

ВПЛИВ Cu^{2+} І Cd^{2+} НА РІСТ І СУЛЬФІДОГЕННУ АКТИВНІСТЬ СУЛЬФАТВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ БАКТЕРІЙ ЗА ВИКОРИСТАННЯ АРОМАТИЧНИХ ВУГЛЕВОДНІВ

Н.С. Верхоляк¹, Т.Б. Перетятко¹, І.М. Стахера²

¹ Львівський національний університет імені Івана Франка (м. Львів, Україна)

e-mail: nataljaverkholjak@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7548-3842

e-mail: taras.peretyatko@lnu.edu.ua; ORCID: 0000-0002-5769-3050

² ВНКЗ ЛОР «Львівська медична академія імені Андрея Крупинського»

(м. Львів, Україна)

e-mail: irynastahera@gmail.com; ORCID: 0000-0003-0017-9664

Очищення водного середовища від речовин органічної й неорганічної природи є актуальною проблемою сьогодення. Потрапляння у воду недостатньо очищених стоків значно погіршує якість води і стан водойм загалом. Доволі поширеними забруднювачами водного середовища є ароматичні сполуки, зокрема толуен та ксилен. Окрім сполук органічної природи, стічні води містять у своєму складі багато неорганічних речовин та йонів важких металів. Серед поширених методів детоксикації середовища провідну роль відіграють біологічні, оскільки вони є економічно вигідними та екологічно безпечними. Одними з перспективних способів очищення є використанням мікроорганізмів, зокрема сульфатвідновлювальних бактерій. Досліджено вплив йонів важких металів на нагромадження біомаси та гідроген сульфід у бактеріях *Desulfotomaculum* sp. AR1 і *D. desulfuricans* Ya-11 за росту у середовищі з толуеном і ксиленом. Здатність сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfotomaculum* sp. AR1 і *D. desulfuricans* Ya-11 рости за одночасного внесення в середовище ароматичних сполук та йонів важких металів вказує на їх високий потенціал у використанні з метою очищення водного середовища від цих забруднювачів. Показано пригнічувальний вплив йонів металів на процес відновлення сульфат-йонів досліджуваними бактеріями, і, як наслідок, нагромадження меншої кількості токсичного гідроген сульфід. Проаналізовано вплив природи джерела карбону (натрій лактату/ксилену/толуену) та йонів важких металів на ріст бактерій *Desulfotomaculum* sp. AR1 і *D. desulfuricans* Ya-11. Показано, що на нагромадження біомаси бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 і *D. desulfuricans* Ya-11 впливає як природа донора електронів, так і наявність у середовищі йонів Cu^{2+} та/або Cd^{2+} . Виявлено здатність досліджуваних бактерій осаджувати йони Cu^{2+} та Cd^{2+} у вигляді нерозчинних сульфідів металів. Згідно з одержаними результатами сульфатвідновлювальні бактерії *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11 можна розглядати як перспективні у розробленні способів очищення водного середовища від йонів важких металів, зокрема Cu^{2+} і Cd^{2+} .

Ключові слова: водоочищення, важкі метали, гідроген сульфід, сульфат-йон, толуен, ксилен.

ВСТУП

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, щороку близько 13 млн смертельних захворювань є наслідком незадовільного екологічного стану довкілля [1]. Проблема очищення водойм від речовин органічної й неорганічної природи присвячено багато публікацій [2; 3]. Внаслідок антропогенного навантаження ароматичні

вуглеводні постійно надходять у навколишнє середовище і в результаті своєї надзвичайно високої стійкості накопичуються в ньому. Потрапляння у воду недостатньо очищених стоків значно погіршує якість води і стан водойм загалом [4].

Окрім сполук ароматичної природи, у стічних водах також виявляють неорганічні речовини, зокрема йони важких металів [5]. Йони важких металів є одними з найбільш токсичних забруднювачів водного

та ґрунтового середовища. Небезпека надходження у довкілля йонів важких металів визначається тим, що на відміну від органічних забруднювачів, вони не руйнуються, а переходять з однієї форми в іншу, зокрема включаються у склад солей, оксидів, органічних сполук [6]. Джерелом надходження йонів важких металів у навколишнє середовище є відходи практично всіх галузей народного господарства. Найбільш токсичними є Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cr (VI), Mn (VII), Hg^{2+} , Fe^{3+} , Sn^{2+} [6]. Токсичність надлишку низки елементів на живі організми проявляється у зміні проникності клітинної мембрани (Au, Ag, Cd, Cu, F, Hg, I, Pb), конкуренцією за життєво важливі метаболіти (As, Sb, Te, W, F), підвищеною спорідненістю з фосфатними групами та активними центрами АТФ і АДФ (Al, Zr та більшість важких металів), заміщенням життєво важливих іонів (Cr, Li, Pb, Sr), замінами важливих функціональних груп у молекулах [7; 8].

Біологічні методи очищення забрудненого середовища є економічно вигідними та екологічно безпечними способами [2]. Сульфатвідновлювальні бактерії є перспективними мікроорганізмами для очищення стічних вод від речовин органічної та неорганічної природи [9–11]. Внаслідок життєдіяльності сульфатвідновлювальні бактерії виділяють водень сульфід, який може взаємодіяти з йонами важких металів, утворюючи нерозчинні сульфідні метали, або відновлювати розчинні токсичні йони металів з утворенням менш токсичних чи менш розчинних форм [12].

