

УДК: 579.811.2/3+577.12.+577.151

ВПЛИВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА РІСТ І ОКИСНЕННЯ СІРКОВОДНЮ ФОТОСИНТЕЗУВАЛЬНИМИ СІРКОБАКТЕРІЯМИ ВОДОЙМИ КАР'ЄРУ ЯВОРІВСЬКОГО СІРКОВОГО РОДОВИЩА

Мороз О. М., Клим І. Р., Подопрігора О. І., Борсукевич Б. М.

Вплив важких металів на ріст і окиснення сірководню фотосинтезувальними сіркобактеріями водойми кар'єру Яворівського сіркового родовища. — О.М. Мороз, І.Р. Клим, О.І. Подопрігора, Б.М. Борсукевич. — Виявлено, що у воді з глибин 0–75 м кар'єру Яворівського сіркового родовища вміст Sr^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} та Cu^{2+} суттєво не відрізняється, а Cd^{2+} значно перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК). Встановлено мінімальні інгібуючі ріст концентрації солей важких металів для культури пурпурових фототрофних сіркобактерій *Lamprocystis* sp. Ya-1 та штаму зелених фототрофних сіркобактерій *Chlorobium limicola* Ya-2002: $Pb(NO_3)_2$ (1 та 3 мМ), $ZnSO_4 \cdot 7 H_2O$ (2 та >4 мМ), $NiCl_2$ (1 та 2,5 мМ), $CoCl_2$ (1,5 та 4 мМ), $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ (3 та >4 мМ), $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$ (3 та 4 мМ), $CdSO_4$ (3 та 2,5 мМ), $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ (4 та 3 мМ), $MnSO_4$ (>4 мМ) відповідно. Штам *C. limicola* Ya-2002 виявився більш стійким до високих концентрацій солей важких металів, ніж культура *Lamprocystis* sp. Ya-1. Показано, що під впливом 1,5–2,5 мМ іонів міді, цинку, кобальту, нікелю та марганцю різко пригнічується фотоасиміляція сірководню штамом *C. limicola* Ya-2002.

Ключові слова: пурпурові та зелені фототрофні сіркобактерії, *Lamprocystis*, *Chlorobium*, сірководень, важкі метали.

Адреса: Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Грушевського, 4, м. Львів 79005, Україна;
e-mail: moroz_oksana@yahoo.com

Hard metals influence on growth and hydrogen sulfide oxidation by photosynthetic sulfur bacteria from Yavoriv sulfur deposit open pit water. — О.М. Мороз, І.Р. Клим, О.І. Подопрігора, Б.М. Борсукевич. — In water from 0–75 m depth of Yavoriv sulfur deposit open pit maintenance of Sr^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} and Cu^{2+} significantly not differ from, but Cd^{2+} considerably exceed admitted limit was discovered. Minimal engibying growth concentrations of hard metals salts to purple phototrophic sulfur bacteria culture *Lamprocystis* sp. Ya-1 and green sulfur bacteria strain *Chlorobium limicola* Ya-2002: $Pb(NO_3)_2$ (1 and 3 mM), $ZnSO_4 \cdot 7 H_2O$ (2 and >4 mM), $NiCl_2$ (1 and 2,5 mM), $CoCl_2$ (1,5 and 4 mM), $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ (3 and >4 mM), $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$ (3 and 4 mM), $CdSO_4$ (3 and 2,5 mM), $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ (4 and 3 mM), $MnSO_4$ (>4 mM), accordingly, were established. The strain *C. limicola* Ya-2002 proved to be more resistant to hard metals high concentrations than culture *Lamprocystis* sp. Ya-1. Under influence of 1,5–2,5 mM copper, zinc, cobalt, nickel and manganese ions hydrogen sulfide photoassimilation by *C. limicola* Ya-2002 strain strongly decreased was shown.

Key words: purple and green phototrophic sulfur bacteria, *Lamprocystis*, *Chlorobium*, hydrogen sulfide, hard metals.

