетками *Lamprocystis* sp. Ya-2003.

Ключевые слова: фотолитотрофные серобактерии, пигменты, тяжелые металлы.

УДК 579.81+579.68+546.3 **О. М. Мороз** канд. біол. наук, ст. наук. співр.
 Г. І. Звір канд. біол. наук, доц.
 С. О. Гнатуш канд. біол. наук, проф.

*Львівський національний університет ім. І. Франка,
вул. Грушевського, 4, м. Львів, Україна, 79005,
тел.: +38067-811-86-44, e-mail: moroz_oksana@yahoo.com*

УТВОРЕННЯ ПІГМЕНТІВ ФОТОЛІТОТРОФНИМИ СІРКОБАКТЕРІЯМИ *LAMPROCYSTIS* SP. Ya-2003 ЗА ВПЛИВУ СОЛЕЙ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

Анотація. Фотолітотрофні сіркобактерії, які відіграють важливу роль у кругообігу сполук сульфуру у природі, в освітлених глибинних шарах водойм здійснюють аноксигенний фотосинтез, використовуючи високотоксичний H₂S як донор електронів. Дослідження взаємодії пурпурових сіркобактерій з важкими металами важливе для з'ясування їх ролі у процесах відновлення біоценозів і можливого використання для біоремедіації забруднених гідроген сульфідом і важкими металами водойм.

Встановлено, що фотосинтезувальні пурпурові сіркові бактерії *Lamprocystis* sp. Ya-2003 містять каротиноїди спірилоксантинового ряду, зокрема, спірилоксантин, лікопін і родопін, а також бактеріохлорофіл *a*. За впливу 0,5–4 мМ солей нікелю, кобальту, феруму (II) та цинку спостерігається незначний зсув абсорбційних спектрів поглинання екстрагованих пігментів. За впливу 1–4 мМ Ni²⁺, 2–3 мМ Fe²⁺ та 3–4 мМ Zn²⁺ на кривих спектрів поглинання з'являються піки у ділянці 500 нм, 1–2 мМ Ni²⁺ та 0,5–3 мМ Fe²⁺ – у ділянці 600 нм. Виявлено негативний вплив йонів нікелю, кобальту, феруму (II) та цинку за концентрацій 2,5–4 мМ на утворення пігментів клітинами *Lamprocystis* sp. Ya-2003.

Ключові слова: фотолітотрофні сіркобактерії, пігменти, важкі метали.

ВСТУП

Забруднення біосфери важкими металами негативно впливає на живі компоненти біоценозів. Надходження їх у навколишнє середовище відбувається унаслідок природних процесів та антропогенних викидів. За впливу поллютантів змінюються не лише фізіологічні властивості представників, але й склад мікробних угруповань.

Фотолітотрофні сіркобактерії, які відіграють важливу роль у кругообігу сполук сульфору в природі, в освітлених глибинних шарах водойм здійснюють аноксигенний фотосинтез, використовуючи високотоксичний H₂S як донор електронів. Здатність бактерій до фотосинтезу обумовлена наявністю у них пігмент-протеїнових комплексів, інтегрованих у цитоплазматичну і внутрішньоплазматичні мембрани (Kondratieva, 1989). Основними пігментами пурпурових сіркобактерій є бактеріохлорофіли і каротиноїди – продукти конденсації залишків ізопрену (Kondratieva, 1988; Overmann, 1999). Пурпурові сіркобактерії містять в основному бактеріохлорофіл *a*, у деяких з них наявний бактеріохлорофіл *b*. У клітинах бактерій найбільше каротиноїдів спірилоксантинового ряду, зокрема, спірилоксантину, лікопину та родопіну. Лікопін, родопін, спірилоксантин, сфероїдин, окенон надають клітинам червоного і темно-червоного забарвлення (Kondratieva et al., 1989). Каротиноїди пурпурових сіркобактерій не лише поглинають енергію світла та передають її через бактеріохлорофіли до реакційних центрів і систем транспортування електронів, але й виконують фотопротекторну функцію (Kovacs et al., 2003). Відомо, що енергетичні, транспортні процеси та клітинний поділ є найбільш чутливими до дії важких металів (Ji and Silver, 1995). Утворення пурпуровими сіркобактеріями пігментів та їх спектральні характеристики за впливу йонів металів вивчені недостатньо. Дослідження взаємодії пурпурових сіркобактерій з важкими металами важливе для з'ясування їх ролі у процесах відновлення біоценозів і можливого використання для біоремедіації забруднених гідроген сульфідом і важкими металами водойм.

