



ГАВРИЛЮК

Олеся Анатоліївна –
доктор філософії,
в.о. наукового співробітника
відділу біології екстремофільних
мікроорганізмів Інституту
мікробіології і вірусології
ім. Д.К. Заболотного НАН
України

ЗАСТОСУВАННЯ ФІТОБАКТЕРІАЛЬНИХ УГРУПОВАНЬ ДЛЯ БІОРЕМЕДІАЦІЇ ЕКОСИСТЕМ

**За матеріалами наукового повідомлення
на засіданні Президії НАН України
27 грудня 2023 р.**

Доповідь присвячено дослідженню шляхів взаємодії мікроорганізмів та рослин з металами (імобілізація і мобілізація) на прикладі Купруму та можливості росту мікроорганізмів в умовах надвисоких концентрацій (до 1 моль/л) токсикантів. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність застосування фітобактеріальних угруповань (мікроорганізмів та рослин) для біоремедіації екосистем.

Ключові слова: важкі метали, забруднення ґрунтів, фітобактеріальні угруповання, біоремедіація, фіторемедіація.

Важкі метали, зокрема Купрум, є одними з найбільш токсичних і екологічно небезпечних забруднювачів [1]. Загалом найпоширенішими джерелами забруднення металами є підприємства кольорової металургії, наслідки воєнних дій, побутова діяльність людини, промислові стічні води, а також природні родовища металів [2, 3]. Через відсутність методів контролю та знешкодження сполуки металів часто потрапляють у прилеглі екосистеми, зокрема ґрунти та підземні води. Один із таких металів-забруднювачів – це Купрум, який за концентрації вище 20 мг/кг є дуже токсичним для живих організмів у ґрунтах [4].

На сьогодні в Україні найпотужнішим джерелом забруднення металами стають бойові дії, що відбуваються на нашій території внаслідок повномасштабного воєнного вторгнення РФ. Ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, активність військової техніки та авіації призводять до накопичення важких металів у ґрунтах та руйнування агроценозів [5]. Розроблення дієвих методів вилучення Купруму із забруднених екосистем є актуальним завданням науки та промисловості.

Традиційно використовують фізико-хімічні методи очищення від Купруму, такі як цементация, електродіаліз, адсорбція, фотокаталіз, мембранна фільтрація [6]. Однак ці методи є ви-

соковартісними і не забезпечують рівень очищення та відновлення забруднених ґрунтів, достатній для їх подальшої агропромислової експлуатації.

На протипагу фізико-хімічним методам, біологічні методи очищення від сполук токсичних металів є більш економічно вигідними та екологічно безпечними [7]. В останнє десятиліття активно розвиваються такі підходи, як біоремедіація та фіторемедіація. Зокрема, на сьогодні відома вже низка біоремедіаційних методів очищення забруднених ґрунтів.

Біоремедіацію можна здійснювати або *in situ*, тобто безпосередньо в зоні забруднення (біоаугментація), або *ex situ* — віддалено (компостування, ризофільтрація, біостимуляція, мікоремедіація тощо). В останньому випадку спочатку необхідно механічно вилучити забруднені ґрунти із зони екоциду, а потім уже проводити їх очищення та відновлення з використанням мікроорганізмів.

Ефективність біоремедіації залежить від мікроорганізмів, які використовують для очищення ґрунтів. Вони мають бути стійкими до металів у високій концентрації та здатними взаємодіяти з ними (акумулювати [8], відновлювати до нерозчинних сполук [9], осаджувати тощо). Виділення таких мікроорганізмів та дослідження молекулярних і фізіологічних механізмів їх стійкості й взаємодії з небезпечними сполуками металів є важливим етапом розроблення ефективної природоохоронної технології.

Іншим важливим підходом до відновлення забруднених ґрунтів є фіторемедіація. Це окремий, досить розгалужений напрям, що вивчає методи застосування рослин для очищення ґрунтів [10]. На сьогодні вже розроблено цілу низку методів фіторемедіації, які демонструють високу ефективність та безпечність: фітостабілізація, фітоекстракція, фітовипаровування, фітофільтрація та ін.