Address: Ivan Franko National University of L'viv, Hrushevsky Str., 4, Lviv 79005, Ukraine; e-mail: moroz_oksana@yahoo.com

Вступ

Яворівське державне гірничо-хімічне підприємство з видобутку сірки у червні 1998 року припинило промислову діяльність. З цього часу значна територія сірковидобувного кар'єру затоплюється водою, у 2009 році глибина водної товщі сягнула позначки 90 м.

У поверхневому шарі води ще до 2005 року виявлявся сірководень, наявність якого у цій зоні неприпустима через високу його токсичність. У техногенній водоймі (озері "Яворівське") формуються нові гідрогеологічні і гідрологічні умови, нові угруповання мікроорганізмів, яким немає аналога у природі [2, 18]. Вивчення життєдіяльності фотолітотрофних (ціанобактерій, пурпурових і зелених сіркобактерій) та хемолітотрофних мікроорганізмів (нітрифікувальних, безбарвних сіркоокиснювальних та сульфатвідновлювальних бактерій) у забрудненій неорганічними сполуками сірки стгучній водоймі актуальне для пошуку ефективних шляхів її очистки.

Фототрофні сіркові бактерії, які населяють освітлені глибинні шари водойм, – це специфічна група мікроорганізмів, що здійснюють аноксигенний фотосинтез, використовуючи різні відновлені сполуки сірки (сірководень) як донори електронів [9]. Найчастіше продуктами окиснення відновлених сполук сірки є сульфат і молекулярна сірка. Сірка може накопичуватись всередині клітини пурпурових сіркобактерій [15]. Фотосинтезувальні сіркобактерії беруть участь у нагромадженні органічних речовин у водоймах, збагачують середовище сполуками азоту, здійснюючи азотфіксацію, і можуть засвоюватись іншими живими організмами. У багатьох водоймах ріст пурпурових і зелених сіркобактерій тісно пов'язаний з розвитком сульфатвідновлювальних бактерій, які є основними продуцентами сірководню [19]. Сіркобактерії можуть стимулювати розвиток сульфат- і сірководнювальних бактерій, постачаючи їм необхідні

органічні речовини, сірку і сульфати, які утворюються при окисненні сірководню [1, 5, 10, 12, 23].

Однією з основних проблем стану навколишнього середовища є наявність великих кількостей важких металів, радіонуклідів, а також їх сполук в ґрунтах, природних водоймах, стоках промислових підприємств [13, 14, 16]. Найбільш небезпечними забруднювачами довкілля є кадмій, хром, мідь, свинець, нікель, цинк [16, 22]. Характер взаємодії мікроорганізмів з металами визначається концентрацією металу, ступенем його токсичності, а також метаболічним потенціалом мікроорганізмів. Найбільш чутливими до дії важких металів є енергетичні процеси (у більшій мірі бродіння, ніж дихання), процеси клітинного поділу, транспорт цукрів і катіонів металів, синтез рибофлавіну [20].

Роль фототрофних сіркобактерій у процесах відновлення біоценозів і можливе використання їх для біоремедіації забруднених сульфатами, сірководнем і важкими металами водних ресурсів на території сіркових родовищ недостатньо вивчена [3, 6]. Метою роботи було визначити стійкість фотосинтезувальних сіркобактерій до різних концентрацій важких металів та з'ясувати основні закономірності окиснення ними сірководню у присутності іонів важких металів для розробки біотехнологічної моделі очистки забрудненого сірководнем і важкими металами водного середовища.

Матеріал і методи

Об'єктами дослідження були виділені з водойми кар'єру Яворівського сіркового родовища культура пурпурових фототрофних сіркобактерій *Lamprocystis sp. Ya-1* та штам зелених фототрофних сіркобактерій *Chlorobium limicola Ya-2002* [4, 9].