Метою роботи було виявити вплив Cu^{2+} і Cd^{2+} на ріст і сульфидогенну активність сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11 за використання ароматичних вуглеводнів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Пошуки ефективних способів очищення середовища від ксенобіотиків є актуальною проблемою сьогодення [13]. Про забруднення водного середовища від ре-

човин різної природи описано у роботах Sharma S., Bhattacharya A., Дудник С.В., Євтушенко М.Ю., Кривомаз Т.І., Андрушиної І.М. та ін. Проблема скидання у водойми недостатньо очищених стоків, що значно погіршує якість води розглядається у працях Безцінного О.О., Ребрикової П.А., Шидловської О.А., Жолобак Н.М., Мокроусової О.Р. Одним із ефективних методів очищення середовища є використання мікроорганізмів [14; 15]. Мікроорганізми, завдяки фізіологічним і генетичним особливостям, швидко реагують на зміни складу середовища, на дію стресових чинників, появу у середовищі нових хімічних сполук природного або антропогенного походження [13].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом досліджень були сульфатвідновлювальні бактерії *Desulfovibrio desulfuricans* Ya-11, виділені з озера Яворівське [16] та *Desulfotomaculum* sp. AR1, виділені з системи очищення стічних вод м. Львова [17]. Бактерії культивували у середовищі Постгейта С такого складу (г/л): калій дигідрофосфат – 0,5; амоній хлорид – 1,0; натрій сульфат – 4,5; кальцій хлорид гексагідрат – 0,06; магній сульфат гептагідрат – 0,06; натрій лактат – 6; дріжджовий екстракт – 1; ферум (II) сульфат гептагідрат – 0,004; натрій цитрат дигідрат – 0,3; рН середовища – 7,6 [18] та модифікованому середовищі Постгейта С з ароматичними сполуками (толуеном, ксиленом) та з/без фумарату. Толуен та ксилен додавали у концентрації 2,6 г/л. Фумарат вносили у середовище після стерилізації у концентрації 6 г/л, попередньо розчинивши його у 10% NaOH. До середовищ культивування вносили купрум (II) у формі $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, кадмій (II) – CdSO_4 у концентраціях 1 мМ після стерилізації. Біомасу визначали турбідиметрично на фотоелектроколометрі КФК-3 ($\lambda=340$ нм, кювета 3 мм). Вміст SO_4^{2-} визначали турбідиметрично ($\lambda=520$ нм, кювета 10 мм) після осадження барій хлоридом згідно з ГОСТ 26426-85. Як стабілізатор суспензії використовували

ли гліцерин. Кількість гідроген сульфід у визначали у культуральній рідині колориметрично з використанням *n*-амінодиметиланіліндігідрохлориду ($\lambda=665$ нм, кювета 30 мм) згідно з патентом 6,340,596 В1. Катиони Cu^{2+} та Cd^{2+} якісно визначали у культуральній рідині до та після культивування [19]. Для визначення катіонів Cu^{2+} до 1–2 крапель культуральної рідини додавали 1–2 краплі $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, $\text{pH} \leq 7$. За наявності катіонів Cu^{2+} у рідині утворюється коричнево-червоний осад $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$. Для визначення катіонів Cd^{2+} краплю досліджуваного розчину поміщали на крапельну пластинку і додавали краплю $\text{K}[\text{BiJ}_4]$. За наявності іонів Cd^{2+} з'являється чорний осад утвореного BiJ_3 , який зникає після додавання KJ або $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.

Результати досліджень представлені як $x \pm m$. Проведено двофакторний дисперсійний аналіз впливу джерела карбону та іонів важких металів на нагромадження біомаси бактеріями, який дає змогу оцінити відмінності між вибірковими середніми для довільної кількості вибірок. Відмінності між контрольними та дослідними показниками вважали достовірною, коли ймовірність різниці становила $P < 0,05$. Для статистичного оброблення результатів використовували однофакторний дисперсійний аналіз.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Досліджено здатність сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfotomaculum* AR1, виділених із системи очищення стічних вод м. Львова, та *D. desulfuricans* Ya-11, виділених з озера Яворівське, використовувати толуен і ксилен як єдине джерело карбону та енергії [20]. Окрім сполук органічної природи стічні води містять у своєму складі багато неорганічних сполук, серед яких йони важких металів. Купрум належить до мікроелементів, що є у складі низки ферментів, проте, за підвищених концентрацій він спричиняє токсичну дію на живі організми [7; 21; 22]. Токсичність купруму зростає за одночасного впливу цинку, кадмію чи нікелю [21]. Досліджено вплив Cu^{2+} та Cd^{2+} на нагромадження біомаси бактеріями

Desulfotomaculum sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11. З цією метою бактерії вирощували у середовищах Постгейта С з натрій лактатом/ароматичними вуглеводнями та Cu^{2+} і/або Cd^{2+} (1 мМ) упродовж 12 діб. Контролем були середовища без йонів металів. За росту бактерій *Desulfotomaculum* sp. AR1 у середовищах з натрій лактатом та Cu^{2+} і Cd^{2+} найбільш пригнічувальний вплив на нагромадження біомаси спостерігали за синергічного впливу Cu^{2+} та Cd^{2+} . Біомаса бактерій була втричі меншою, порівняно з контролем (рис. 1, а). Наявність Cd^{2+} у середовищі призводила до зниження біомаси у 2,4 раза, а Cu^{2+} — у 2,8 раза порівняно з контрольними показниками.

Бактерії *Desulfotomaculum* sp. AR1 нагромаджували близько 0,5 г/л біомаси у середовищах з ароматичними вуглеводнями та йонами купруму (II) і кадмію (II), що було вдвічі менше, порівняно із біомасою у середовищах без металів (рис. 1, б, 1, в). Найменш негативний вплив на нагромадження біомаси бактерій спричиняли Cu^{2+} — у 1,3 раза, порівняно з контролем (рис. 1, б, 1, в). Внесення у середовище Cd^{2+} призводило до зниження біомаси у середовищі з ксиленом у 2,7 раза, у середовищі з толуеном — у 1,5 раза, порівняно з контролем.