Наприклад, фітостабілізація — це іммобілізація токсичних сполук, зокрема металів із ґрунтів та ґрунтових вод, рослинними екзотаболітами. При цьому рухомі форми металів перетворюються на малорухомі та нетоксичні,

що знижує ризик їх потрапляння в підземні води й прилеглі екосистеми.

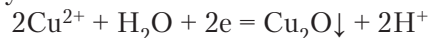
Фітоекстракція являє собою вилучення іонів рухомих сполук металів (рухомих форм) або радіонуклідів із ґрунтів та водоймищ унаслідок їх акумуляції в рослинній біомасі.

З огляду на підвищений рівень техногенного навантаження на природні екосистеми України через ведення активних бойових дій та руйнівні наслідки для агроценозів високого вмісту Купруму в ґрунтах критично важливим є розроблення нових ефективних методів біоремедіації екосистем з використанням фітобактеріальних угруповань.

У відділі біології екстремофільних мікроорганізмів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України розроблено концепцію термодинамічного прогнозування взаємодії мікроорганізмів та рослин зі сполуками металів. Вода має властивості подвійного редокс-буфера, який є стабільним лише в діапазоні стандартних окисно-відновних потенціалів від -414 до $+814$ мВ. Звідси випливає, що дисиміляторний метаболізм мікроорганізмів, а також їх взаємодія зі сполуками Cu, можливі лише в зоні термодинамічної стійкості води, тобто в діапазоні E'_o від -414 до $+814$ мВ.

Ріст мікроорганізмів у присутності окиснених сполук токсичних металів у високих концентраціях і взаємодія з ними теоретично допустимі, якщо редокс-потенціал системи, утвореної металом та його відновленою формою, перебуває в зоні термодинамічної стійкості води. Загальноприйнятою є думка, що метали-окисники токсичні і пригнічують ріст мікроорганізмів навіть за невеликих концентрацій (20–50 мг/л), оскільки утворені ними окисно-відновні системи характеризуються високими значеннями редокс-потенціалу (E_h).

Редокс-потенціал (E'_o) реакції відновлення катіону Cu^{2+}



становить $+440$ мВ при $\text{pH} = 4,0$, тобто E_h реакції відновлення Cu перебуває в зоні термодинамічної стійкості води. Отже, мікробне відновлення катіону Cu^{2+} за його високих концентрацій є теоретично допустимим.

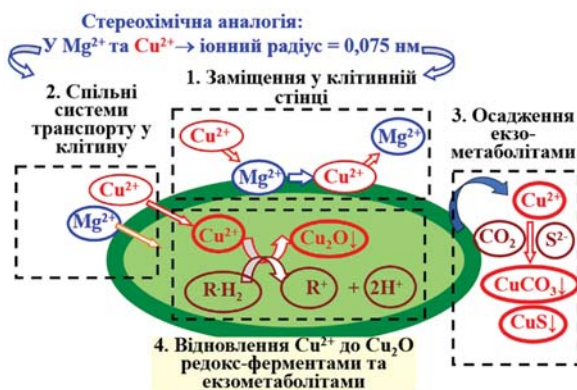


Рис. 1. Термодинамічно обґрунтовані метаболічні шляхи взаємодії мікроорганізмів зі сполуками Купруму

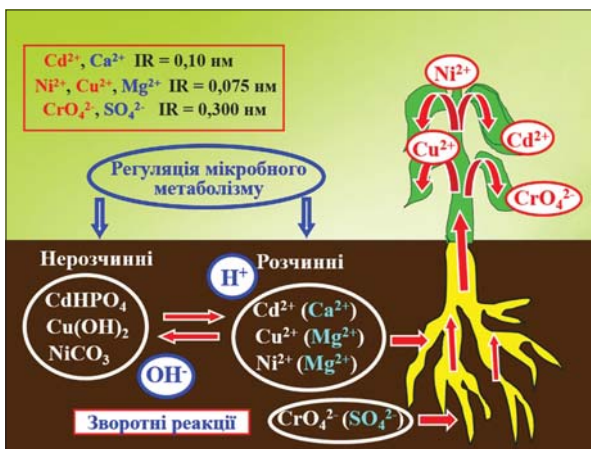


Рис. 2. Загальна схема акумуляції токсичних металів рослинами

Оскільки редокс-потенціал системи, утвореної Cu^{2+} та його відновленою формою Cu_2O , перебуває в межах термодинамічної стійкості води, то допустиме існування мікроорганізмів, стійких до надвисоких концентрацій (до величин порядку 1 моль/л) цього металу-окисника.