Відбір проб води з різних глибин кар'єру (0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 м) проводили за допомогою батометра. Концентрації Sr^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} та Cu^{2+} визначали на програмному комплексі зв'язку атомно-абсорбційного спектрофотометра С 115 М1 та комплексу КАС-120 з ІВМ, що є сумісною з ЕОМ. Фізичний зв'язок СФ та ЕОМ здійснювався за допомогою пристрою спряження (інтерфейса). Відбір проб води і визначення у них вмісту іонів важких металів проводили спільно з працівниками відділення гірничо-хімічної сировини Інституту "Гірхімпром" Академії гірничих наук України під керівництвом члена-кореспондента АГН України А. М. Гайдина.

Фотосинтезувальні пурпурові і зелені сіркобактерії культивували в анаеробних умовах при освітленні у колбах, об'ємом 500 мл, чи пробірках, об'ємом 25 мл, у середовищах АТСС №1449 та GSB впродовж 10 діб при 30° С [17, 21, 24]. Для створення анаеробних умов пробірки повністю заповнювали середовищем і закривали гумовими корками. Пурпурові сіркобактерії освітлювали (з інтенсивністю 500–700 лк) за допомогою ламп розжарювання через інтерференційний світлофільтр, який пропускає світло з довжиною хвиль понад

800 нм. Зелені сіркобактерії освітлювали (з інтенсивністю 40 лк) променями з довжиною хвиль 700–800 нм. Інтенсивність освітлення вимірювали за допомогою люксметра Ю-116.

Для вивчення впливу іонів важких металів на ріст культури *Lamprocystis sp. Ya-1* та штаму *C. limicola Ya-2002* клітини вирощували до середини експоненційної фази росту, осаджували центрифугуванням при 5 тис. об/хв впродовж 40 хв та інкубували впродовж 1 години з солями металів: $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, NiCl_2 , CoCl_2 , $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, CdSO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, MnSO_4 , у концентраціях: 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4 мМ. Клітини двічі відмивали дистильованою водою, осаджували центрифугуванням і висівали в пробірки (густина засіву – 0,15 г/л). Культивували впродовж 10 діб за анаеробних умов при освітленні, визначали біомасу. Біомасу визначали на фотоелектроколориметрі КФК-3 при довжині оптичного шляху $l = 3$ мм. Біомасу пурпурових сіркобактерій розраховували за формулою: $C = E_{660} \cdot n / 0,17$, зелених: $C = E_{450} \cdot n / 0,131$, де: C – біомаса, г/л; E – екстинкція при 660 і 450 нм; n – фактор розведення, разів; 0,17 та 0,131 – коефіцієнти перерахунку.

Для вивчення впливу важких металів на ріст та утилізацію сірководню *C. limicola Ya-2002* клітини, інкубовані в присутності солей металів (0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4 мМ) впродовж 1 години, двічі відмивали, осаджували центрифугуванням, однаковою кількістю клітин (0,15 г/л) висівали в пробірки, вирощували за анаеробних умов при оптимальному освітленні. Після 3, 5 та 7 діб росту визначали біомасу та сірководень у культуральній рідині [11].

Проводили статистичну обробку результатів [8].

Результати досліджень та їх обговорення

У техногенній водоймі, яка виникла на місці кар'єру Яворівського сіркового родовища, за останні роки виявлено не лише високі концентрації токсичних для живих організмів сполук сірки, але і важких металів [14]. У воді кар'єру вміст іонів стронцію, марганцю та цинку збільшується з глибиною, на глибині 75 м досягає 3,43, 0,421 і 0,482 мг/л відповідно, але суттєво не відрізняється від ГДК (табл. 1). Концентрації іонів кадмію, свинцю та міді з глибиною зменшуються. Вміст кадмію (0,049–0,010 мг/л) до глибини до 50 м значно перевищує ГДК ($p \leq 0,05$). Вміст іонів свинцю та міді виявився низьким і на жодній глибині не був вищим за ГДК.

