

О.Б. ТАШИРЕВ

АНТАРКТИДА – МІКРОБНІ ЦЕНОЗИ, ЕКОСИСТЕМИ ТА БІОРОЗВІДКА

Наукове повідомлення на засіданні Президії НАН України

1 лютого 2012 року

Географічна ізольованість континенту Антарктида і прилеглої до нього острівної зони (Антарктики), озонова діра та пов'язаний з нею високий рівень сонячної активності, геохімічна специфіка порід, особливий температурний режим сформували в цьому регіоні унікальний світ екстремофільних мікроорганізмів.

Відмітною, дуже характерною ознакою Антарктики є майже повна відсутність антропогенного й техногенного впливу на екосистеми (принаймні порівняно з усіма іншими континентами). Тому в Антарктиці, де сконцентровано широкий спектр екстремальних факторів, можна вивчати сформовану природою стійкість мікробних екосистем (ценозів) до цих факторів.

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України ще в 2001 р. розпочав фундаментальні дослідження з комплексного вивчення структури та функцій антарктичних мікробних екосистем (ценозів). Більшість досліджень було виконано відділом біології екстремофільних мікроорганізмів (д.т.н. О.Б. Таширев). Відділ загальної та ґрунтової мікробіології брав участь у роботах, пов'язаних із загальною характеристикою антарктичних ґрунтових мікроорганізмів (чл.-кор. НАН України Г.О. Іутинська), а відділ антибіотиків — у вивченні явища антибіозу (д.м.н. Л.В. Авдеева). Під час планування мікробіологічних досліджень в Антарктиці ми спиралися на системний підхід,

закладений класиками загальної, геологічної, водної та ґрунтової мікробіології, такими як С.М. Виноградський, Б.Л. Ісаченко, С.І. Кузнецов, Є.М. Мішустін, Г.О. Заварзін, Л.Й. Рубенчик і К.І. Андреюк.

Виявлено конвергентність взаємодії антарктичних мікроорганізмів і рослин з металами, а також доведено плазмідну природу стійкості цих мікроорганізмів до металів (Н.А. Матвеева, Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України). Систематику та біогеографічний опис ландшафтів здійснено к.г.н. В.П. Усенком за консультаційної підтримки акад. НАН України П.Ф. Гожика (Інститут геологічних наук НАН України). Геодезичною фірмою «ЕСОММ» (Е.С. Серединін і Д.О. Мизін) проведено топографічну зйомку локальних дослідницьких полігонів і створено стереометричну 3D-модель пошарового розподілу мікробних ценозів у типових антарктичних ландшафтах.

Проведені фундаментальні дослідження дають змогу отримати відповідь на низку стратегічно важливих питань, таких як вивчення закономірностей адаптації мікроорганізмів до широкого спектру екстремальних факторів антарктичного довкілля, дослідження біорізноманіття антарктичних мікроорганізмів і роль мікробних ценозів у глобальних біогеохімічних циклах елементів і формуванні їх векторних потоків.

Проте фундаментальні дослідження в будь-якому напрямі, у тому числі і в антарк-

тичній мікробіології, нерозривно пов'язані з прикладними дослідженнями, які мають бути завершені промисловим впровадженням. Це методологічне положення сформулював ще Луї Пастер у 1871 р.: «Ні, тисячу разів ні, не існує жодної категорії наук, якій можна було б дати назву прикладних наук. Існують *науки та застосування наук*, пов'язані між собою як плід і дерево, що породило його!»

Саме тому ми поєднали суто фундаментальні дослідження екстремальних мікробних ценозів з прикладним напрямом досліджень — *антарктичною біорозвідкою*.

Що таке антарктична біорозвідка? За офіційним визначенням Science Committee Antarctic Research (SCAR) «Біорозвідка — це накопичення біологічного матеріалу й аналіз його матеріальних властивостей; його молекулярного, біохімічного та генетичного вмісту з метою розроблення комерційного продукту; пошук цінних хімічних сполук і генетичного матеріалу рослин, тварин і мікроорганізмів». Є й лаконічніше визначення: «Біологічна розвідка — це дослідження живих організмів, що трапляються в природних умовах, з погляду їх комерційної цінності як генетичних та біохімічних ресурсів».