З використанням методу термодинамічного прогнозування можна передбачити теоретично допустимі види взаємодії мікроорганізмів та рослин з металами. Термодинамічне прогнозування дозволяє визначити також умови та продукти взаємодії мікроорганізмів і рослин зі сполуками металів.

Розглянемо теоретично допустимі види взаємодії мікроорганізмів зі сполуками металів

на прикладі Купруму (рис. 1). Згідно з термодинамічним прогнозом, мікроорганізми здатні акумулювати Cu^{2+} мікробними клітинами внаслідок заміщення макроелемента Mg^{2+} у клітинній стінці завдяки його стереохімічній аналогії з Cu^{2+} , а також осаджувати сполуки $Cu(II)$ екзо-метаболітами без зміни їх валентного стану (наприклад, у формі $Cu(OH)_2$ або $CuCO_3$) та відновлювати Cu^{2+} до нерозчинного оксиду Cu_2O .

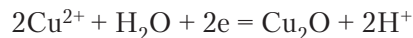
Слід зазначити, що стереохімічна аналогія — це рівність або близькість іонних радіусів. Так, іонні радіуси Cu та Mg близькі і становлять ~0,075 нм. Акцепторні й транспортні системи мікроорганізмів та рослин «помиляються» і поглинають токсичний катіон Cu^{2+} разом із необхідним макроелементом Mg^{2+} . Зауважимо, що макроелементи — це іони, необхідні для метаболізму як мікроорганізмів, так і рослин, зокрема K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- та ін.

Одним з ефективних видів іммобілізації розчинних сполук Купруму є мікробне відновлення $Cu(II)$ до нерозчинного $Cu(I)$ у формі оксиду Cu_2O . Метаболічно активні мікроорганізми є донорною системою, а високопотенціальні сполуки Cu^{2+} — акцепторною системою, тому при окисненні органічних сполук мікроорганізми відновлюють $Cu(II)$.

З огляду на рівняння Гіббса

$$\Delta G_o' = -nF(E'_{o \text{ акцептор } e} - E'_{o \text{ донор } e})$$

для анаеробних мікроорганізмів різниця редокс-потенціалів між донорною та акцепторною системами реакцій



становить -41,01 ккал/моль.

Очевидно, що ефективність відновлення металу пропорційна різниці потенціалів між акцепторною і донорною системами. Звідси випливає, що мікроорганізми, які зменшують E_h до низьких значень, здатні з максимальною ефективністю відновлювати Cu^{2+} . Відомо, що анаеробні воденьсинтезувальні (або метаногенні) бактерії створюють найнижчий окисно-відновний потенціал у середовищі культивування ($E_o' = -414$ мВ), а отже, є найбільш ефективними для мікробного відновлення Cu^{2+} .

Очевидно, що різниця потенціалів у 889 мВ між акцепторною (Cu^{2+}) та донорною (мікроорганізми) системами забезпечить якнайшвидше відновлення сполук Cu^{2+} до нерозчинного Cu_2O , а тому відновлення Cu^{2+} низькопотенціальними облігатними анаеробами має бути швидким та ефективним.

Протилежним видом взаємодії є мобілізація (розчинення) нерозчинних сполук Cu мікробними екзометаболітами (органічними кислотами). Мікроорганізми, які здатні до мобілізації металів у ґрунтах, є перспективними для біоремедіації ґрунтів, оскільки метали в ґрунтах перебувають частково у водонерозчинній формі. Збільшення рухливості металів у ризосфері рослин підвищуватиме ефективність їх акумуляції рослинами.

На рис. 2 показано, як відбувається трансформація металів у біогеоценозах за участі рослин. Після потрапляння в ґрунт розчинні сполуки металів частково випадають в осад завдяки взаємодії з ґрунтовими компонентами. Тому сполуки металів у ґрунті можуть бути нерозчинними (карбонати, фосфати тощо) або сорбованими на неорганічних поверхнях твердої фази ґрунту.