Оскільки вміст важких металів у озері "Яворівське" не перевищував 40 мкМ (див. табл. 1), вплив солей свинцю, цинку, нікелю, кобальту, заліза, міді, кадмію, магнію та марганцю на ріст фотосинтезувальних сіркобактерій водойми кар'єру Яворівського сіркового родовища вивчали у значно вищих, ніж у цій водоймі, концентраціях. Найбільш різкий негативний вплив на ріст культури *Lamprocystis sp. Ya-1* здійснювали іони нікелю, свинцю та кобальту (табл. 2), біомаса вже при концентраціях 1–1,5 мМ виявлялася значно нижчою від контролю, при концентрації

1,5 мМ біомаса була нижчою від контролю у 4,9; 3,0 і 2,0 рази відповідно. Цинк значно пригнічував ріст бактерій при 2 мМ, мідь і кадмій – 3 мМ, маг-

ній – 4 мМ. Серед перевірених іонів металів лише марганець за концентрації 4 мМ не пригнічував ріст культури *Lamprocystis sp. Ya-1*.

Таблиця 1. Вміст іонів важких металів у воді озера "Яворівське" (березень 2010 року)

Глибина, м	Концентрація іону металу, мг/л					
	Sr ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Cd ²⁺	Pb ²⁺	Cu ²⁺
0	2,25±0,03	0,011±0,001	0,019±0,001	0,049±0,003*	0,018±0,002	0,021±0,005
5	2,37±0,02	0,017±0,001	0,025±0,001	0,033±0,002*	0,010±0,001	0,019±0,002
10	2,45±0,05	0,029±0,002	0,048±0,002	0,025±0,001*	0,009±0,003	0,016±0,001
20	2,57±0,01	0,047±0,001	0,093±0,003	0,016±0,003*	0,008±0,001	0,015±0,003
30	2,65±0,06	0,072±0,003	0,146±0,007	0,012±0,004*	0,008±0,001	0,014±0,002
40	2,69±0,04	0,246±0,005	0,237±0,006	0,010±0,003*	0,006±0,002	0,013±0,005
50	3,24±0,01	0,294±0,007	0,342±0,005	0,010±0,002*	0,008±0,001	0,012±0,001
60	3,39±0,03	0,336±0,008	0,458±0,004	0,008±0,001	0,007±0,001	0,011±0,001
75	3,43±0,07	0,421±0,009	0,482±0,003	0,006±0,001	0,005±0,001	0,011±0,001
ГДК [7]	2,0	0,01–0,25	0,01–1,0	0,005	0,02–0,1	0,02–1,5

Примітка: * – тут і далі у табл. 2, 3 $p \leq 0,05$

Таблиця 2. Біомаса *Lamprocystis sp. Ya-1* після 10 діб росту у середовищі АТСС клітин, інкубованих впродовж 1 години у присутності солей важких металів

Концентрація іонів важких металів, мМ	Pb(NO ₃) ₂	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	NiCl ₂	CoCl ₂	FeSO ₄ · 7H ₂ O	CuSO ₄ · 5H ₂ O	CdSO ₄	MgSO ₄ · 7H ₂ O	MnSO ₄
0,0	5,24±0,23	5,40±0,14	4,84±0,75	5,27±0,49	5,07±0,22	5,44±0,48	5,06±0,05	5,20±0,42	4,98±0,03
0,5	4,81±0,10	4,05±0,46	2,81±0,10	4,29±0,09	4,87±0,09	5,19±0,25	5,19±0,35	4,65±0,03	4,72±0,17
1,0	2,18±0,23*	3,62±0,15	1,52±0,03*	3,00±0,06	4,49±0,19	4,50±0,74	5,69±0,03	4,50±0,13	4,77±0,13
1,5	1,75±0,05*	3,00±0,17	0,99±0,04*	2,61±0,18*	3,77±0,18	4,01±0,11	4,73±0,10	4,71±0,10	4,62±0,16
2,0	1,34±0,05*	2,53±0,13*	0,70±0,09*	1,91±0,14*	3,66±0,09	3,54±0,08	2,63±0,05	4,36±0,20	4,33±0,25
2,5	0,86±0,05*	2,07±0,08*	0,58±0,05*	0,85±0,06*	3,47±0,25	2,85±0,11	2,57±0,14	3,53±0,17	3,58±0,04
3,0	0,66±0,05*	1,10±0,16*	0,43±0,05*	0,63±0,05*	1,99±0,03*	2,21±0,06*	1,83±0,11*	3,15±0,11	3,31±0,13
4,0	0,46±0,05*	0,71±0,18*	0,30±0,05*	0,44±0,04*	1,73±0,04*	2,15±0,25*	1,30±0,14*	2,49±0,06*	2,99±0,17