Проаналізуємо, як фундаментальні дослідження мікробних ценозів Антарктики пов'язані з біорозвідкою та перспективами подальшого промислового використання антарктичних мікроорганізмів.

Антарктичні ландшафтні структури та наявні в них мікробні ценози є численними й різноманітними. До них належать кріоценози (водоростево-бактеріальні асоціації льодовиків), мікробні ценози ґрунтів, озер, різних лишайників, фітофлора мохів і злакових рослин (*Deschampsia antarctica* і *Colobanthus quitensis*) тощо. На ці екосистеми діє комплекс екстремальних факторів, таких як інтенсивне ультрафіолетове випромінювання, потужні ураганні вітри, різкі перепади температур і пов'язані з ними цикли «заморожування-відтавання», «висушування-зволоження». Мікробні ценози зазнають ушко-

джувальної дії токсичних металів, які вилугуюються з вивержених порід і залучаються в біогеохімічні цикли. Нерівномірний розподіл органічних речовин спричинює яскраво виражене явище антибіозу. Антибіоз проявляється як у синтезі антибіотиків, так і у стійкості до них мікроорганізмів.

На всі антарктичні екосистеми певною мірою впливають зазначені екстремальні фактори. Проте максимальної і одночасної дії всіх факторів зазнають мікробні ценози антарктичних кліфів. Кліфи — вертикальні скелі заввишки від 20 до 150 м — досить поширений структурний ландшафт на північно-західному узбережжі Антарктиди і прилеглих островах. На відміну від усіх інших екосистем мікробні ценози кліфів практично ніколи не вкриваються снігом, який захищає від екстремальних факторів, і тому мікроорганізми безперервно зазнають дії УФ-випромінювання, токсичних металів, що входять до складу скельних порід, і змушені жорстко конкурувати за органічні речовини, що дуже нерівномірно розподілені на кліфах. Такі особливості антарктичних кліфів було виявлено після фундаментальних системних восьмирічних досліджень структури антарктичних мікробних ценозів. Тому останні два роки ми вивчали переважно екстремофільні ценози саме антарктичних кліфів.

На біогеографічному полігоні на о. Галіндез поблизу української антарктичної станції «Академік Вернадський» було закладено локальний полігон Скалодром-2. Це вертикальний кліф заввишки 10–12 м, а його рельєф має елементи з від'ємними кутами нахилу. Навіть у дуже сніжні зими Скалодром завжди вільний від снігу і тому є ідеальним об'єктом для довготривалого моніторингу з вивчення стійкості мікробних ценозів до дії комплексу екстремальних факторів.

На Скалодромі виділено два вертикальних профілі, а на них — 12 фіксованих точок довготривалого моніторингу. Завдяки геодезістам фірми «ЕКОММ» проведено GPS-зйомку і на її основі створено стереометричну 3D-модель Скалодрому. Зі зразків



На локальному полігоні Скалодром-2

Скалодрому ізолювано (за відсутності екстремальних факторів) мікроорганізми, що домінують у кліфах. В подальшому 10 типових штамів було досліджено з метою отримання кількісних показників їх стійкості до таких екстремальних факторів, як УФ-випромінювання, найбільш токсичні метали (Hg^{2+} , Cu^{2+} , CrO_4^{2-} , Co^{2+} і Ni^{2+}) і широкий спектр антибіотиків, що ушкоджують цитоплазматичну мембрану та пригнічують синтез білків. Крім того, вивчено здатність антарктичних мікроорганізмів до антибіотичної активності, тобто синтезувати антибіотики, які пригнічують тест-культури типових умовно-патогенних бактерій.