Подібні результати отримано за культивування бактерій *D. desulfuricans* Ya-11 у середовищах Постгейта С з натрій лактатом/ароматичними сполуками та Cu^{2+} і/або Cd^{2+} . Найбільш виражений пригнічувальний вплив на нагромадження біомаси бактеріями *D. desulfuricans* Ya-11 також спостерігали за одночасного впливу Cu^{2+} та Cd^{2+} : у 4 рази за росту у середовищі з натрій лактатом (рис. 2, а), у 3 рази — у середовищі з ксиленом (рис. 2, в) та у 1,6 раза — з толуеном (рис. 2, б), порівняно з контрольними показниками. За росту бактерій *D. desulfuricans* Ya-11 у середовищі з натрій лактатом, більш виражений пригнічувальний ефект на нагромадження біомаси виявляли Cu^{2+} ніж Cd^{2+} , подібно як у *Desulfotomaculum* sp. AR1. Біомаса *D. desulfuricans* Ya-11 у середовищі з Cd^{2+} сягала 0,8 г/л, з Cu^{2+} — 0,6 г/л, що у

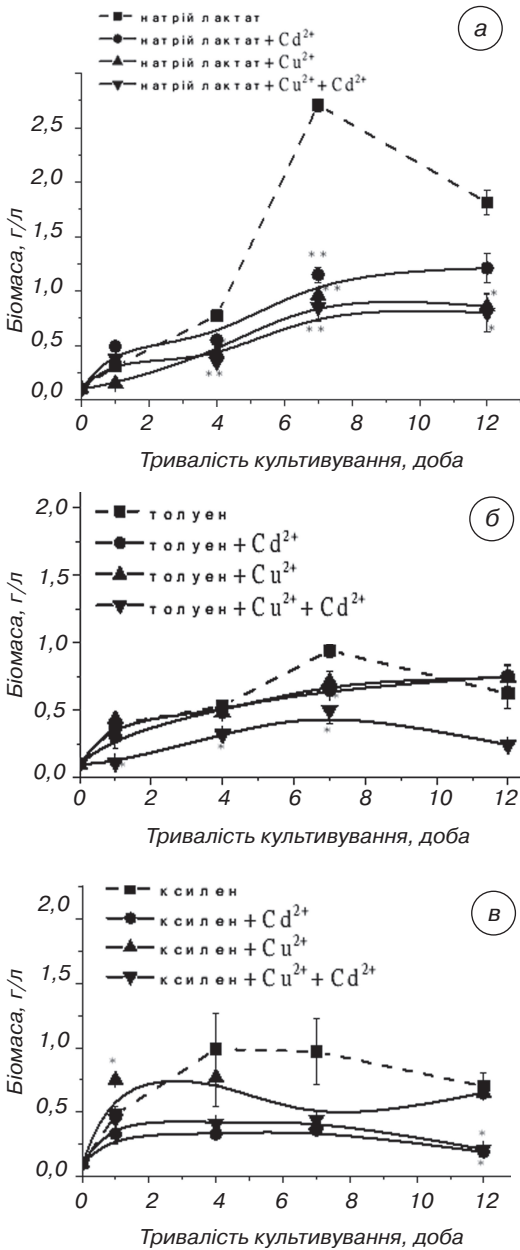


Рис. 1. Нагромадження біомаси бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 у середовищах Постгейта С з натрій лактатом (а), толуеном (б) та ксиленом (в) за впливу йонів важких металів
 Примітки: Контролем були середовища з органічними сполуками без йонів металів; * – P<0,05 – вірогідні зміни порівняно з контролем; ** – P<0,01 – вірогідні зміни порівняно з контролем.

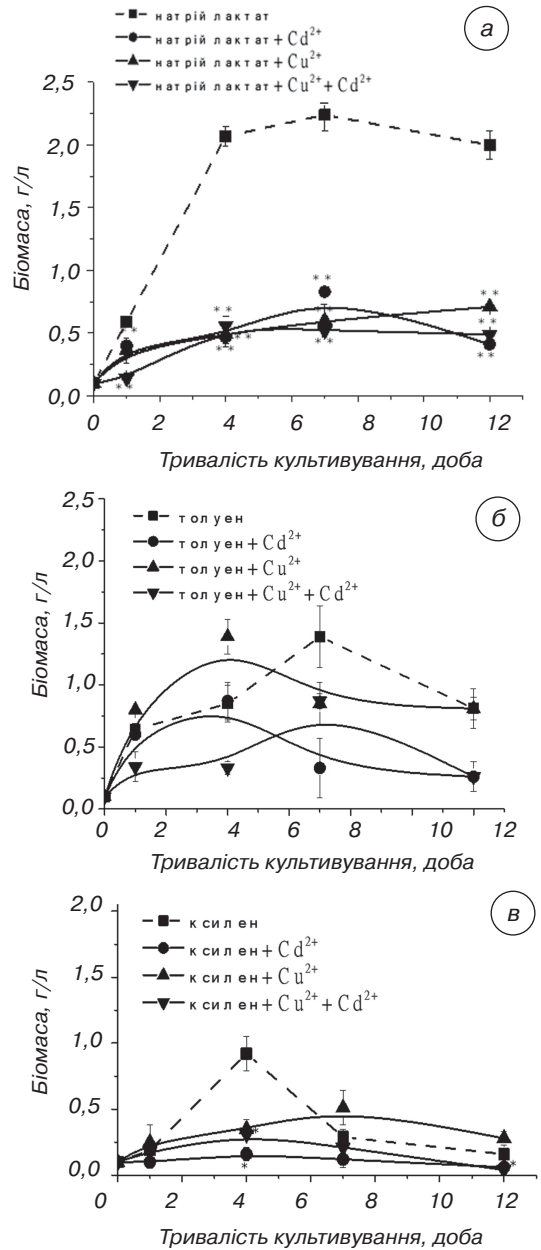


Рис. 2. Нагромадження біомаси бактеріями *D. desulfuricans* Ya-11 у середовищах Постгейта С з натрій лактатом (а), толуеном (б) та ксиленом (в) за впливу йонів важких металів
 Примітки: Контролем були середовища з органічними сполуками без йонів металів; * – P<0,05 – вірогідні зміни порівняно з контролем; ** – P<0,01 – вірогідні зміни порівняно з контролем.