Таблиця 3. Біомаса *Chlorobium limicola Ya-2002* після 10 діб росту у середовищі GSB клітин, інкубованих впродовж 1 години у присутності солей важких металів

Концентрація іонів важких металів, мМ	Pb(NO ₃) ₂	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	NiCl ₂	CoCl ₂	FeSO ₄ · 7H ₂ O	CuSO ₄ · 5H ₂ O	CdSO ₄	MgSO ₄ · 7H ₂ O	MnSO ₄
0,	2,37±0,09	2,81±0,08	2,86±0,03	2,73±0,05	3,00±0,03	2,70±0,07	2,27±0,05	2,12±0,20	2,48±0,19
0,5	2,33±0,10	2,72±0,04	2,16±0,06	2,39±0,06	2,49±0,04	2,51±0,08	2,08±0,04	2,09±0,03	2,30±0,05
1,0	2,30±0,06	2,47±0,04	2,48±0,04	2,28±0,07	2,59±0,06	2,40±0,07	1,88±0,10	1,90±0,20	2,33±0,04
1,5	2,18±0,04	2,35±0,04	2,42±0,04	2,13±0,04	2,62±0,15	2,53±0,06	1,55±0,06	1,82±0,04	2,25±0,03
2,0	1,79±0,10	2,10±0,07	2,16±0,15	1,91±0,08	2,62±0,03	2,22±0,09	1,17±0,06	1,42±0,20	2,23±0,09
2,5	1,43±0,07	1,87±0,09	1,42±0,10*	1,87±0,08	2,71±0,12	1,94±0,03	1,01±0,10*	1,29±0,03	2,28±0,06
3,0	0,85±0,15*	1,70±0,02	1,40±0,18*	1,80±0,02	2,50±0,03	1,48±0,04	0,81±0,20*	1,02±0,08*	2,00±0,20
4,0	0,46±0,05*	1,59±0,02	1,33±0,05*	1,37±0,04*	2,41±0,03	1,25±0,03*	0,67±0,20*	0,86±0,15*	1,81±0,06

Таким чином, встановлено мінімальні, інгібуючі ріст, концентрації солей важких металів для культури пурпурових фототрофних сіркобактерій *Lamprocystis sp. Ya-1*. Під впливом цих концентрацій ріст бактерій на кінець експоненційної фази росту виявився значно пригніченим: Pb(NO₃)₂ (1 мМ), ZnSO₄ · 7 H₂O (2 мМ), NiCl₂ (1 мМ), CoCl₂ (1,5 мМ), FeSO₄ · 7 H₂O (3 мМ), CuSO₄ · 5 H₂O (3 мМ), CdSO₄ (3 мМ), MgSO₄ · 7 H₂O (4 мМ), MnSO₄ (>4 мМ) (див. табл. 2). Як видно з отриманих результатів, культура *Lamprocystis sp. Ya-1* виявилася стійкою до високих концентрацій солей важких металів.