Рослини, як і мікроорганізми, здатні накопичувати (акумулявати) іони токсичних металів разом із корисними мікро- та макроелементами. У рослин домінуючим шляхом взаємодії є транспорт іонів металів або їх хелатованих сполук у тканини рослин. Нижчі і вищі рослини здатні мобілізувати сполуки Cu , оскільки, як і мікроорганізми, вони синтезують органічні кислоти (оцтову, малонову, лимонну, молочну, фумарову та α -кетоглутарову) [11].

Мікробні угруповання першими контактують і взаємодіють з металами, що потрапляють у біотопи. В анаеробних умовах мікроорганізми синтезують органічні кислоти (хелатори металів), які збільшують рухливість Cu в ґрунтах і його активний транспорт у рослинах. Оскільки мікроорганізми більш активно мобілізують нерозчинні сполуки Cu , рослини в подальшому можуть легко вилучати їх із ґрунтів після мобілізації мікроорганізмами.

Отже, термодинамічне прогнозування дозволяє теоретично обґрунтувати можливі ефектив-

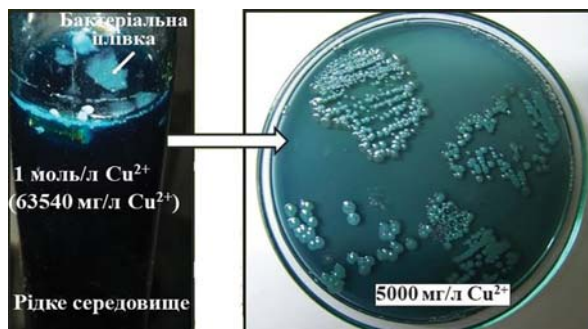


Рис. 3. Надвисока стійкість ґрунтових мікроорганізмів до розчинних сполук Купруму (1 моль/л Cu^{2+})

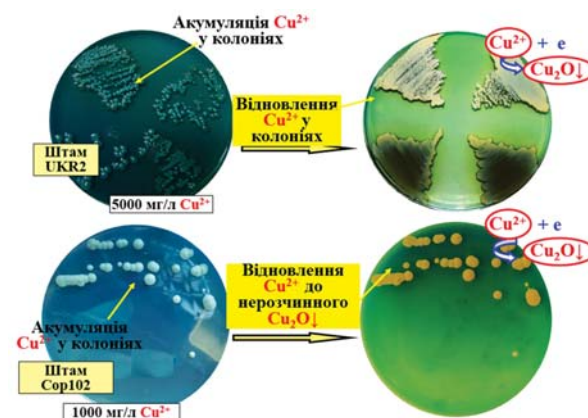


Рис. 4. Таксономічне положення надстійких мікроорганізмів та їх взаємодія зі сполуками Купруму

ні шляхи ремедіації забруднених металами екосистем з використанням мікроорганізмів та рослин — акумуляція в клітинах, іммобілізація (осадження або відновлення до нерозчинних сполук) та мобілізація (розчинення осадів металів органічними кислотами).

Наступним етапом було експериментальне підтвердження термодинамічного прогнозу в лабораторних та польових умовах. Ґрунтуючись на теоретичних положеннях, у відділі біології екстремофільних мікроорганізмів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України було виділено надстійкі до Cu бактерії (рис. 3).

Ці бактерії були не лише стійкими до катіону Cu^{2+} , а й взаємодіяли з ним — накопичували в клітинах та відновлювали до нерозчинного і нетоксичного оксиду $\text{Cu}_2\text{O}\downarrow$ (рис. 4).