2,7–3,7 раза менше, ніж у середовищах без йонів металів.

За впливу Cd^{2+} нагромадження біомаси бактеріями *D. desulfuricans* Ya-11 у середовищі з толуеном пригнічувалося у 1,6 раза (подібно як у *Desulfotomaculum* sp. AR1), у середовищі з ксиленом — у 5,8 раза, що удвічі більше порівняно з *Desulfotomaculum* sp. AR1. За росту *D. desulfuricans* Ya-11 у середовищі з ксиленом та Cu^{2+} біомаса знизилась у 1,8 раза (рис. 2, в). Внесення Cu^{2+} у середовище з толуеном не приводило до пригнічення росту бактерій *D. desulfuricans* Ya-11 (рис. 2, б).

Здатність сульфатвідновлювальних бактерій *Desulfotomaculum* sp. AR1 і *D. desulfuricans* Ya-11 рости за одночасного внесення в середовище ароматичних сполук та $\text{Cu}^{2+}/\text{Cd}^{2+}$ вказує на їх високий потенціал у використанні з метою очищення водного середовища. Для комплексних сполук біометалів (купруму (II), кобальту (II), цинку) з ароматичними сполуками характерне менша токсичність катіону металу в координованій формі, можливість використання біометалів як джерела мікроелементів [23]. Тому, можливо за наявності у середовищі з ароматичними сполуками йонів купруму (II) спостерігали менш токсичний вплив на мікроорганізми, аніж йонів кадмію (II).

Проведено двофакторний дисперсійний аналіз впливу природи джерела карбону

(натрій лактату/ксилену/толуену) та наявності йонів важких металів, зокрема Cu^{2+} і Cd^{2+} на нагромадження біомаси бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11 після семи діб культивування (рис. 3).

На нагромадження біомаси впливає як природа донора електронів, так і наявність у середовищі йонів купруму (II) та/або кадмію (II).

Унаслідок проведеного двофакторного аналізу впливу йонів $\text{Cd}^{2+}/\text{Cu}^{2+}/\text{Cd}^{2+}$ та Cu^{2+} й природи джерела карбону (натрій лактату/ксилену/толуену) показано, що на нагромадження біомаси бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 і *D. desulfuricans* Ya-11 ефект джерела карбону становить близько 40–50%, наявність йонів металів — 30–40% (табл. 1, рис. 3). Внесення у середовища Cd^{2+} і Cu^{2+} більше впливає на нагромадження біомаси *D. desulfuricans* Ya-11 ніж *Desulfotomaculum* sp. AR1 (табл. 1). Частки неврахованих факторів становлять 13–25%. Частка впливу джерела карбону у середовищі з Cd^{2+} є найбільшою і становить 53–57%. Можливо, це пов'язане з тим, що досліджувані бактерії нагромаджують більшу біомасу у середовищі з натрій лактатом за наявності Cd^{2+} , ніж у середовищі з ароматичними сполуками і Cd^{2+} (див. рис. 1, 2).

Результати досліджень з відновлення сульфат-йонів і нагромадження гідроген

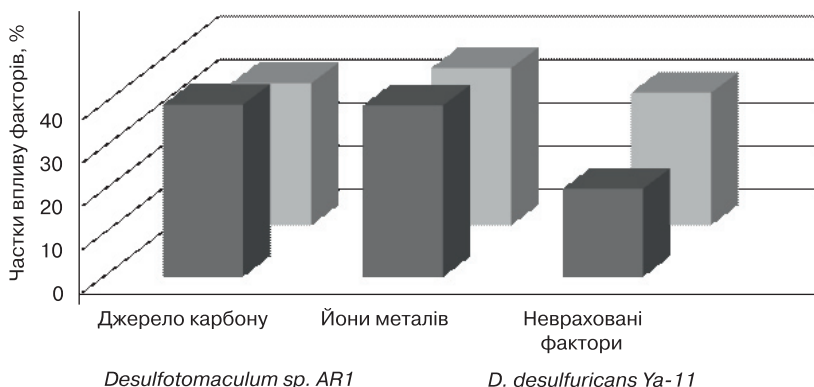


Рис. 3. Двофакторний дисперсійний аналіз впливу джерела карбону і йонів важких металів (Cu^{2+} і/або Cd^{2+}) на нагромадження біомаси бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11

Таблиця 1. Двофакторний дисперсійний аналіз впливу джерела карбону та наявності Cu^{2+} та/або Cd^{2+} на нагромадження біомаси бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 і *D. desulfuricans* Ya-11

Умови культивування	Фактори впливу	<i>Desulfotomaculum</i> sp. AR1	<i>D. desulfuricans</i> Ya-11
		Частки впливу фактора, %	
Середовище з Cd^{2+}	Джерело карбону	57,3	53,0
	Наявність Cd^{2+}	29,8	34,8
	Невраховані фактори	12,9	12,2
Середовище з Cu^{2+}	Джерело карбону	47,8	49,6
	Наявність Cu^{2+}	32,9	42,0
	Невраховані фактори	19,3	24,5
Середовище з Cd^{2+} та Cu^{2+}	Джерело карбону	43,6	33,5
	Наявність Cd^{2+} та Cu^{2+}	38,3	29,6
	Невраховані фактори	18,1	23,8

сульфіду бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11 за впливу йонів металів подано у табл. 2 й на рис. 4. Без йонів металів бактерії *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11 залежно від донора електронів використовують різну кількість сульфат-йонів: 14–15 ммоль —

у середовищі з натрій лактатом, 5,7–8 ммоль — з толуеном, 4,3–9,6 ммоль — з киснем. Внесення у середовища культивування Cu^{2+} та/або Cd^{2+} пригнічує використання сульфат-йонів бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 і *D. desulfuricans* Ya-11.