На відміну від культури пурпурових фототрофних сіркобактерій *Lamprocystis sp. Ya-1*, ріст штаму *C. limicola Ya-2002* значно пригнічувався іонами важких металів, зокрема, нікелю та кадмію, при концентраціях 2,5–4 мМ (табл. 3). При концентрації 3 мМ свинцю і магнію біомаса бактерій була нижчою від контролю у 2,8 та 2,1 рази відпо-

відно. Цинк, залізо та марганець значного пригнічення росту бактерій не здійснювали, навіть за концентрації 4 мМ. Таким чином, встановлено мінімальні інгібуючі ріст концентрації солей важких металів для штаму зелених фототрофних сіркобактерій *C. limicola Ya-2002*: Pb(NO₃)₂ (3 мМ), ZnSO₄ · 7 H₂O (>4 мМ), NiCl₂ (2,5 мМ), CoCl₂ (4 мМ), FeSO₄ · 7 H₂O (>4 мМ), CuSO₄ · 5 H₂O (4 мМ), CdSO₄ (2,5 мМ), MgSO₄ · 7 H₂O (3 мМ), MnSO₄ (>4 мМ) (див. табл. 3). Як видно з отриманих результатів, штаму зелених фототрофних сіркобактерій *C. limicola Ya-2002* виявився більш стійким до високих концентрацій солей важких металів, ніж культура пурпурових сіркобактерій *Lamprocystis sp. Ya-1*.

Сірководень використовується аноксигенними фотосинтезувальними сіркобактеріями як донор електронів при фотосинтезі. Оскільки іони важких металів виявилися здатними інгібувати ріст цих бактерій, припускали, що вони теж негативно вплива-

тимуть на фотоасиміляцію ними сірководню. Досліджували вплив міді, цинку, кобальту, нікелю та марганцю на ріст та окиснення сірководню клітинами штаму зелених фотосинтезуючих сіркових бактерій *C. limicola* Ya-2002 (рисунок).

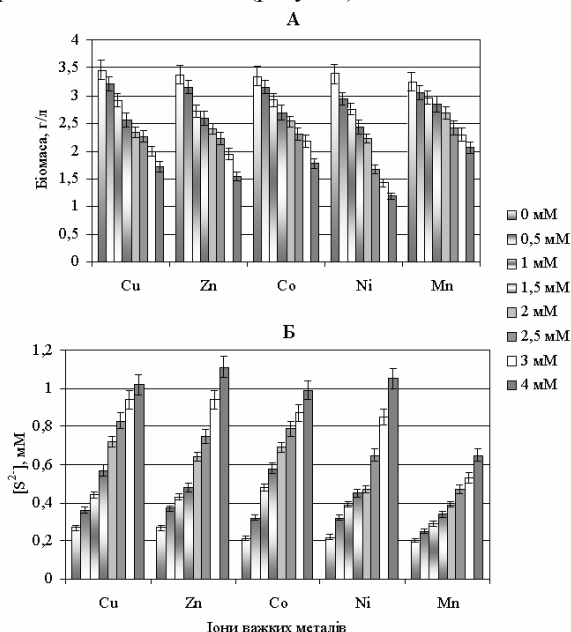


Рис. Вплив іонів міді, цинку, кобальту, нікелю та марганцю на нагромадження біомаси (А) і утилізацію сірководню (Б) *C. limicola* Ya-2002 після 7 діб росту у середовищі GSB

Із зростанням концентрації іону міді під час інкубації виявлено пропорційне пригнічення росту бактерій та зниження їх здатності окиснювати сірководень. Якщо у контрольному варіанті концентрація сірководню зменшується у 9,3 рази порівняно з його початковим вмістом від 2,50 мМ до 0,27 мМ, то під впливом солі міді вже у концентрації 1,5 мМ після 7 діб росту вміст сірководню зменшується лише у 4,4 рази порівняно з його початковим вмістом від 2,50 мМ до 0,57 мМ, тобто спостерігається різке (у 2,1 рази) пригнічення фотоасиміляції сірководню штамом *C. limicola* Ya-2002 ($p \leq 0,05$). За

концентрації іону міді 2–4 мМ рівень утилізації сірководню знижується ще більше: у 2,7–3,7 рази порівняно із контролем ($p \leq 0,05$). Якщо у контрольному варіанті після 7 діб росту біомаса бактерій становила 3,46 г/л, то під впливом 4 мМ іону міді вона була вдвічі нижчою і становила лише 1,72 г/л ($p \leq 0,05$).