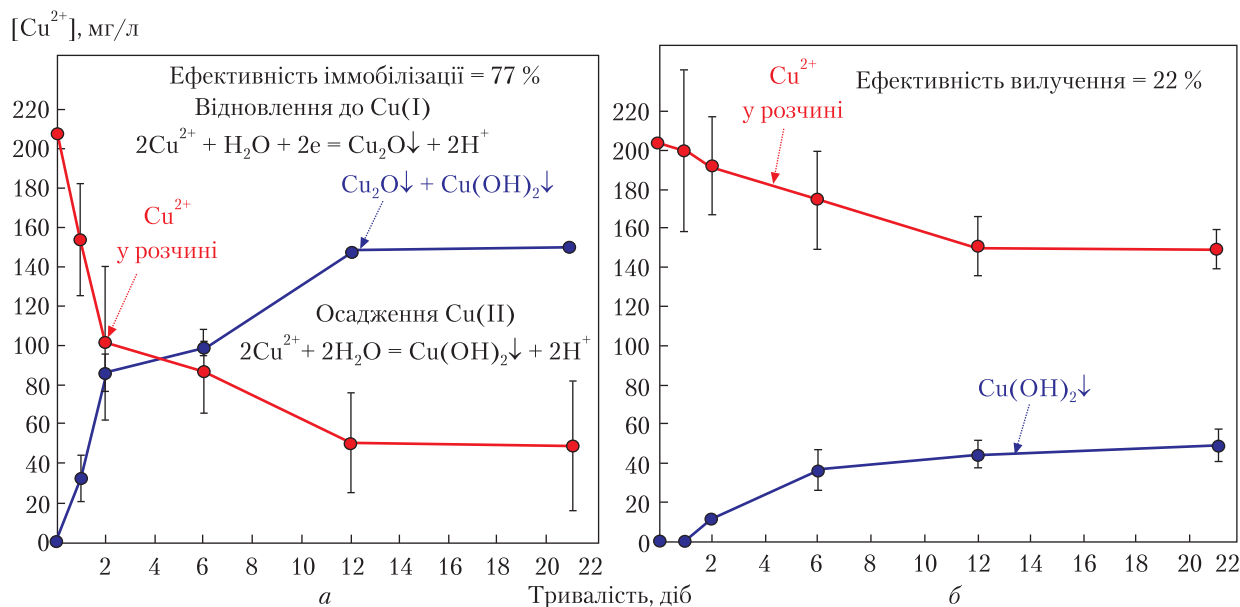


Рис. 5. Іммобілізація (а) та мобілізація (б) сполук Купруму штамом *Pseudomonas lactis* UKR1

З різноманітних екосистем було виділено аеробні та факультативно анаеробні хемоорганотрофні купрумрезистентні штами: UKR1 і UKR2 – з чорноземного ґрунту, UKR3 – з арктичного ґрунту з архіпелагу Сальбард, UKR4 – з антарктичного ґрунту з о. Галіндез, Сор101 – з глини печери «Атлантида», Сор102 – з ґрунту Еквадору, Сор99 – з глини печери «Оптимістична», Сор41 – з контамінованого Купрумом ґрунту, Сор98 – з піску Мертвого моря.

За комплексом морфолого-культурних, фізіолого-біохімічних властивостей та на основі результатів філогенетичного аналізу бактерії було ідентифіковано як *Pseudomonas lactis* UKR1, *P. panacis* UKR2, *P. veronii* UKR3, *P. veronii* UKR4, *Pantoea agglomerans* Сор101, *Bacillus mycoides* Сор102, *B. megaterium* Сор99, *B. velezensis* Сор41, *Staphylococcus succinus* Сор98.

Встановлено, що купрумрезистентний штам *Pseudomonas lactis* UKR1 здатен взаємодіяти з Cu(II) усіма термодинамічно обґрунтованими шляхами. Штам може як накопичувати Cu^{2+} у клітинах без зміни його валентного стану, так і відновлювати цитратний комплекс Cu^{2+}

до нерозчинного, а отже, нетоксичного оксиду $\text{Cu}_2\text{O}\downarrow$.

Такі властивості штаму, як накопичення та відновлення Купруму, є підґрунтям для розроблення нових природоохоронних біотехнологій очищення стічних вод та ґрунтів від сполук Cu. Термодинамічне обґрунтування шляхів трансформації сполук Cu показало, що мікроорганізми здатні мобілізувати та іммобілізувати Купрум. Іммобілізація можлива шляхом відновлення розчинного Cu(II) до нерозчинного Cu(I) та осадження сполук Cu без зміни його валентного стану у вигляді гідроксидів та карбонатів (рис. 5). Визначальною умовою іммобілізації розчинних сполук Cu(II) були термодинамічні показники – рН і редокс-потенціал, які змінювалися при регулюванні метаболізму мікроорганізмів.