Метою роботи було дослідити вплив катіонів деяких двовалентних металів (нікелю, кобальту, феруму та цинку) на синтез пігментів клітинами пурпурових сіркобактерій роду *Lamprocystis*, виділених із збагаченої гідроген сульфідом води озера Яворівське.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктами дослідження були фотолітотрофні пурпурові сіркобактерії *Lamprocystis* sp. Ya-2003 (Kit and Gudz, 2007). Штам ідентифікований за фізіолого-біохімічними властивостями (Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, 1997).

Бактерії культивували за анаеробних умов при освітленні у колбах, об'ємом 500 мл, чи пробірках, об'ємом 25 чи 40 мл, у середовищі Ван Ніля (pH ~ 7,5) впродовж 10 діб при 25–28 °C (LGC Prochem: Certified reference materials, 2007; Overman and Garcia-Pichel, 2007; Rodina, 1965). Для створення анаеробних умов пробірки повністю заповнювали середовищем і закривали гумовими корками. Освітлення при вирощуванні культур було цілодобовим, забезпечувалось лампами розжарювання,

потужністю 60 Вт. Бактерії освітлювали лампами (з інтенсивністю 500–700 лк) крізь червоний інтерференційний світлофільтр, який пропускає світло з довжиною хвиль понад 800 нм. Інтенсивність освітлення вимірювали за допомогою люксметра Ю-116.

Для вивчення впливу йонів важких металів на якісний та кількісний склад фотосинтезувальних пігментів клітини *Lamprocystis* sp. Ya-2003 вирощували до середини експоненційної фази росту, осаджували (центрифуга ОС-6М) центрифугуванням при 4025 g впродовж 30 хв та інкубували впродовж 1 години з солями металів: NiCl_2 , CoCl_2 , $\text{FeCl}_2 \times 4 \text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnCl}_2 \times 7 \text{H}_2\text{O}$, у концентраціях: 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4 мМ. Клітини двічі відмивали розчином натрій хлориду, осаджували центрифугуванням і висівали в пробірки (густина засіву – 0,15 г/л) (Moroz et al., 2010). Культивували впродовж 10 діб у пробірках, доверху заповнених середовищем, визначали біомасу турбідиметричним методом, спектри поглинання і вміст пігментів у клітинах пурпурових сіркобактерій – спектрофотометричним (Britton, 1985; Musiyenko et al., 2001; Paperno et al., 1977).

Біомасу визначали на фотоелектроколориметрі КФК-3 при довжині оптичного шляху $l = 3$ мм. Біомасу розраховували за формулою:

$$C = E_{660} \times n \div K,$$

де: C – біомаса, г/л; E – екстинкція при $\lambda = 660$ нм; n – фактор розведення, разів; K – коефіцієнт перерахунку, рівний 0,17.

Для одержання екстракту пігментів клітини тричі відмивали від середовища ізотонічним розчином натрій хлориду, центрифугували 30 хв. при 4025 g. Супернатант зливали, а одержану пастоподібну біомасу тонким шаром наносили на поверхню скла і висушували за температури 40 °С. Висушені клітини руйнували розтиранням з кварцовим піском (Britton, 1985; Musiyenko et al., 2001; Paperno et al., 1977). Екстракцію пігментів проводили сумішшю етанолу та ацетону в об'ємному співвідношенні 1 : 1 до повного знебарвлення осаду. Одержані екстракти використовували для реєстрації спектрів поглинання (Musiyenko et al., 2001). Розділення суміші пігментів на окремі компоненти проводили за допомогою хроматографії на силуфольних пластинках («*Sorbfil*», Росія) у висхідному потоці системи розчинників бензин : ацетон : петролейний ефір : гексан в об'ємному співвідношенні 10 : 10 : 3 : 10 (Britton, 1985; Musiyenko et al., 2001; Paperno et al., 1977). Стандарними зразками були астаксантин із панцира креветок та β -каротин з клітин гриба *Blakeslea trispora*. Каротиноїди елюювали із силікагелю ацетоном або петролейним ефіром, бактеріохлорофіл – етанолом. Ідентифікацію пігментів проводили за забарвленням, величинами R_f та основними максимумами поглинання при відповідній довжині хвилі (Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, 1997; Frigard, 1996; Oelze, 1985). Спектри поглинання екстрагованих пігментів фототрофних сіркобактерій визначали у діапазоні довжин хвиль від 350 до 800 нм з використанням спектрофотометра СФ-46.