Під час кількісного обліку хемоорганотрофних мікроорганізмів Скалодрому було виявлено велику кількість пігментованих мікроорганізмів, щонайменше на порядок вищу, ніж у інших мікробних ценозах (грунти, мохи, озерні мули тощо). Пігментовані мікроорганізми представлені бактеріями, дріжджами та мікроміцетами, а їхня кількість у зразках кліфу сягала 10^6 – 10^8 клітин у 1 г зразка. Пігментовані мікроорганізми мали широку кольорову «палітру»: червоні, рожеві, чорні, жовті, помаранчеві тощо.

Відомо, що пігменти захищають мікроорганізми від ушкоджувальної дії УФ-радіації, і тому пігментація мікроорганізмів кліфів є прогнозованою адаптивною реакцією на високий рівень інсоляції. Захисна дія пігмен-

тів проявилась у стійкості антарктичних мікроорганізмів до високих доз УФ-випромінювання. Особливо стійкими виявились пігментовані дріжджі, які витримували дози навіть до 2000 Дж/м^2 (при $\text{LD}_{99,99} = 1200$ – 1500 Дж/м^2). Цілком закономірно, що за такої стійкості до УФ-радіації мікроорганізми містять пігменти у високих концентраціях. Так, ізолювані з кліфів дріжджі мають інтенсивно-червоне та вугільно-чорне забарвлення, яке визначається високим вмістом біологічно активних речовин (відповідно каротиноїдів і меланінів). Під час дослідження дріжджів, які містять меланіни, з'ясувалося, що вони є стійкими до високих концентрацій (сотні міліграмів у 1 л) дуже токсичних металів — Co^{2+} , Ni^{2+} і Cu^{2+} .

Типові штами Скалодрому виявили високий рівень стійкості до токсичних металів. Максимально допустимі концентрації металів для цих штамів становили 50 мг/л Hg^{2+} , 150 мг/л Co^{2+} , $1250 \text{ мг/л Cu}^{2+}$, $2000 \text{ мг/л Ni}^{2+}$ і навіть $20000 \text{ мг/л Cr(VI)}$. Однак деякі типові штами, ізолювані з інших екосистем (у тому числі кліфів), виявили ще вищий рівень стійкості до найбільш токсичних металів. Так, численні штами росли за наявності 500 мг/л Cd^{2+} і $1000 \text{ мг/л Cu}^{2+}$, а деякі колекційні штами (В3201 – В 3210) – стійкі до металів у концентрації 500 мг/л Hg^{2+} , $1000 \text{ мг/л Co}^{2+}$, $2000 \text{ мг/л Ni}^{2+}$, $2500 \text{ мг/л Cu}^{2+}$. Сенсаційною є здатність до росту трьох штамів за концентрації Cr(VI) , що дорівнює 60000 мг/л у перерахунку на катіон металу. Таку високу стійкість до металів і значне поширення металорезистентних мікроорганізмів у екосистемах Антарктики показано вперше. Слід зауважити, що для більшості ґрунтових, водних та інших мікроорганізмів екосистем України і Європи токсичні або навіть бактерицидні концентрації Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} та інших металів становлять 10 – 20 мг/л іонів металу, а для Hg^{2+} – навіть $0,5$ – 1 мг/л .

Отже, під час дослідження стійкості мікробних ценозів до екстремальних факторів ми вперше показали, що антарктичні мікроорганізми є полірезистентними до широкого спектру найбільш токсичних металів (Hg^{2+} ,

Cu^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} і CrO_4^{2-}) у концентраціях, на 2–3 порядки вищих за бактерицидні для більшості ґрунтових, водних та інших мікроорганізмів. Ці дані отримано стосовно так званої полірезистентності *першого порядку** (стійкість до металів за умови, що в кожному варіанті досліду в мікробній культурі наявний тільки один метал). Більшість дослідників обмежується вивченням саме такої полірезистентності. Але відомо, що одночасна наявність навіть двох або більшого числа металів призводить до багатократного підвищення їхньої токсичності. Тому ми дослідили також полірезистентність *другого порядку*, тобто здатність культур мікроорганізмів рости за наявності двох або більшого числа металів у живильному середовищі. Наприклад, антарктичні мікроорганізми здатні до росту за наявності трьох металів у таких концентраціях: по 100 мг/л Hg^{2+} і Cr(VI) та 500 мг/л Cu^{2+} . Хром(VI) є сильним металом-окисником, а Hg^{2+} і Cu^{2+} — металами комбінованої дії (метали-окисники й одночасно метали-замісники). Отже, антарктичні мікроорганізми на рівні полірезистентності другого порядку є стійкими до високих концентрацій металів, які поєднують усі відомі механізми ушкоджувальної дії металів на мікроорганізми.