У разі росту в середовищі LB з глюкозою ефективність іммобілізації Cu(II) становила 77 %: в осаді перебувало 72 % Cu(II), у клітинах – 5 %, у розчині – 23 %.

При змінненні умов культивування той самий штам *P. lactis* UKR1 мобілізував сполуки Купруму. Відповідно до термодинамічного прогнозу, сполуки Cu(II) стабільні в нерозчин-

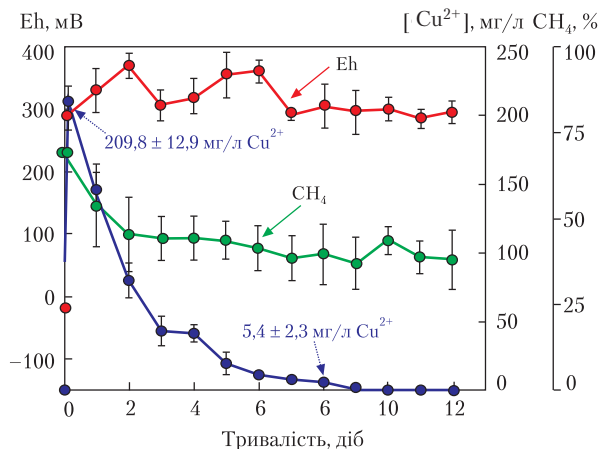


Рис. 6. Іммобілізація Cu^{2+} метаногенним мікробним угрупованням при зброджуванні біомаси водних рослин *Pistia stratiotes*

ному стані за $\text{pH} \geq 4,6$. Було розраховано, що в разі зниження pH до значень, менших за 4,6, нерозчинний гідроксид $\text{Cu}(\text{OH})_2\downarrow$ має переходити в розчинну форму Cu^{2+} .

Для експериментального підтвердження можливості мобілізації штаму UKR1 культивували за присутності $\text{Cu}(\text{OH})_2\downarrow$, а єдиним джерелом вуглецю та енергії була глюкоза. При споживанні глюкози як субстрату мікроорганізми синтезували органічні кислоти та знижували pH , що приводило до мобілізації $\text{Cu}(\text{OH})_2\downarrow$. За таких умов було мобілізовано 52 % Cu (48 % залишилося у формі осаду).

Отримані результати підтверджують можливість регуляції мікробного метаболізму з використанням термодинамічного прогнозу.

Згідно з термодинамічним прогнозом, найбільш ефективно іммобілізація металів відбувається шляхом відновлення за умови істотної різниці між донорною (мікроорганізми) та акцепторною (метал-окисник) системами, а отже, найбільш ефективно відновлення металів має здійснюватися низькопотенціальними obligatно анаеробними мікроорганізмами. Це положення було експериментально підтверджено на прикладі метаногенного мікробного угруповання. Було показано, що метаногенне мікробне угруповання повністю (з ефективністю 100 %) іммобілізувало Купрум у процесі

Рис. 7. Акумуляція $\text{Cr}(\text{VI})$ рослинами *Nicotiana tabacum* L.:
листя — 70 %;
стебла — 13 %;
корені — 17 %;
загальний баланс — 5,2 г $\text{Cr}(\text{VI})/\text{кг}$ рослин через 30 дів



анаеробного зброджування біомаси інвазивних рослин (водяного салату) (рис. 6). Швидке та ефективне вилучення Cu^{2+} з культуральної рідини зумовлено одночасними процесами відновлення (завдяки значній різниці редокс-потенціалів середовища та розчину металу) та осадження іонів $\text{Cu}(\text{II})$ сірководнем у формі сульфідів $\text{CuS}\downarrow$. Тривалість повної іммобілізації становила всього 10 дів.

Зброджування біомаси рослин за присутності високих концентрацій Cu^{2+} свідчить про можливість створення універсальних природоохоронних біотехнологій замкнутого циклу. З використанням таких біотехнологій можна не лише досягти ефективного вилучення токсичних металів з водою та ґрунті, а й отримати енергоносії — водень або метан.