Подібно до іону міді різке пригнічення утилізації сірководню викликали іони кобальту і нікелю у концентрації 1,5 мМ, цинку – 2 мМ та марганцю – 2,5 мМ. Якщо іон нікелю значно інгібував ріст бактерій вже при концентрації 2,5 мМ, то іон кобальту, як і міді та цинку, лише при концентрації 4 мМ. Найменш негативний вплив на ріст виявив іон марганцю. Таким чином, доведено, що під впливом іонів міді, цинку, кобальту, нікелю та марганцю пригнічується як приріст біомаси, так і фотоасиміляція сірководню штамом *C. limicola* Ya-2002, причому у більшій мірі, ніж ріст – процес аноксигенного фотосинтезу.

Висновки

Виявлено, що у воді з глибин 0–75 м кар'єру Яворівського сіркового родовища вміст іонів стронцію, марганцю, цинку, свинцю та міді суттєво не відрізняється, а кадмію значно перевищує ГДК.

Встановлено мінімальні концентрації солей важких металів для культури пурпурових фототрофних сіркобактерій *Lamprocystis* sp. Ya-1 та штаму зелених фототрофних сіркобактерій *C. limicola* Ya-2002, за яких ріст бактерій виявився значно пригніченим: Pb(NO₃)₂ (1 та 3 мМ), ZnSO₄ · 7 H₂O (2 та >4 мМ), NiCl₂ (1 та 2,5 мМ), CoCl₂ (1,5 та 4 мМ), FeSO₄ · 7 H₂O (3 та >4 мМ), CuSO₄ · 5 H₂O (3 та 4 мМ), CdSO₄ (3 та 2,5 мМ), MgSO₄ · 7 H₂O (4 та 3 мМ), MnSO₄ (>4 мМ) відповідно.

Штам *C. limicola* Ya-2002 виявився більш стійким до високих концентрацій солей важких металів, ніж культура *Lamprocystis* sp. Ya-1.

Показано, що під впливом 1,5–2,5 мМ іонів міді, цинку, кобальту, нікелю та марганцю суттєво знижується здатність до фотоасиміляції сірководню штамом *C. limicola* Ya-2002.

