

Біотехнологічна модель очистки водних середовищ від гідроген сульфідута важких металів на основі використання метаболічної активності сульфат- і сірковідновлювальних бактерій

*Запропоновано біотехнологічну модель очистки водного довкілля від сульфатів, сірки, гідроген сульфідута солей важких металів з використанням бактерій родів *Desulfovibrio* та *Desulfuromonas*. Модель забезпечує високу ефективність (на 100 %) зв'язування іонів важких металів біогенним H_2S за концентрацій 1–1,5 мМ.*

*The biotechnological model of water environment purification is offered from sulfates, sulfur, hydrogen sulfide and heavy metal salts with use of bacteria of *Desulfovibrio* and *Desulfuromonas* genera. A model provides high efficiency (on 100 %) of ions of heavy metals binding by biogenic H_2S at the concentrations of 1–1.5 mM.*

Сульфати і сірка використовуються сульфат- і сірковідновлювальними бактеріями як акцептори електронів при окисненні органічних сполук, у результаті чого утворюється отруйний для живих організмів гідроген сульфід. Значна частина важких металів не включається в природний кругообіг, накопичується в біосфері і зумовлює негативний вплив на екологічну структуру довкілля та людину. Для знешкодження сульфат- і металовмісних стоків найчастіше застосовуються хімічні методи. Оскільки вони малоефективні та енерговитратні, особливо актуальним завданням є розробка нових мікробних біотехнологій зниження вмісту небезпечних забруднювачів у водних екосистемах [1, 2]. Метою роботи було оцінити ефективність потенційного використання сульфат- і сірковідновлювальних бактерій у технологічних процесах очистки вод, збагачених органічними сполуками, від гідроген сульфідута важких металів.

Основною перешкодою на шляху використання бактерій для очистки водних середовищ від забруднювачів є токсичність для них іонів важких металів. Для вивчення впливу $Pb(NO_3)_2$, $ZnCl_2$, $NiCl_2$, $CoCl_2$, $FeCl_2 \cdot 4 H_2O$, $CdCl_2 \cdot H_2O$, $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$, $CuCl_2$ на ріст сульфат- та сірковідновлювальних бактерій клітини інкубували впродовж години з солями металів (0,5–4 мМ) і культивували у середовищі Кравцова-Сорокіна з сульфат-іонами чи сіркою без іонів металів, щоб уникнути утворення у культуральній рідині їх нерозчинних сульфідів. Солі металів за концентрацій 0,5–1,5 мМ не пригнічували ріст *Desulfovibriodesulfuricans* ІМВ К-6 та *Desulfuromonas acetoxidans* ІМВ В-7384. Встановлено мінімальні інгібуючі концентрації солей важких металів для сульфатвідновлювальних та сірковідновлювальних бактерій: $Pb(NO_3)_2$, $NiCl_2$, $CoCl_2$, $CdCl_2 \cdot H_2O$ (2 і 3 мМ), $FeCl_2 \cdot 4 H_2O$, $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$ (3 і 3 мМ), $CuCl_2$, $ZnCl_2$ (3 і 4 мМ). Отже, найбільш токсичними для бактерій виявилися іони плумбуму, нікелю, кобальту та кадмію.

Взаємодія гідроген сульфідута з іонами двовалентних металів, результатом якої є утворення нерозчинних сульфідів металів, є основним способом їх усунення із середовища. Для вивчення рівня зв'язування іонів плумбуму, кадмію, нікелю та кобальту з гідроген сульфідом, продукованим клітинами штамів *D. desulfuricans* ІМВ К-6 та *D. acetoxidans* ІМВ В-7384, бактерії вирощували у середовищі з сульфатами або сіркою у присутності $Pb(NO_3)_2$, $CdCl_2 \cdot H_2O$, $NiCl_2$, та $CoCl_2$ за концентрацій 0,5–4 мМ. Вміст металосульфідів визначали ваговим методом, для цього суміш клітин і сульфідів металів (MeS) зважували, масу сульфідута металу вираховували як різницю між масою суміші та сухих клітин і компонентів середовища. За впливу іонів досліджуваних металів за концентрацій 2–3 мМ рівень утворення бактеріями гідроген сульфідута значно пригнічувався (таблиця). За наявності у середовищі 1–1,5 мМ іонів металів ефективність їхнього зв'язування гідроген сульфідом сягала 100 %. Рівень зв'язування іонів металів, внесених на початку культивування за концентрацій 1,5–2 мМ, утвореним сульфатвідновлювальними бактеріями гідроген сульфідом не перевищував 73,5 %,

сірководновловальними бактеріями –68,7 %, оскільки його кількості виявилось недостатньою для повної взаємодії з іонами металів.

Таким чином, результати проведених досліджень дають підставу говорити про те, що бактерії родів *Desulfovibrio* та *Desulfuromonas* відіграють важливу роль у регулюванні рівня сульфатів, гідроген сульфідів та важких металів у водоймах, які зазнали антропогенного впливу. За наявності у середовищі 1–1,5 мМ іонів плумбуму, кадмію, нікелю та кобальту вони повністю зв'язуються утвореними бактеріями гідроген сульфідом у вигляді нерозчинних сульфідів. Бактерії циклу сульфуру, які здійснюють дисиміліційну сульфат- чи сіркоредукцію, можна успішно використовувати у технологіях, спрямованих на біоремедіацію забруднених токсичними сполуками водних ресурсів.