Концентрації основних пігментів бактерій розраховували за формулою:

$$C = D \div E \times l,$$

де C – концентрація пігменту, г/л; D – оптична густина розчину; E – питомий коефіцієнт екстинкції відповідного пігменту ($E_{\text{кар}} = 271,8$ при $\lambda = 474$ нм, $E_{\text{бкл}} = 930,0$ при $\lambda = 770$ нм), $l \times (\text{г} \times \text{см})^{-1}$; l – товщина поглинаючого шару (0,3 см), см.

Вміст пігментів з розрахунку на 1 г сухої ваги клітин обчислювали за формулою:

$$A = C \times V \times K \div H,$$

де A – кількість пігменту на 1 г сухої ваги клітин (мг/г); C – концентрація пігменту, г/л; V – об'єм екстракту, мл; H – наважка клітин, г; K – відношення об'єму елюату до об'єму розчину, нанесеного на хроматограму (Musiyenko et al., 2001; Paperno et al., 1977).

Статистичну обробку результатів проводили загальноприйнятими методами з використанням програми “Microsoft Excel 2003”. Для оцінки достовірності різниці

між статистичними характеристиками альтернативних сукупностей даних обраховували коефіцієнт Стьюдента, достовірною вважалася різниця при рівні значимості $p \leq 0,05$ (Lakyn, 1990).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Пігментний склад пурпурових сіркових бактерій роду *Lamprocystis* не є однорідним. Від складу та співвідношення пігментів залежить забарвлення бактерій. Воно може бути не тільки пурпуровим, але пурпурово-фіолетовим, жовтим або бурокоричневим. Оскільки на біосинтез пігментів можуть впливати різні чинники, зокрема, кисень, світло різного спектру довжин хвиль й інтенсивності, компоненти середовища (Kondratieva, 1989), ми дослідили, як змінюється якісний склад та вміст пігментів у *Lamprocystis* sp. Ya-2003 за впливу йонів деяких двовалентних металів.

Хроматографічне розділення компонентів екстрактів клітин *Lamprocystis* sp. Ya-2003, вирощених у середовищі Ван Ніля до біомаси 4,1–5,2 г/л, дало змогу виявити пігменти, різні за забарвленням та величиною *Rf* (таблиця). На хроматограмах переважали яскраво-зелені, рожево-пурпурові, яскраво-жовті та пурпурові ділянки. Порівняння даних літератури з результатами аналізу спектрів поглинання та хроматографічного розподілу дозволило ідентифікувати пігменти (Britton, 1985; Gudz et al., 2011; Kondratieva et al., 1989), наявні у клітинах *Lamprocystis* sp. Ya-2003. У розчині екстрагованих пігментів основні максимуми поглинання спостерігали при 400, 450, 550, 650, 750 нм. Досліджувані бактерії містять каротиноїди спірілоксантинового ряду, зокрема, спірілоксантин, лікопін і родопін, а також бактеріохлорофіл *a*.

Фізико-хімічні властивості пігментів *Lamprocystis* sp. Ya-2003

Пігмент	Бактеріохлорофіл <i>a</i>	Спірілоксантин	Лікопін	Родопін
Забарвлення на хроматограмі	Яскраво-зелене	Рожеве	Жовте	Яскраво-пурпурове
Максимуми поглинання, нм	650, 750	550	400	450
Максимуми поглинання пігментів у органічних розчинниках, нм	770 (Kondratieva et al., 1989)	445,5, 486, 518, 550 (Britton, 1985; Gudz et al., 2011)	414, 436, 463 (Britton, 1985)	455, 482, 516 (Britton, 1985)
Значення <i>Rf</i>	0,17±0,02	0,44±0,01	0,52±0,02	0,85±0,01

Проведено аналіз спектрів поглинання екстрагованих пігментів клітин *Lamprocystis* sp. Ya-2003 і визначено їх вміст за впливу 0,5–4 мМ солей нікелю, кобальту, феруму (II) та цинку.