У відділі біології екстремофільних мікроорганізмів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України експериментально підтверджено також можливість акумуляції токсичних металів рослинами з подальшим зброджуванням біомаси таких рослин-фі-

торемедіантів для отримання біогазу. Так, було показано, що польові трави *Agrostis capillaris* L., *Festuca pratensis* Huds та *Poa pratensis* L. і рослини тютюну звичайного *Nicotiana tabacum* L. ефективно вилучають з ґрунтів розчинні сполуки Cu, Cr, Co, Ni та Cd (рис. 7). Рослини акумулювали іони металів у стеблах, коренях, але найбільше — у листі внаслідок стереохімічної аналогії металів і макроелементів. Біомасу таких рослин-фіторемедіантів можна використовувати як цінний субстрат для отримання біогазу та концентрату металів у процесі зброджування рослин мікроорганізмами.

Було продемонстровано високу ефективність мікробного зброджування біомаси рослин-фіторемедіантів: полину, кропиви, амброзії та золотарника. При цьому одночасно досягаються дві мети: утилізація забруднених рослинних відходів та синтез енергоносія (вихід CH_4 становив понад 50 л/кг біомаси рослин).

Отже, ми продемонстрували перспективність створення комбінованих природоохоронних біотехнологій біоремедіації та фіторемедіації забруднених екосистем з одночасним отриманням енергоносіїв.

За результатами виконаних робіт можна зробити такі висновки.

1. Методом термодинамічного прогнозування на прикладі Купруму теоретично обґрунтовано всі види взаємодії мікроорганізмів та рослин з металами, що забезпечують знешкодження забруднювачів.

2. За умови регуляції метаболізму мікроорганізми та рослини здатні до іммобілізації розчинних сполук металів, тобто до перетворення їх у нерозчинні, а отже, нетоксичні й біологічно неактивні сполуки (наприклад, $\text{CuS}\downarrow$), або до вилучення металів з ґрунтів завдяки мобілізації нерозчинних сполук цих металів та накопиченню їх у рослинах.

3. Підтверджено високу ефективність зброджування біомаси рослин-фіторемедіантів як способу знешкодження металів, ремедіації ґрунтів та синтезу енергоносіїв.

4. Отримані закономірності взаємодії мікроорганізмів та рослин зі сполуками металів є підґрунтям для створення нових біоремедіаційних технологій (очищення стічних вод та ґрунтів) з одночасним отриманням енергоносіїв — водню та метану.

REFERENCES

1. Abraham M.R., Susan T.B. Water contamination with heavy metals and trace elements from Kilembe copper mine and tailing sites in Western Uganda; implications for domestic water quality. *Chemosphere*. 2016. **169**: 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.077>
2. Flemming C.A., Trevors J.T. Copper toxicity and chemistry in the environment: a review. *Water Air Soil Pollution*. 1989. **44**(1–2): 143–158. <https://doi.org/10.1007/BF00228784>
3. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*. 2022. **837**: 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>
4. Husak V. Copper and copper-containing pesticides: metabolism, toxicity and oxidative stress. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University*. 2015. **2**(1): 38–50. <https://doi.org/10.15330/jpnu.2.1.38-50>
5. Wenning R.J., Tomasi T.D. Using US Natural Resource Damage Assessment to understand the environmental consequences of the war in Ukraine. *Integrated Environmental Assessment and Management*. **19**: 366–375. <https://doi.org/10.1002/ieam.4716>
6. Al-Saydeh S.A., El-Naas M.H., Zaidi S.J. Copper removal from industrial wastewater: A comprehensive review. *J. Ind. Eng Chem*. 2017. **56**: 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026>
7. Cydzik-Kwiatkowska A., Zielińska M. Bacterial communities in full-scale wastewater treatment systems. *World J. Microbiol. Biotechnol*. 2016. **32**(4): 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2012-9>
8. Andrezza R., Pieniz S., Wolf L., Lee M.K., Camargo F.A.O., Okeke B.C. Characterization of copper bioreduction and biosorption by a highly copper resistant bacterium isolated from copper-contaminated vineyard soil. *Sci. Total Environ*. 2010. **408**(7): 1501–1507. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.12.017>
9. Volentini S.I., Farias R.N., Rodríguez-Montelongo L., Rapisarda V.A. Cu(II)-reduction by *Escherichia coli* cells is dependent on respiratory chain components. *BioMetals*. 2011. **24**(5): 827–835. <https://doi.org/10.1007/s10534-011-9436-3>