Таблиця 2. Вплив Cu^{2+} та/або Cd^{2+} на використання сульфат-йонів бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11

Середовище культивування	<i>Desulfotomaculum</i> sp. AR1	<i>D. desulfuricans</i> Ya-11
	SO_4^{2-} , мМ	SO_4^{2-} , мМ
Натрій лактат	14,43±0,22	15,03±0,25
Натрій лактат + Cu^{2+}	8,90±0,15**	4,84±0,15***
Натрій лактат + Cd^{2+}	8,68±0,05***	3,22±0,12***
Натрій лактат + Cu^{2+} + Cd^{2+}	7,99±0,05***	2,69±0,13***
Толуен	8,05±0,33	5,68±0,20
Толуен + Cu^{2+}	5,08±0,05**	2,62±0,11**
Толуен + Cd^{2+}	5,15±0,57*	2,54±0,25**
Толуен + Cu^{2+} + Cd^{2+}	3,46±0,25**	3,14±0,16**
Ксилен	9,56±1,86	4,25±0,21
Ксилен + Cu^{2+}	6,91±0,10	1,84±0,05**
Ксилен + Cd^{2+}	7,58±0,03	2,39±0,08**
Ксилен + Cu^{2+} + Cd^{2+}	7,83±0,01	3,52±0,04

Примітки: * — $P < 0,05$ — вірогідні зміни порівняно з контролем; ** — $P < 0,01$ — вірогідні зміни порівняно з контролем; *** — $P < 0,001$ — вірогідні зміни порівняно з контролем.

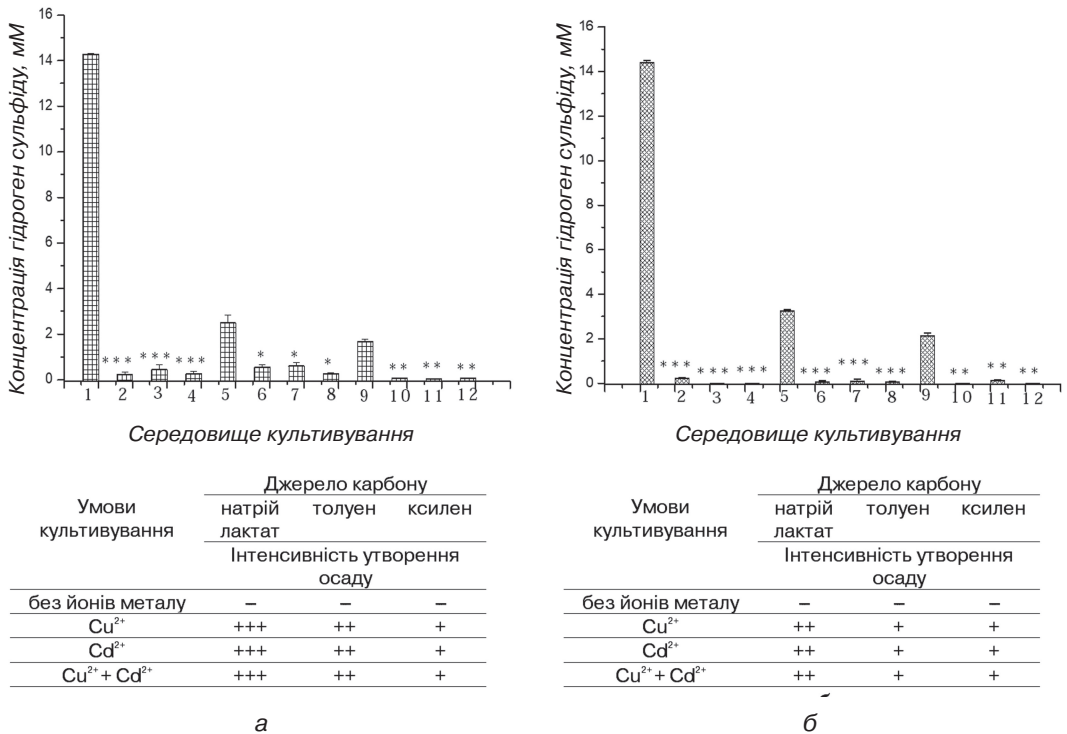


Рис. 4. Нагромадження гідроген сульфїду бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 (а) та *D. desulfuricans* Ya-11 (б) за впливу йонів Cu^{2+} та/або Cd^{2+} : 1 — натрій лактат, 2 — натрій лактат + Cu^{2+} , 3 — натрій лактат + Cd^{2+} , 4 — натрій лактат + Cu^{2+} + Cd^{2+} , 5 — толуен, 6 — толуен + Cu^{2+} , 7 — толуен + Cd^{2+} , 8 — толуен + Cu^{2+} + Cd^{2+} , 9 — ксилен, 10 — ксилен + Cu^{2+} , 11 — ксилен + Cd^{2+} , 12 — ксилен + Cu^{2+} + Cd^{2+} ; «—» — осаду немає, «+» — невелика кількість осаду, «++» — помірний осад, «+++» — інтенсивний осад

Примітки: * — $P < 0,05$ — вірогідні зміни порівняно з контролем; ** — $P < 0,01$ — вірогідні зміни порівняно з контролем; *** — $P < 0,001$ — вірогідні зміни порівняно з контролем.

У середовищі з натрій лактатом внесення йонів металів пригнічувало відновлення SO_4^{2-} бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 у 1,6–1,8 раза, *D. desulfuricans* Ya-11 — у 3,1–5,6 раза, порівняно з контролем (табл. 2). У середовищах з ароматичними вуглеводнями та Cu^{2+} чи Cd^{2+} використання сульфат-йонів бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1 пригнічувалося у 1,3–1,6 раза, бактеріями *D. desulfuricans* Ya-11 — 2,2–2,3 раза. За внесення йонів металів відновлення SO_4^{2-} бактеріями *D. desulfuricans* Ya-11 пригнічувалося більше, ніж бактеріями *Desulfotomaculum* sp. AR1.