Суттєвих змін якісного складу пігментів клітин *Lamprocystis* sp. Ya-2003 за впливу 0,5–4 мМ Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} не виявлено (рис. 1). За впливу йонів металів спостерігався лише незначний зсув абсорбційних спектрів поглинання екстрагованих пігментів. За впливу 1–4 мМ Ni^{2+} , 2–3 мМ Fe^{2+} та 3–4 мМ Zn^{2+} на кривих спектрів поглинання пігментів спостерігали появу піків у ділянці 500 нм, 1–2 мМ Ni^{2+} та 0,5–3 мМ Fe^{2+} – появу піків у ділянці 600 нм, що відповідають каротиноїдам, які поглинають світло у видимій та інфрачервоній ділянках спектра (з максимумами поглинання 400–550 нм) (Britton, 1985; Gudz et al., 2011). Можливо, важкі метали викликають незначні зміни конформації молекул пігментів з подальшою їх модифікацією, що відображається у зміні їх спектральних характеристик.

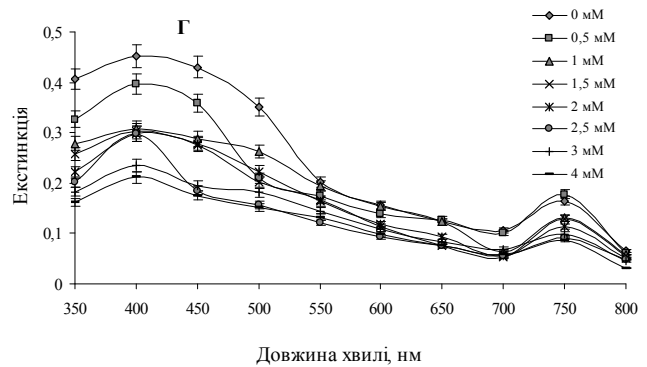
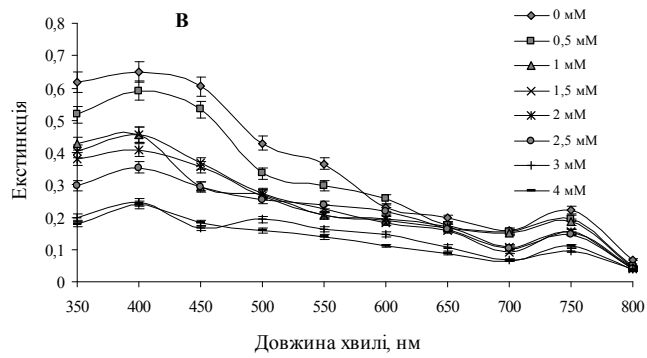
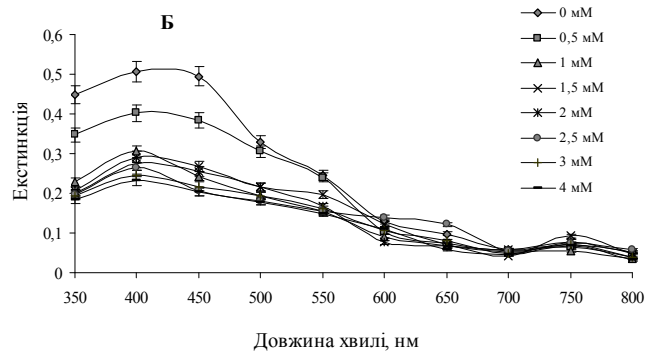
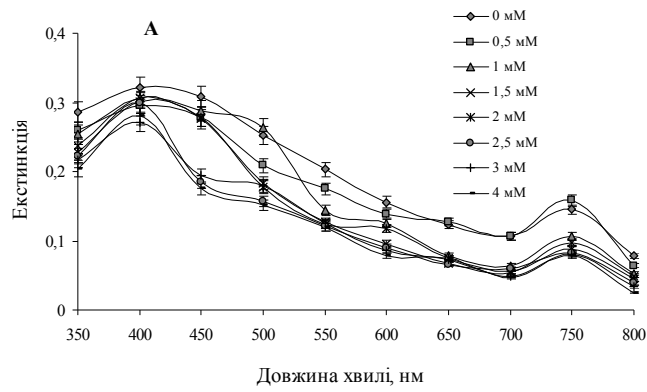