1. Антипчук А. Ф. Микробиологический контроль в прудовых хозяйствах / А.Ф. Антипчук. – К. : Наук. думка, 1971. – 186 с.
2. Баран І. М. Екологічний моніторинг водойм Яворівського сіркового родовища; мікробіологічний контроль / І.М. Баран, О.І. Подопрігора, Г.В. Гришук, Л.С. Боднар, Л.Я. Кіт, І.Р. Клим, С.О. Гнатуш, С.П. Гудзь // Довкілля та здоров'я. – 2003. – Вип. 27, № 4. – С. 56–62.
3. Галушка А. Бактерії циклу сірки та їхня роль у природі / А. Галушка, Т. Перетятко, С. Гудзь // Вісник Львів. ун-ту. Серія біологічна. – 2007. – Вип. 43. – С. 61–77.
4. Горішний М. Метаболізм глюкози та глікогену у клітинах зелених фотосинтезуючих сіркових бактерій *Chlorobium limicola* Ya-2002 / М. Горішний, С. Гудзь, С. Гнатуш // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. біол. – 2008. – Вип. 46. – С. 129–136.
5. Горленко В. М. Екологія водних мікроорганізмів / В.М. Горленко, Г.А. Дубинина, С.И. Кузнецов. – М. : Наука, 1977. – 287 с.
6. Грабович М. Ю. Участие прокариот в круговороте серы / М.Ю. Грабович // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 12. – С. 16–20.
7. Грушко Я. М. Вредные неорганические соединения в промышленных сточных водах: Справочник / Я.М. Грушко. – Ленинград : Химия, 1979. – 160 с.
8. Деркач М. П. Курс варіаційної статистики / М.П. Деркач, Р.Я. Гумецький, М.Є. Чабан. – К. : Вища школа, 1977. – 208 с.
9. Кіт Л. Я. Пурпурові сіркобактерії з водойм Яворівського родовища сірки / Л.Я. Кіт, С.П. Гудзь // Мікробіол. журн. – 2007. – Т. 69, № 1. – С. 12–19.
10. Кондратьєва Е. Н. Хемолитотрофи и метилотрофи / Е.Н. Кондратьєва. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1983. – 172 с.
11. Крешков А. И. Основы аналитической химии. Теоретические основы. Качественный анализ: Книга первая, изд. 4-е, перераб. / А.И. Крешков. – М.: Химия, 1976. – 472 с.
12. Кузнецов С. И. Микрофлора озер и её биохимическая деятельность / С.И. Кузнецов. – М. : Мир, 1972. – 362 с.
13. Кушкевич І. Вплив важких металів на клітини мікроорганізмів / І. Кушкевич, С. Гнатуш, С. Гудзь // Вісник Львів. ун-ту. Серія біологічна. – 2007. – Вип. 45. – С. 3–28.
14. Мороз О. М. Вплив важких металів на ріст та відновлення сульфатів *Desulfovibrio desulfuricans* / О.М. Мороз, С.П. Гудзь,

- О.І. Подопрігора, І.Р. Клім, Б.М. Борсукевич, М.Б. Деркач, О.В. Парасюк, С.О. Гнатуш // Науковий вісник Ужгородського ун-ту. Серія біологія. – Вип. 26. – 2009. – С. 193–202.
15. *Определитель бактерий Берджи*: в 2 т. Т 2. / ред. Дж. Хоулт, Н. Криг, П. Снит, Дж. Стейли, С. Уилльямс ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1997. – 368 с.
16. *Подгорский В. С.* Дрожжи – биосорбенты тяжёлых металлов / В.С. Подгорский, Т.П. Касаткина, О.Г. Лозовая // Микробиол. журн. – 2004. – Т. 66, №1. – С. 91–103.
17. *Родина А. Г.* Методы водной микробиологии: Практик. Руководство / А.Г. Родина. – Москва, Ленинград : Наука, 1965. – 363 с.
18. *Узбек И.Х.* Эколого-биологическая оценка эдафотопов техногенных ландшафтов степной зоны Украины: дисс. ... докт. биол. наук / Узбек И.Х. – Днепропетровск, 2001. – С. 164–229.
19. *Arogo J.* Hydrogen sulfide production from stored liquid swine manure: a laboratory study / J. Arogo, R. Zhand, G. Riskowski, D. Day // SAE. – 2002. – Vol. 42, №5. – P. 1241–1245.
20. *Ji G.* Bacterial resistance mechanisms for heavy metals of environmental concern / G. Ji, S. Silver // J. Indust. Microbiol. – 1995. – Vol. 14. – P. 61–75.
21. *LGC Prochem: Certified reference materials.* – 2007.
22. *McEldowney S.* Microbial biosorption of radionuclides in liquid effluent treatment / S. McEldowney // Appl. Biochem. and Biotechnol. – 1990. – Vol. 5. – P. 159–179.
23. *Oelze J.* Analysis of bacteriochlorophylls / J. Oelze // Method microbiol. – 1985. – Vol. 18. – P. 257–284.
24. *Overmann J.* Mahoney Lake: A case study of the ecological significance of phototrophic sulfur bacteria / J. Overmann // Adv. Microbiol. Ecol. – 1999. – Vol. 15. – P. 251–288.

Отримано: 30 квітня 2010 р.

Прийнято до друку: 24 червня 2010 р.