За росту бактерій *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11 у сульфатовмісному середовищі з натрій лактатом ви-

явлено понад 14 мМ гідроген сульфїду, з толуеном — 2,5–3 мМ, ксиленом 1,7–2 мМ (рис. 4). За внесення йонів металів концентрація гідроген сульфїду, продукованого бактеріями, становила не більше 0,5 мМ. Це, ймовірно пов'язано з тим, що незначна концентрація гідроген сульфїду, виявленого у середовищах культивування, зумовлена осадженням значної кількості H_2S у формі нерозчинних сульфїдів.

Проникаючи в живі клітини, йони важких металів порушують їх життєдіяльність, проте токсичну дію важкі метали проявляють тільки у вигляді йонів, якщо ж їх перевести в зв'язану форму, то вони втрачають токсичні властивості [13]. Одним з ефективних методів очищення водного середо-

вища від йонів металів є їх осадження за участю речовин різної природи біогенного походження, наприклад гідроген сульфідом, який негативно впливає на довкілля [10; 24]. У разі використання сульфат-відновлювальних бактерій йони металів осаджуються продукованим гідроген сульфідом у вигляді нерозчинних сульфідів металів (див. рис. 4). Для підтвердження цього було проведено якісні реакції на виявлення йонів Cu^{2+} та Cd^{2+} у середовищі культивування перед внесенням суспензії мікроорганізмів та у культуральному середовищі під час культивування бактерій. Перед внесенням суспензії бактерій у середовищі культивування виявлено Cu^{2+} і Cd^{2+} , а після семи діб культивування бактерій у середовищах з різними органічними речовинами та Cu^{2+} і/або Cd^{2+} йонів металів не виявлено.

ВИСНОВКИ

Сульфатвідновлювальні бактерії *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11 можуть нагромаджувати близько 14 мМ

гідроген сульфід за росту у середовищі з натрій лактатом. Продукований бактеріями внаслідок дисиміляційної сульфатредукції гідроген сульфід здатний осаджувати йони важких металів, перетворюючи їх у нерозчинні сульфідні металів. Відповідно, таким чином можна регулювати вміст сірководню у водному середовищі, і, своєю чергою, очищати його від йонів важких металів. Бактерії *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11 можуть рости у середовищі з ароматичними сполуками (толуеном і ксиленом), використовуючи їх як єдине джерело карбону. Внаслідок росту бактерій за цих умов кількість гідроген сульфідів є невисокою і становить 2–3 мМ, проте також може бути використана з метою переведення йонів металів у нерозчинну форму. Відповідно, сульфат-відновлювальні бактерії *Desulfotomaculum* sp. AR1 та *D. desulfuricans* Ya-11 можуть бути перспективними з метою розроблення методів очищення водного середовища від ароматичних сполук, йонів купруму (II) і кадмію (II).

ЛІТЕРАТУРА

- Bernstein A., Adar E., Nejjdat A., Ronen Z. Isolation and characterization of RDX-degrading *Rhodococcus* species from a contaminated aquifer. *Biodegradation*. 2011. Vol. 22(5). P. 997–1005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10532-011-9458-0>.
- Копча Н.М., Садляк А.М., Бокшан О.Я. Фенолоксидазна активність бактерій родів *Pseudomonas* та *Klebsiella*, їх здатність до детоксикації фенолу. *Науковий вісник Ужгородського університету. Сер.: Біологія*. 2010. № 28. С. 19–22.
- Sharma S., Bhattacharya A. Drinking water contamination and treatment techniques. *Applied Water Science*. 2017. Vol. 7. P. 1043–1067. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0455-7>.
- Павленко М.І., Сорока Я.М., Гвоздяк П.І., Кухар В.П. Біодеструкція поліциклічних ароматичних вуглеводнів. *Каталіз і нефтехімія*. 2007. № 15. С. 46–62.
- Безцінний О.О. Відтворення відпрацьованих стічних вод, забруднених іонами важких металів. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 142. С. 45–48.
- Стеценко Д.О., Долін В.В. Важкі метали у ґрунтах радіоактивно забруднених лісових екосистем. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2009. № 1(9). С. 42–47.
- Кривомаз Т.І., Андрусишина І.М. Перший аналіз вмісту важких металів та інших елементів в плодних тілах нівальних міксоміцетів Карпат. *Екологічна безпека та природокористування*. 2015. № 4(20). С. 20–31.
- Сибиркина А.Р. Биогеохимическая оценка содержания тяжелых металлов в листьях кустарниковых растений соснового бора Семипалатинского Прииртышья. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2013. № 11(58). С. 74–77.
- Баран І.М. та ін. Екологічний моніторинг водойм Яворівського сіркового родовища; мікробіологічний контроль. *Довкілля та здоров'я*. 2003. Вип. 27, № 4. С. 56–62.
- Галушка А.А., Перетятко Т.Б., Гудзь С.П. Бактерії циклу сірки та їхня роль у природі. *Вісник Львівського університету. Сер.: біологічна*. 2007. № 43. С. 61–77.
- Гудзь С.П. та ін. Регулювання рівня сульфатів, сірководню та важких металів у техногенних водоймах сульфатвідновлювальними бактеріями. *Мікробіологічний журнал*. 2011. Т. 73, № 2. С. 33–38.
- Перетятко Т.Б., Галушка А.А., Гудзь С.П. Використання металів як кінцевих акцепторів електронів сульфатвідновлювальними бактеріями. *Біологічні студії*. 2009. Т. 3. № 3. С. 131–148. DOI: <https://doi.org/10.30970/sbi.0303.048>.