Рис. 1. Спектри поглинання пігментів *Lamprocystis* sp. Ya-2003 за впливу різних концентрацій Ni^{2+} (А), Co^{2+} (Б), Fe^{2+} (В), Zn^{2+} (Г)

Із зростанням концентрації йонів нікелю, кобальту, феруму (II) та цинку під час інкубування спостерігали зниження вмісту бактеріохлорофілу *a*, лікопіну, родопіну та спірілоксантину у клітинах бактерій (рис. 2). За впливу 4 мМ йонів нікелю

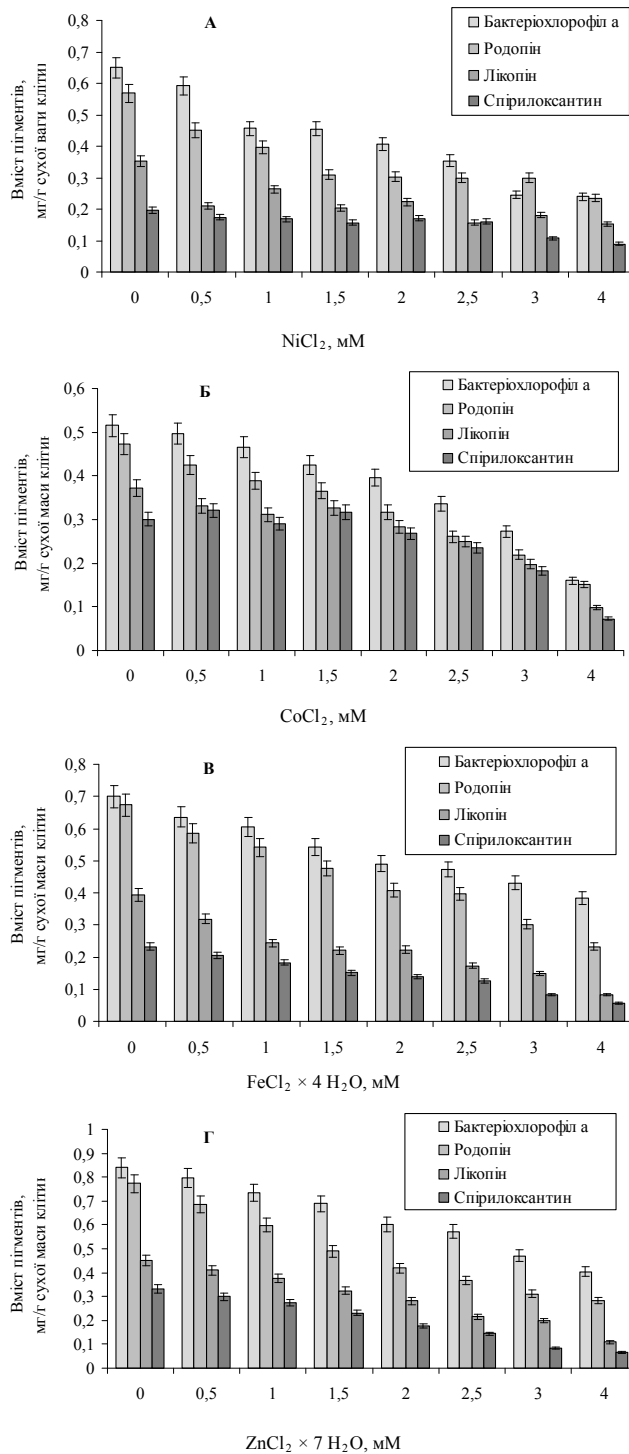


Рис. 2. Вплив Ni²⁺ (А), Co²⁺ (Б), Fe²⁺ (В), Zn²⁺ (Г) на вміст фотосинтезувальних пігментів бактерій *Lamprocystis* sp. Ya-2003