Стійкість антарктичних мікроорганізмів до токсичних металів у деяких випадках визначається плазмідами. Так, зі штамів, стійких до хромат-аніона і Co^{2+} , виділено дві плазміди, які трансформовані (перенесені) у чутливий до металів штам *Escherichia coli*. Після трансформації штам ріс навіть за надтоксичної концентрації хрому(VI) — 500 мг/л.

Проте стійкість антарктичних мікроорганізмів до широкого спектру металів ще не означає, що мікроорганізми можуть взаємодіяти з цими металами. На сьогодні нами показано існування щонайменше трьох видів взаємодії антарктичних мікроорганізмів з металами. Перший — це мікробне відновлення розчинних форм металів, наприклад

* Визначення полірезистентності «першого» і «другого порядку» запропоновано нами.



Ріст антарктичних мікроорганізмів за концентрації Cr(VI) 50000 мг/л

відновлення хромат-аніона CrO_4^{2-} до нерозчинного хрому(III) у вигляді $\text{Cr(OH)}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ або відновлення Cu^{2+} до нерозчинної міді(I) у вигляді Cu_2O або CuOH . Другий вид взаємодії — мобілізація металів (утворення розчинних сполук металів з нерозчинних унаслідок їх взаємодії з мікробними екзотаболітами), наприклад, утворення комплексних розчинних сполук з Cu(OH)_2 . Третій вид взаємодії — мікробна іммобілізація металів (тобто їх накопичення у клітинах, мікробній біомасі), наприклад, поглинання Cu^{2+} мікробними клітинами. Звідси випливає, що мікроорганізми можуть залучати метали в біогеохімічні цикли елементів у екосистемах Антарктики.

В антарктичних екосистемах до металів стійкі також вищі рослини, причому їм властива не лише стійкість, а й здатність до взаємодії з металами. Наприклад, представник злакових рослин *Colobanthus quitensis* не тільки росте за наявності 100 мг/л хрому(VI), а й накопичує його в тканинах, а потім відновлює до нерозчинного (а значить, і нетоксичного) гідроксиду хрому(III) у формі $\text{Cr(OH)}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Це свідчить про конвергентність механізмів взаємодії антарктичних

мікроорганізмів і рослин з металами. Отже, в антарктичних екосистемах рослини поряд з мікроорганізмами можуть брати участь у біогеохімічних циклах металів.

В усіх антарктичних екосистемах, а особливо на кліфах, спостерігається нерівномірний розподіл органічних сполук. Мікроорганізми, для того щоб отримати обмежену кількість поживних речовин, змушені з великою швидкістю утилізувати ці речовини. До того ж їм необхідно мати широкий набір ферментів, які забезпечують споживання широкого спектру органічних сполук, таких як: рослинні й білкові полімери, спирти, органічні кислоти тощо. Отже, антарктичні мікроорганізми мають швидко адаптуватись до різноманітних субстратів і споживати їх з великою швидкістю й ефективністю.

Крім того, конкуренція за субстрат (поживні речовини) виявляється також у такому явищі, як антибіоз. Під час конкуренції за субстрат мікроорганізми виділяють антибіотики, які пригнічують інші, конкурентні мікроорганізми. У відповідь на синтез антибіотиків у мікроорганізмів виробляється стійкість до них. Отже, антарктичні мікроорганізми мають виявляти як антибіотичну (антагоністичну) активність, так і стійкість до антибіотиків.