10. Rasool F.U., Ahmad L., Hassan A., Iqbal S., Sofi M.A. Phytoremediation: An Effective Way to Treat Heavy Metal Contamination. A Review. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2023. **42**(47): 92–99. <https://doi.org/10.9734/cjast/2023/v42i474320>
11. Tripathi D.K., Singh V., Chauhan D., Prasad S., Dubey N.K. Role of macronutrients in plant growth and acclimation: recent advances and future prospective. In: Ahmad P., Wani M., Azooz M., Phan Tran L.S. (eds) *Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes*. Springer, New York, 2014. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8824-8_8

Olesia A. Havryliuk

*D.K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2815-3976>

APPLICATION OF PHYTOBACTERIAL COMMUNITIES FOR BIOREMEDIATION OF ECOSYSTEMS

According to the materials of report at the meeting
of the Presidium of the NAS of Ukraine, December 27, 2023

Currently, the most powerful source of metal pollution is the hostilities taking place on the territory of Ukraine as a result of Russia's full-scale invasion. Rocket, artillery and mortar attacks, as well as the activity of military equipment and aviation led to the accumulation of heavy metals in the soil and the degradation of agrocenoses. The development of effective methods of metals removal from polluted ecosystems is an urgent task of science and industry. The report deals with study of the concept of thermodynamic prognosis of the interaction of microorganisms and plants with metal compounds, microbial immobilization and mobilization of metals on the example of copper, accumulation of metals by phytoremediant plants and their anaerobic degradation with energy carriers production. The approach is based on the thermodynamic prognosis to substantiate the optimal pathway of microorganisms and plants interaction with metals. Thermodynamic prognosis was used to determine the conditions and products of the interaction of microorganisms and plants with metal compounds. According to the thermodynamic prognosis the types of interaction of microorganisms with metals (on the example of copper) were clarified. Microorganisms were able to accumulate Cu^{2+} in microbial cells as a result of replacing the macroelement Mg^{2+} (stereochemical analogy of metals and macroelements), precipitate copper compounds without changing their valence state, and reduce Cu^{2+} to the insoluble oxide of monovalent copper Cu_2O . The postulates of the thermodynamic prognosis were experimentally confirmed in laboratory conditions. Bacteria resistant to soluble Cu(II) compounds were isolated at the Department of Biology of Extremophilic Microorganisms of the D.K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the National Academy of Sciences of Ukraine. They were not only resistant to metals, but also interacted with them – accumulated in cells and reduced to insoluble and non-toxic oxide Cu_2O . *Pseudomonas lactis* UKR1 copper-resistant strain was studied. Strain was able to immobilize and mobilize copper compounds under the regulation of microbial metabolism. According to the thermodynamic prognosis, the most effective immobilization of metals should occur through reduction under conditions of significant difference between the donor (microorganisms) and acceptor (metal-oxidizer) systems. As a result, the most effective reduction of metals should be carried out by low-potential strict anaerobic microorganisms. This assumption was experimentally confirmed on the example of methanogenic microbial community. It was shown that the methanogenic microbial community completely (with 100% efficiency) immobilized copper during the anaerobic degradation of invasive plants biomass (water lettuce). The high efficiency of microbial degradation of phytoremediant plant biomass (grasses, tobacco, wormwood, nettle, ragweed, and goldenrod) with biogas synthesis has already been demonstrated at the Department of Biology of Extremophilic Microorganisms. Thus, the availability of development of combined environmental biotechnologies of bioremediation and phytoremediation of polluted ecosystems with simultaneous production of energy carriers – hydrogen and methane was theoretically substantiated and experimentally confirmed.

Keywords: heavy metals, soil pollution, phytobacterial communities, bioremediation, phytoremediation.

Cite this article: Havryliuk O.A. Application of phytobacterial communities for bioremediation of ecosystems. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (2): 94–101. <https://doi.org/10.15407/visn2024.02.094>