клітини утворювали родопіну на 58,7 % менше, ніж у контрольному варіанті, вміст спірилоксантину знижувався на 54,8 %. За впливу 3 мМ йонів металу клітини синтезували бактеріохлорофілу *a* на 62,3 % менше, а за впливу 2,5 мМ йонів нікелю клітини утворювали лікопіну на 55,4 % менше, ніж у контролі. Меншу на 53,7 % кількість, ніж у контрольному варіанті, родопіну клітини утворювали за впливу 3 мМ йонів кобальту, бактеріохлорофілу *a*, лікопіну та спірилоксантину – за впливу 4 мМ йонів металу, вміст пігментів знижувався відповідно на 68,9; 73,4 та 75,8; %. Суттєве зниження вмісту родопіну та спірилоксантину (відповідно на 55,1 і 64,2 %) спостерігали за впливу 3 мМ солі феруму (II), понад 4 мМ – бактеріохлорофілу *a* (на 45,3 %), 2,5 мМ – лікопіну (на 55,9 %). За впливу 2,5 мМ йонів цинку під час інкубування в клітинах сповільнювався синтез лікопіну, родопіну та спірилоксантину, внаслідок чого спостерігали зниження вмісту пігментів відповідно на 52,2; 52,7 і 56,2 % порівняно з контролем, за впливу 4 мМ йонів металу вміст бактеріохлорофілу *a* у клітинах бактерій виявився нижчим, ніж у контрольному варіанті, на 52,0 %. Таким чином, виявлено негативний вплив йонів нікелю, кобальту, феруму (II) та цинку за концентрацій 2,5–4 мМ на синтез пігментів (каротиноїдів – спірилоксантину, лікопіну, родопіну, та бактеріохлорофілу *a*) клітинами фотосинтезувальних пурпурових сіркових бактерій *Lamprocystis* sp. Ya-2003.

Спектральні властивості пігментів у клітині визначаються взаємодією їх молекул між собою, а також з ліпідами і білками фотосинтезувальних мембран хромофорів (Kondratieva, 1989). Імовірно, бактерії роду *Lamprocystis* акумулюють йони металів, нагромаджуючи їх як у поверхневих структурах, так і всередині клітин. Наявність металів у цитоплазмі є причиною їх зв'язування з функціональними групами багатьох важливих клітинних метаболітів, модифікації активної конформації та денатурації ферментів і нуклеїнових кислот, інгібування реплікації ДНК, синтезу РНК, білка, пігментів, пригнічення дихання, порушення процесів азотфіксації, фотосинтезу тощо (Nies, 1999; Tashirev, 1995). Пригнічення йонами двовалентних металів утворення пігментів фотосинтезувальними пурпуровими сіркобактеріями є значною перешкодою для здійснення ними природного очищення освітлених зон техногенних водойм від високотоксичного гідроген сульфід у процесі його використання як донора електронів аноксигенного фотосинтезу.

ВИСНОВКИ

Показано, що клітини *Lamprocystis* sp. Ya-2003, вирощені у середовищі Ван Ніля, містять каротиноїди, зокрема, спірилоксантин, лікопін і родопін, а також бактеріохлорофіл *a*. За впливу 0,5–4 мМ солей нікелю, кобальту, феруму (II) та цинку якісний склад пігментів клітин *Lamprocystis* sp. Ya-2003 суттєво не змінюється. За впливу 1–4 мМ Ni^{2+} , 2–3 мМ Fe^{2+} та 3–4 мМ Zn^{2+} на кривих абсорбційних спектрів поглинання екстрагованих пігментів з'являються піки у ділянці 500 нм, 1–2 мМ Ni^{2+} та 0,5–3 мМ Fe^{2+} – у ділянці 600 нм. Йони нікелю, кобальту, феруму (II) та цинку за концентрацій 2,5–4 мМ негативно впливають на утворення пігментів клітинами досліджуваних бактерій, вміст яких порівняно з контролем достовірно ($p \leq 0,05$) зменшується. Очевидно, за впливу йонів важких металів, які зумовлюють зміни якісного та кількісного складу пігментів фотолітотрофних пурпурових сіркобактерій, можуть знижуватися фотопротекторні властивості каротиноїдів, а також метаболічна активність бактерій, зокрема, здатність до детоксикації гідроген сульфід у забруднених важкими металами природних, техногенних водоймах та промислових стоках.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Britton, G., 1985.** General carotenoid methods. Methods in enzymology. Academic press, London. 3 (B), 113–145.
- Frigard, E. N., 1996.** Spectrochromatograph of photosynthetic pigments as fingerprinting technique for microbial phototrophs. FEMS Microbiol. Ecol. 20, 69–77.