Справді, антарктичний штам *Pseudomonas putida* є антагоністом відносно умовно-патогенних бактерій *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* і *Bacillus subtilis* й істотно пригнічує їх ріст (О.І. Коцофляк та О.А. Кіпріанова). А два антарктичних мікроорганізми — *Brevibacterium antarcticum* і *Entherobacter hormaechei* — стійкі до десяти антибіотиків широкого спектру дії, які ушкоджують цитоплазматичну мембрану і пригнічують синтез білків. Крім того, на прикладі 9 типових культур кліфу Скалодром-2 показано високий рівень їхньої стійкості до 20 антибіотиків широкого спектру дії.

Фундаментальні закономірності, отримані під час вивчення структури і функцій мікробних ценозів, і кількісні показники їхньої стійкості до комплексу екстремальних

факторів стали основою для методологічного обґрунтування антарктичної біорозвідки й розроблення ефективних методів пошуку й ізоляції багатьох промислово перспективних мікроорганізмів.

Так, системне вивчення стійкості антарктичних мікроорганізмів до УФ-радіації свідчить, що кліфи є найперспективнішою екосистемою для виділення УФ-резистентних пігментованих мікроорганізмів. Із цих екосистем було ізольовано десятки штамів УФ-резистентних мікроорганізмів і на їх основі створено колекцію пігментованих мікроорганізмів (бактерій та дріжджів). Ці мікроорганізми синтезують пігменти (каротиноїди, меланіни і, можливо, флавіни), які є біологічно активними речовинами (БАР). Інтенсивне, насичене забарвлення червоних дріжджів дає змогу припустити, що вони є надпродуцентами каротиноїдів. А в деяких вугільно-чорних дріжджах вміст меланіну сягав 6–10% абсолютно сухої маси клітин. Отже, меланіно- та каротиновмісні мікроорганізми є промислово перспективними продуцентами БАР. Загальновідомо, що меланіни мікробного походження є основою сонцезахисних косметичних кремів. Тому меланіни антарктичних мікроорганізмів можуть бути застосовані в косметичній галузі. Крім того, меланіни, виділені з чорних дріжджів *Exophiala nigra*, запобігають утворенню пухлин і мають лікувальну противиразкову дію (д.б.н. Т.П. Берегова, КНУ імені Тараса Шевченка). Меланіни є потужними й ефективними сорбентами токсичних металів. Нами показано, що більшість мікроорганізмів, які містять меланіни, є стійкими до Co^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} і CrO_4^{2-} у концентраційному діапазоні, що дорівнює 500–1000 мг метал-іонів у 1 л, і тому їх можна використати для розроблення нових біотехнологій очищення промислових стічних вод від широкого спектру металів.

Таким чином, практичним результатом системного вивчення стійкості антарктичних мікроорганізмів до УФ-випромінювання стало створення колекції промислово перспективних штамів, які можуть бути використані в багатьох біотехнологіях.

Такий підхід є стратегічно важливим для України. Біорозвідка на науковій основі — на сьогодні єдиний доступний для нашої країни спосіб реалізувати свої права на комерційне використання біоресурсів Антарктики. Організація цільових біорозвідувальних експедицій в Антарктику і фінансування відповідних наукових проектів не потребують витрат у мільйони доларів, проте можуть принести Україні значний прибуток завдяки впровадженню ефективних природоохоронних біотехнологій, отриманню біологічно активних речовин і створенню нових лікарських препаратів.

Отримані результати з системного вивчення стійкості антарктичних мікроорганізмів до токсичних металів дали змогу визначити передумови їх практичного використання. Антарктичні мікроорганізми виявляють полірезистентність другого порядку до найбільш токсичних металів у концентраціях, які в десятки й навіть сотні разів перевищують максимальні концентрації металів у промислових стічних водах або в колекторних водах гірничопереробних і збагачувальних підприємств. Мікроорганізми є стійкими до «репрезентативних» металів, що поєднують у собі всі відомі механізми ушкодження клітин: це метали-окисники, метали-замісники й метали комбінованої дії (одночасно окисники і замісники). Саме тому антарктичні мікроорганізми мають виявляти стійкість не лише до шести тестованих нами металів, а й до всіх інших у будь-яких комбінаціях і в будь-якому концентраційному діапазоні. Наявність альтернативних видів взаємодії мікроорганізмів з металами (імобілізація і мобілізація) дають можливість як вилучати метали з водних розчинів, так і навпаки, переводити нерозчинні сполуки металів у рухомі. Зазначені закономірності дають змогу розробити нові біотехнології ефективного очищення будь-яких металовмісних промислових стічних вод, концентрування кольорових, рідкісноземельних і дорогоцінних металів із надрозбавлених розчинів, а також технології мікробного вилуговування металів з промислово нерентабельних гірських порід.