Таблиця. Вплив солей важких металів на утворення гідроген сульфідів сульфат- та сірководновловальними бактеріями у середовищі з сульфатами або сіркою

Соли металів	Вміст солей, мМ	[S ²⁻], мМ	[MeS], мМ	Рівень зв'язування металу, %	[S ²⁻], мМ	[MeS], мМ	Рівень зв'язування металу, %
Штам		<i>D. desulfuricans</i> IMB K-6			<i>D. acetoxidans</i> IMB B-7384		
Pb(NO ₃) ₂	0	2,44±0,03	-	-	1,42±0,12	-	-
	0,5	2,40±0,05	0,50±0,02	100,0±0,5	1,30±0,13	0,50±0,01	100,0±0,4
	1	2,25±0,01	1,00±0,05	100,0±0,2	1,18±0,14	1,00±0,02	100,0±0,5
	1,5	2,01±0,08	1,50±0,08	100,0±0,4	1,03±0,15	1,02±0,02	68,0±0,3
	2	1,42±0,03	1,41±0,02	70,5±0,5	0,99±0,14	0,98±0,01	49,0±0,1
	2,5	1,03±0,02*	1,02±0,02	40,8±0,7	0,94±0,12	0,94±0,01	37,6±0,4
	3	0,75±0,05*	0,74±0,05	24,7±0,6	0,68±0,11*	0,67±0,01	22,3±0,2
	4	0,63±0,02*	0,61±0,06	15,3±0,2	0,61±0,10*	0,60±0,01	15,0±0,4
CdCl ₂ ·H ₂ O	0	2,44±0,03	-	-	1,42±0,04	-	-
	0,5	2,34±0,05	0,50±0,02	100,0±0,1	1,29±0,01	0,50±0,01	100,0±0,01
	1	2,33±0,06	1,00±0,06	100,0±0,3	1,15±0,01	1,00±0,02	100,0±0,01
	1,5	2,29±0,08	1,50±0,03	100,0±0,5	1,05±0,01	1,03±0,02	68,7±0,03
	2	1,42±0,05	1,42±0,06	71,0±0,4	0,84±0,01	0,83±0,01	41,5±0,02
	2,5	1,18±0,01*	1,17±0,07	46,8±0,6	0,80±0,01	0,80±0,01	32,0±0,02
	3	0,81±0,02*	0,80±0,09	26,7±0,8	0,65±0,02*	0,64±0,02	21,3±0,04
	4	0,79±0,06*	0,77±0,05	19,3±0,5	0,52±0,02*	0,52±0,01	13,0±0,02
NiCl ₂	0	2,44±0,03	-	-	1,43±0,04	-	-
	0,5	2,32±0,06	0,50±0,02	100,0±0,4	1,35±0,05	0,50±0,02	100,0±0,3
	1	2,05±0,09	1,00±0,05	100,0±0,2	1,25±0,03	1,00±0,01	100,0±0,5
	1,5	1,89±0,05	1,50±0,08	100,0±0,7	0,97±0,14	0,97±0,02	64,6±0,1
	2	1,48±0,05	1,47±0,06	73,5±0,7	0,72±0,05*	0,72±0,06	36,0±0,6
	2,5	1,09±0,09*	1,08±0,07	43,2±0,7	0,62±0,01*	0,61±0,03	24,4±0,2
	3	0,79±0,06*	0,76±0,04	25,3±0,4	0,57±0,02*	0,56±0,07	18,7±0,3
	4	0,75±0,04*	0,74±0,05	18,5±0,7	0,51±0,01*	0,50±0,01	12,5±0,5
CoCl ₂	0	2,44±0,03	-	-	1,48±0,10	-	-
	0,5	2,21±0,11	0,50±0,07	100,0±0,3	1,31±0,08	0,50±0,04	100,0±0,1
	1	2,06±0,07	1,00±0,03	100,0±0,6	1,19±0,10	1,00±0,01	100,0±0,1
	1,5	1,95±0,04	1,50±0,02	100,0±0,8	0,92±0,04	0,91±0,07	60,7±0,5
	2	1,29±0,07	1,27±0,05	63,5±0,4	0,83±0,08	0,82±0,08	41,0±0,3
	2,5	1,15±0,04*	1,13±0,06	45,2±0,3	0,64±0,01*	0,63±0,05	25,2±0,7
	3	0,86±0,09*	0,85±0,03	28,3±0,3	0,56±0,02*	0,56±0,03	18,7±0,5
	4	0,81±0,05*	0,80±0,02	20,0±0,2	0,46±0,03*	0,45±0,05	11,3±0,7

Примітка. * p ≤ 0,05

Література

- Гудзь С. П. Регулювання рівня сульфатів, сірководню та важких металів у техногенних водоймах сульфатвідновлювальними бактеріями / С. П. Гудзь, Т. Б. Перетятко, О. М. Мороз, С. О. Гнатуш, І. Р. Клим // Мікробіол. журн. – 2011. – Т. 73, № 2. – С. 33–38.
- Мороз О. М. Утворення гідроген сульфідів сірководновловальними бактеріями за впливу солей важких металів / О. М. Мороз // Вісник Львів. ун-ту. Серія біол. – 2013. – Вип. 61. – С. 154–165.