- Gudz, S. P., Gorishnyj, M. B., Hnatush, S. O., 2011.** Bakterialniy fotosintez [Bacterial photosynthesis]. LNU Press, Lviv (in Ukrainian).
- Ji, G., Silver, S., 1995.** Bacterial resistance mechanisms for heavy metals of environmental concern. *J. Indust. Microbiol.* 14, 61–75.
- Kit, L. Ya., Gudz, S. P., 2007.** Purpurovi sirkobakteriyi z vodoyom Yavorivskogo rodovishcha sirkki [Purple sulfur bacteria from Yavoriv sulfur deposit reservoirs]. *Microbiol. Zhurn.* 69 (1), 12–19 (in Ukrainian).
- Kondratieva, E. N., 1989.** Fotosinteziruyushchie mikroorganizmy [Photosynthetic microorganisms]. Moscow Univ. Press, Moscow (in Russian).
- Kondratieva, E. N., 1988.** Sistematicheskoe polozhenie i fiziologo-biohimicheskoe raznoobrazie fototrofnih mikroorganizmov [Systematic position, physiological and biochemical variety of phototrophic microorganisms]. *Phototrophic microorganisms. Scient. Center of AS USSR Biol. Research., Moscow.* 3–9 (in Russian).
- Kondratieva, E. N., Maximova, I. V., Samojlov, V. D., 1989.** Fotosinteziruyushchie bakterii [Photosynthetic bacteria]. Moscow Univ. Press, Moscow. 6–82 (in Russian).
- Kovacs, A. T., Rakhely, G., Kovacs, K. L., 2003.** Genes involved in the biosynthesis of photosynthetic pigments in the purple sulfur photosynthetic bacterium *Thiocapsa roseopersicina*. *Appl. Environm. Microbiol.* 69 (6), 3093–3102.
- Lakyn, G. F., 1990.** Byometryja [Biometrics]. Higher school, Moscow (in Russian).
- LGC Prochem: Certified reference materials, 2007.** Retrieved from URL.
- Moroz, O. M., Klym, I. R., Podoprygora, O. I., Borsukevych, B. M., 2010.** Vpliv vazhkih metaliv na rist i oksisnennya sirkovodnyu fotosintezuvalnimi sirkobakteriyami vodoymi kar'eru Yavorivskogo sirkovogo rodovishcha [Hard metals influence on growth and hydrogen sulfide oxidation by photosynthetic sulfur bacteria from Yavoriv sulfur deposit open pit water]. *Nauk. Visn. Uzhgorod. Univ. Ser. Biol.* 28, 30–34 (in Ukrainian).
- Musiyenko, M. M., Parshykova, T. V., Slavnyi, P. S., 2001.** Spektrofotometrichni metodi v praktitsi fiziologiyi, biohimiyi ta ekologiyi roslin [Spektrofotometrical methods in practice of plants physiology, biochemistry and ecology]. Fitosociocenter, Kyiv (in Ukrainian).
- Nies, D. H., 1999.** Microbial heavy metal resistance. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 51, 730–750.
- Oelze, J. M., 1985.** Analysis of bacteriochlorophylls. *Meth. microbiol.* 18, pp. 257–284.
- Opredelitel bakteriy Berdzhii, 1997.** [Bergey's Manual of Systematic Bacteriology]. Mir, Moscow (in Russian).
- Overmann, J., 1999.** Mahoney Lake: A case study of the ecological significance of phototrophic sulfur bacteria. *Adv. Microbiol. Ecol.* 15, 251–288.
- Overmann, J., Garcia-Pichel, F., 2007.** The phototrophic way of life. *The Prokaryotes: Ecophysiology and Biochemistry.* Springer, New York.
- Paperno, T. Ya., Pozniakov, V. P., Smirnova, A. A., Elagin, L. M., 1977.** Fiziko-himicheskie metody issledovaniya v organicheskoy i biologicheskoy himii [Physical and chemical methods of research in organic and biological chemistry]. Prosveshcheniye, Moscow (in Russian).
- Rodina, A. G., 1965.** Metody vodnoy mikrobiologii: Prakt. Rukovodstvo [Methods of water microbiology: Practical Guidance]. Nauka, Moscow, Leningrad (in Russian).
- Tashirev, A. B., 1995.** Vzaimodeystvie mikroorganizmov s metallami [Coaction of microorganisms with metals]. *Microbiol. Zhurn.* 57 (2), 95–104 (in Russian).

Стаття надійшла в редакцію: 14.04.2015

Рекомендує до друку: д-р біол. наук, проф. Й. В. Царик