Виявлена конвергентність взаємодії антарктичних мікроорганізмів і рослин з металами є методологічним підґрунтям для створення новітніх біоремедіаційних технологій вилучення металів з ґрунтів штучними рослинно-бактеріальними асоціаціями. На основі плазмід, що визначають стійкість антарктичних мікроорганізмів до широкого спектру металів, можна сконструювати полірезистентні штами, перспективні для швидкого й ефективного очищення поліметалічних стічних вод.

Вивчення явища антибіозу в антарктичних мікробних ценозах привело до висновку, що це явище найбільшою мірою виявляється в екосистемах з нерівномірним розподілом органічних сполук. Скринінг типових представників антарктичних мікробних ценозів дасть можливість створити колекцію продуцентів антибіотиків і в подальшому виділити промислово перспективні штами.

Однією з найістотніших характеристик антарктичних мікробних ценозів є їхня здатність швидко адаптуватись до широкого спектру екстремальних факторів. Це було використано нами для створення нових біотехнологій, які не лише забезпечують швидке й ефективне знешкодження екологічно небезпечних відходів, а й дають змогу отримати чимало корисних продуктів. Наприклад, стійкість типової антарктичної культури *Brevibacterium antarcticum* до багатьох металів та її здатність відновлювати метали-окисники ми використали для очищення стічної води від токсичного катіона Cu^{2+} . Живильним субстратом для мікроорганізмів слугувала гнила картопля, яка є екологічно небезпечним відходом. У проточній пілотній установці мікроорганізми в результаті відновлення Cu^{2+} до нерозчинних сполук Cu(I) зменшували концентрацію міді у воді в 3250 разів (з 325 до 0,1 мг/л Cu^{2+}). Ця біотехнологія дає змогу одночасно отримати чотири позитивних результати: перший — це деструкція екологічно небезпечного органічного відходу (гнилої картоплі); другий — очищення стічної води від токсичного металу; третій —

отримання технічної або екологічно чистої води; нарешті, четвертий — отримання концентрату цінного металу — нерозчинного оксиду й гідроксиду міді(I).

Це є прикладом нерозривного зв'язку фундаментальних і прикладних досліджень. Фундаментальний аспект — роль мікробних ценозів в окисно-відновних біогеохімічних циклах металів в Антарктиці, а прикладний — нові мікробні технології очищення стічних вод від широкого спектру металів у будь-якому концентраційному діапазоні.

Здатність антарктичних мікроорганізмів швидко адаптуватись до широкого спектру органічних сполук як прояв адаптивної реакції до нерівномірного розподілу органічних речовин у антарктичних екосистемах ми використали для створення двох антарктичних природоохоронних біотехнологій на станції «Академік Вернадський»: мікробної технології зброджування твердих харчових відходів та очищення високомінералізованої фекально-побутової стічної води.

У 2003 р. на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» впроваджено мікробну технологію зброджування змішаних овочевих і кулінарних харчових відходів. За допомогою спеціальних регуляторів мікробного метаболізму («ноу-хау») і мікроорганізмів, виділених із морського мулу поблизу станції, харчові відходи зброджуються впродовж 5–7 діб, а їхня маса зменшується в десятки разів. Нині на багатьох станціях, у тому числі й українській, фекальні стічні води за технологічною схемою змішуються в каналізації з солоною морською водою і надходять в антарктичне довкілля. Ми розробили мікробну технологію, яка ефективно очищує стічну воду і зменшує концентрацію органічних сполук у 160 разів, з 8000 до 50 мг/л за загальним вуглецем. Таку воду можна скидати в море без негативних наслідків.