13. Сушко А.Р., Дуган О.М., Журахівська Л.Р., Марінцова Н.Г. Мікроорганізми як деструктори та індикатори токсичності гетероциклічних сполук. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Сер.: Хімія, технологія речовин та їх застосування. 2016. № 841. С. 249–257.
14. Зінченко І.В. Розроблення інноваційної технології очищення стічних вод від сполук азоту для підвищення екологічної безпеки водних об'єктів. Харків: УКРНДІЕП. 2018. 256 с.
15. Ребрикова П.А., Шидловська О.А., Жолобак Н.М., Мокроусова О.Р. Біотехнологічні аспекти очищення стічних вод підприємств, що переробляють продукти тваринництва. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Т. 24, № 6. С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2018-24-6-7>.
16. Перетятко Т.Б., Гнатуш С.О., Гудзь С.П. Сульфатвідновлювальні бактерії Яворівського сіркового родовища. *Мікробіологічний журнал*. 2006. Т. 68, № 5. С. 84–91.
17. Верхоляк Н.С., Перетятко Т.Б. Морфологічні властивості сульфатвідновлювальних бактерій, виділених із системи очищення стічних вод м. Львова. *Мікробіологія і біотехнологія*. 2018. № 4. С. 19–29. DOI: [http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2018.4\(4\).139440](http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2018.4(4).139440).
18. Postgate J.R. The sulfate-reducing bacteria. 2nd ed. Cambridge: Cambridge Univ. press, 1984. 199 p.
19. Ломницька Я.Ф., Чабан Н.Ф., Кузьма Ю.Б. Лабораторний практикум з аналітичної хімії. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2004. 231 с.
20. Верхоляк Н.С., Перетятко Т.Б. Деструкція толуену та ксилену сульфатвідновлювальними бактеріями. *Екологія та ноосферологія*. 2019. № 30 (2). С. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.15421/031916>.
21. Дудник С.В., Свтушенко М.Ю. Водна токсикологія: основні теоретичні положення та їхнє практичне застосування: моногр. Київ: Вид-во Українського фітосоціологічного центру, 2013. 297 с.
22. Янович Н.Є., Янович Д.О. Роль мікроелементів у життєдіяльності ставкових риб. *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. Гжицького*. 2014. Т. 16, № 2 (59). С. 345–372.
23. Діденко Н.О., Ранський А.П. Вплив комплексних сполук купруму (II), кобальту (II) та цинку з ароматичними і гетероциклічними тіоамідами на посівні властивості деяких сільськогосподарських культур. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. № 2. С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.02.02>.
24. Шкапенко В.В., Мусич О.Г., Дем'янюк О.С., Благініна А.А. Екологічні аспекти біокорозії бетонних конструкцій. *Агроекологічний журнал*. 2019. № 4. С. 119–128. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2019.189470>.

REFERENCES

1. Bernstein, A., Adar, E., Nejidat, A. & Ronen, Z. (2011). Isolation and characterization of RDX-degrading *Rhodococcus* species from a contaminated aquifer. *Biodegradation*, 22(5), 997–1005 [in English].
2. Kopcha, N.M., Sadlyak, A.M. & Bokshan, O.Ya. (2010). Fenoloksydazna aktyvnist bakterii rodiv *Pseudomonas* ta *Klebsiella*, yikh zdatnist do detoksykatsii fenolu [Phenoloxylase activity of bacteria *Pseudomonas* and *Klebsiella* genes, their ability to degradation of phenol]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya Biologiya – Scientific Bulletin of the Uzhgorod University. Series Biology*, 28, 19–22 [in Ukrainian].
3. Sharma, S. & Bhattacharya, A. (2017). Drinking water contamination and treatment techniques. *Applied Water Science*, 7, 1043–1067 [in English].
4. Pavlenko, M.I., Soroka, Ya.M., Gvozdyak, P.I. & Kukhar, V.P. (2007). Biodestruktsiia polityklichnykh aromatychnykh vuhlevodniv [Biological degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons]. *Katalyz y neftekhymiya – Catalysis and petrochemistry*, 15, 46–62 [in Ukrainian].
5. Beztsinnyi, O.O. (2018). Vidtvorennia vidpratsovanykh stichnykh vod, zabrudnenykh ionamy vazhkykh metaliv [Reproduction of wastewater contaminated with heavy metal ions]. *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of cities*, 142, 45–48 [in Ukrainian].
6. Stetsenko, D.O. & Dolin, V.V. (2009). Vazhki metaly u gruntakh radioaktyvno zabrudnenykh lisovykh ekosystem [Heavy metals in soils of radioactively contaminated forest ecosystems]. *Poshukova ta ekolohichna heokhimiia – Exploration and environmental geochemistry*, 1(9), 42–47 [in Ukrainian].
7. Kryvomaz, T.I. & Andrusyshyna, I.M. (2015). Pershyi analiz vmistu vazhkykh metaliv ta inshykh elementiv v plodovykh tilakh nivalnykh miksomitsetiv Karpat [The first analysis of the content of heavy metals and other elements in the fruiting bodies of nival myxomycetes of the Carpathians]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya – Environmental safety and natural resources*, 4(20), 20–31 [in Ukrainian].
8. Sibirkina, A.R. (2013). Biogeochemicheskaya otsenka sodержaniya tyazhelykh metallov v listyakh kustarnikovykh rasteniy osnovnogo bora Semipalatinskogo Priirtyshya [Biogeochemical assessment of the content of heavy metals in the leaves of shrub plants of the pine forest of the Semipalatinsk Irtysh region]. *Aktualnyie problemyi gumanitarnykh i estestvennykh nauk – Actual problems of the humanities and natural sciences*, 11(58), 74–77 [in Russian].
9. Baran, I.M. et al. (2003). Ekolohichniy monitoring vodoim Yavorivskoho sirkovoho rodovyshecha; mikrobiolohichniy kontrol [Ecological monitoring of water reservoirs of Yavorivsky sulfur deposit; microbiological control]. *Dovkilla ta zdorovia – Environment and health*, 27 (4), 56–62 [in Ukrainian].
10. Halushka, A.A., Peretjatko, T.B. & Gudz, S.P. (2007). Bakterii tsyuku sirky ta yikhniya rol u pryrodі [Bacteria of sulphur cycle and their role in the nature].

- Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya biolohichna – Visnyk of Lviv univ. Biological series, 43, 61–77* [in Ukrainian].
11. Gudz, S.P. et al. (2011). Rehuliuвання rivnia sulfatuv, sirkovodniu ta vazhkykh metaliv u tekhnogenykh vodoimakh sulfatvidnovliuvalnymy bakteriyamy [Regulation of sulfates, hydrogen sulfide and heavy metals level in technogenic reservoirs by sulfate-reducing bacteria]. *Mikrobiolohichnyi Zhurnal – Microbiological Journal, 73(2)*, 33–38 [in Ukrainian].
 12. Peretyatko, T.B., Halushka, A.A. & Gudz, S.P. (2009). Vykorystannia metaliv yak kintsevykh akseptoriv elektroniv sulfatvidnovliuvalnymy bakteriyamy [Usage of metals as the terminal electron acceptors by the sulfatereducing bacteria]. *Biolohichni studii – Studia Biologica, 3(3)*, 131–148 [in Ukrainian].
 13. Sushko, A.R., Dugan, A.M., Zhurahivska, L.R. & Marintsova, N.G. (2016). Mikroorhanizmy yak destruktory ta indykatory toksychnosti heterotsyklichnykh spoluk [Microorganisms as a destructors and indicators of toxicity of heterocyclic compounds]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika – Bulletin of Lviv Polytechnic National University, 841*, 249–257 [in Ukrainian].
 14. Zinchenko, I.V. (2018). Rozroblennia innovatsiinoi tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod vid spoluk azotu dlia pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky vodnykh ob'ektiv [Development of innovative technology for wastewater treatment from nitrogen compounds to improve the environmental safety of water bodies]. Kharkiv [in Ukrainian].
 15. Rebrykova, P., Shydlovska, O., Zholobak, N. & Mokrousova, O. (2018). Biotekhnolohichni aspekty ochyshchennia stichnykh vod pidpriemstv, shcho pererobliaiut produkty tvarynnytstva [Biotechnological aspects of wastewater treatment of enterprises that process livestock products]. *Naukovi pratsi NUKHT – Scientific Works of NUFT, 24 (6)*, 42–49 [in Ukrainian].
 16. Peretyatko, T.B., Hnatush, S.O. & Gudz, S.P. (2006). Sulfatvidnovliuvalni bakterii Yavorivskoho sirkovoho rodovysshcha [Sulfate-reducing bacteria from Yavoriv storage lake]. *Mikrobiolohichnyi Zhurnal – Microbiological Journal, 68(5)*, 84–91 [in Ukrainian].
 17. Verkholiak, N.S. & Peretyatko, T.B. (2018). Morfologichni vlastyvyosti sulfatvidnovliuvalnykh bakterii, vydilyenykh iz systemy ochyshchennia stichnykh vod m. Lvo va [Morphophysiological properties of sulfate-reducing bacteria isolated from the system of Lviv wastewater treatment]. *Mikrobiolohiia i biotekhnolohiia – Microbiology and biotechnology, 4*, 19–29 [in Ukrainian].
 18. Postgate, J.R. (1984). *The sulfate-reducing bacteria*. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge [in English].
 19. Lomnytska, Ya.F., Chaban, N.F. & Kuzma, Yu.B. (2004). *Laboratoryni praktykum z analitychnoi khimii [Laboratory workshop on analytical chemistry]*. Lviv [in Ukrainian].
 20. Verkholiak, N.S. & Peretyatko, T.B. (2019). Destruktsiia toluenu ta ksylenu sulfatvidnovliuvalnymy bakteriyamy [Destruction of toluene and xylene by sulfate-reducing bacteria]. *Ekolohiia ta noosferolohiia – Ecology and Noospherology, 30(2)*, 95–100 [in Ukrainian].
 21. Dudnik, S.V. & Yevtushenko, M.Yu. (2013). *Vodna toksykolohiia: osnovni teoretychni polozhennia ta yikhnie praktychne zastosuvannia [Water toxicology: basic theoretical positions and their practical application]*. Kyiv [in Ukrainian].
 22. Yanovych, N.E. & Yanovych, D.O. (2014). Rol mikroelementiv u zhyttiediialnosti stavkovykh ryb [Trace elements role in pond fishes vital functions]. *Naukovi visnyk LNUVMBT im. Gzhytskoho – Scientific bulletin of LNUVMBT named after S.Z. Gzhytsky, 16(2)*, 345–372 [in Ukrainian].
 23. Didenko N.O. & Ranskyi, A.P. (2018). Vplyv kompleksnykh spoluk kuprumu (II), kobaltu (II) ta tsynku z aromatychnymy i heterotsyklichnymy tioamidamy na posivni vlastyvyosti deiakykh silskohospodarskykh kultur [Influence of complex compounds of copper (II), cobalt (II) and zinc with aromatic and heterocyclic thioamides on sowing properties of some crops]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarynoi akademii – Bulletin of Poltava State Agrarian Academy, 2*, 17–23 [in Ukrainian].
 24. Shkapenko, V.V., Musych, O.H., Demianiuk, O.S., & Blahinina, A.A. (2019). Ekolohichni aspekty biokorozii betonnykh konstruksii [Ecological aspects of biocorrosion of concrete structures]. *Ahroekolohichnyi zhurnal – Agroecological journal, 4*, 119–128 [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції журналу 07.08.2020