Після певного доопрацювання «антарктичних» біотехнологій ми створили універсальну технологію, яка за допомогою регуляторів мікробного метаболізму дає змогу водночас швидко й ефективно зброджувати

екологічно небезпечні тверді органічні відходи, отримувати енергоносії (H_2 або CH_4) й очищувати фільтрат (токсичну рідку фракцію) до стану екологічно чистої води.

Одним із головних висновків десятирічних досліджень є те, що для вирішення стратегічних завдань охорони довкілля в Україні, наприклад, для біоремедіації побутових звалищ мегаполісів, можна й необхідно використовувати природоохоронні біотехнології, розроблені на основі антарктичних екстремофільних мікроорганізмів для станції «Академік Вернадський».

Завдяки цілеспрямованій регуляції метаболізму аборигенних мікроорганізмів, що містяться у відходах звалищ, модельні органічні відходи швидко й ефективно зброджуються, з них одержують енергоносії (водень або метан) й екологічно чисту воду. Ми отримали такі інженерно-технологічні показники: коефіцієнт деструкції відходів (співвідношення початкової та кінцевої маси відходів) становить 20–50, з кожного кілограма відходів синтезується близько 70 л H_2 або 10 л CH_4 , а з очищеного фільтрату отримують екологічно чисту воду із залишковою концентрацією органічних сполук близько 20 мг/л. За нашими розрахунками, ця біотехнологія дасть можливість здійснити біоремедіацію звалища приблизно за 3 роки. У перспективі такі біотехнології можуть стати предметом експортного продажу.

Отримані впродовж десяти років результати досліджень привели до таких висновків.

1. На основі системних досліджень структури і функцій мікробних екосистем (ценозів) Західної Антарктики розроблено методологію ефективної біорозвідки, тобто отримання мікроорганізмів, перспективних для промислових біотехнологій.

2. Встановлено закономірності формування полірезистентності й кількісні параметри стійкості мікроорганізмів до комплексу екстремальних факторів: високих доз УФ-радіації, найбільш токсичних металів (Hg^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , CrO_4^{2-}) і 20 антибіотиків широкого спектру дії.

3. Створено колекцію екстремофільних антарктичних мікроорганізмів, перспективних для біотехнологічної промисловості. Ці мікроорганізми можуть бути використані для розроблення нових косметичних препаратів, ліків з противиразковою дією, а також для промислового отримання ефективних антибіотиків. Пігментовані УФ-резистентні дріжджі є перспективними продуцентами каротинів і меланінів.

4. Антарктичні мікроорганізми стійкі до широкого спектру токсичних металів і з високою ефективністю вилучають їх із розчинів. На основі цього явища розроблено біотехнології, які дають можливість не лише знешкодити поліметалічні стічні води, а й одночасно утилізувати екологічно небезпечні органічні відходи, а також отримати комерційно цінні продукти — концентрат металів та екологічно чисту воду.

5. Природоохоронні біотехнології, що розроблені для знешкодження органічних відходів та очищення стічних вод на україн-

ській антарктичній станції «Академік Вернадський», можуть бути впроваджені в Україні для біоремедіації побутових звалищ та очищення фільтратів мегаполісів.

Нині на основі методологічних підходів біорозвідки в Антарктиці ми проводимо скринінг екстремофільних технологічно перспективних мікроорганізмів з таких екстремальних екосистем, як глибинні донні осади Чорного моря, кліфи і лікувальна грязь Мертвого моря, карстові печери і шахти.

Таким чином, біорозвідка є перспективним науковим напрямом досліджень, який дає змогу на основі системного вивчення екстремальних мікробних екосистем розробити нові природоохоронні біотехнології й технології отримання широкого спектру біологічно активних речовин.

Отримані результати є вагомим підґрунтям для виділення в окрему програму з незалежним сталим фінансуванням досліджень з біорозвідки в Антарктиці й інших екстремальних екосистемах.