



УДК 574+523.4

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.30>

## ПОТЕНЦІАЛ СПОНТАННОГО ТЕРАФОРМІНГУ ЛАНДШАФТІВ СУХОДОЛУ З ПОЗИЦІЙ СУЧАСНОЇ ТЕОРІЇ ДИНАМІКИ ЕКОСИСТЕМ

І. В. Хом'як<sup>1</sup>, О. І. Хом'як<sup>2</sup>

Стаття присвячена можливостям природного відновлення екосистем, в тому числі поза межами Землі, в залежності від умов середовища. Метою дослідження є прогнозування потенціалу спонтанного тераформінгу в змодельованих умовах незаселеного біотою субстрату. Відповідно до мети було поставлено такі завдання: змодельовати основні параметри ймовірних едафічних умов незаселеного субстрату, встановити основні вектори заселення та потенціал трансформації такого субстрату біотою, визначити тератрансформаційний потенціал біоти на різних первинних субстратах. Динаміка екосистем, яка призводить до змін середовища, є процесом тераформінгу, під час якого умови середовища на поверхні планети наближаються до оптимуму необхідного для біоти на певному етапі еволюції. Така динаміка не є жорстко детермінованою та залежна від зовнішніх чинників, в тому числі антропогенного та від ендекогенетичного та сингенетичного потенціалу території. Вона рухається в бік з максимальних значень об'ємів надземної фітомаси та зростання її віку, доступних в певній кліматичній зоні та на певному етапі еволюції. Цей процес може бути, як керований людиною, так і спонтанний. Спонтанний тераформінг є автогенною сукцесією із наближенням едафічних умов до кліматичного оптимуму. Він постійно відбувається як самостійно, так і паралельно із цілеспрямованими діями людини. У залежності від субстрату можливі декілька варіантів спонтанного тераформінгу, які є автогенною сукцесією із переходом до ендекогенетичного катастрофічного клімаксу. Він триватиме, поки не відбудуться зміна мінеральної частини едафотопу із подальшим її наповненням біогенними елементами. Кліматичний клімакс можливо в вузькій амплітуді показників едафічних факторів та в присутності банку насіння чи вегетативних зачатків рослин чи насінневої діаспори або проникнення вегетативних частин рослин за її екосистеми. За умови константності в зоні оптимуму показників інших факторів, існує залежність між розмірами часточок мінеральної основи ґрунту і потенціалом спонтанного тераформінгу. Для земної біоти оптимальними показниками є часточки розміром від 0,005 мм до 0,05 мм, що відповідають еоловому лесу.

**Ключові слова:** сукцесія, едафотоп, катастрофічний клімакс, космічна експансія.

<sup>1</sup> кандидат біологічних наук, доцент,  
доцент кафедри екології та географії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: khomyakivan@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0080-0019

<sup>2</sup> аспірант Інституту маркшейдерії та геодезії  
(Фрейбергський Університет гірництва і технологій, м. Фрейберг)  
e-mail: oxanakhomiak@gmail.com  
ORCID: 0009-0006-6764-6545

## THE POTENTIAL OF SPONTANEOUS TERRAFORMING TERRESTRIAL LANDSCAPES FROM THE STANDPOINT OF THE MODERN THEORY OF ECOSYSTEM DYNAMICS

I. V. Khomiak, O. I. Khomiak

*The article is devoted to the possibilities of natural restoration of ecosystems, including beyond the borders of the Earth, depending on environmental conditions. The purpose of the study is to predict the potential of spontaneous terraforming in simulated conditions of a substrate not inhabited by biota. In accordance with the goal, the following tasks were set: to model the main parameters of probable edaphic conditions of an uninhabited substrate, to establish the main vectors of settlement and transformation potential of such a substrate by biota, to determine the teratransformation potential of biota on various primary substrates. The dynamics of ecosystems, which lead to changes in the environment, is a process of terraforming, during which the surface of the planet acquires the appearance corresponding to a certain stage of the evolution of biota. Such dynamics are not rigidly determined and depend on external factors, including anthropogenic, endo-echogenetic and syngenetic potential of the territory. It moves in the direction of the maximum values of above-ground phytomass volumes and growth of its age available in a certain climatic zone and at a certain stage of evolution. This process can be both human-controlled and spontaneous. Spontaneous terraforming is an autogenic succession with edaphic conditions approaching the climactic optimum. It constantly occurs both independently and in parallel with the purposeful actions of a person. Depending on the substrate, several variants of spontaneous terraforming are possible, which are an autogenic succession with a transition to an endoechogenetic catastrophic climax. It will last until the change of the mineral part of the edaphotope with its subsequent filling with biogenic elements. Under the condition of constancy in the zone of the optimum indicators of other factors, there is a dependence between the particle sizes of the mineral base of the soil and the potential of spontaneous terraforming. For terrestrial biota, the optimal indicators of soil mineral base are particles with a size of 0.005 mm to 0.05 mm, which correspond to aeolian loess.*

**Key words:** successions, edaphotope, catastrophic climax, space expansion.

### Вступ

Живі організми мають гнучкі адаптаційні стратегії, що дозволяє їм пристосовуватися, до великої різноманітності середовищ. Завдяки діяльності людини вони отримали можливість переміщуватися на значні відстані та випробувати свої адаптаційні спроможності в нових умовах. Це в свою чергу запускає ланцюги кількох важливих процесів. Серед них, розширення території зайнятої живими істотами, нові напрямки та рішення еволюції видів, загрози для аборигенної біоти, позитивна або негативна для людини трансформація довкілля. Такі переміщення відбуваються, як на поверхні нашої планети, так і за її межами. Це в свою чергу породжує ризики для біорізноманіття в межах окремих ділянок нашої біосфери та ряд етичних й екологічних проблем в космічному просторі, який ми освоємо (Chon-Torres, 2018).

З іншого боку, таке спонтанне перенесення біоти, дозволяє відновлювати природну рослинність на порушених територіях нашої планети. Не залежно від того чи це порушення є природним (вулкани, тектонічні рухи, катастрофічні атмосферні явища), чи антропогенним (гірнична

діяльність, забудова), спонтанне заселення відновлює природні екосистеми без залучення додаткових людських зусиль і засобів (Harbar, 2021). Це дозволяє зробити процес відновлення природних екосистем більш ефективним і направити вивільнені ресурси на інші напрямки.

У наш час спостерігається нова активізація освоєння космічного простору, яка супроводжується перенесенням біоти за межі біосфери. Це стосується не лише орбітальних станцій, а й міжпланетних місій (Onyschuk & Khomiak, 2022). Ми вже зустрічаємо організовану біоту на цих об'єктах і ще частіше спостерігаємо в експериментах за її потенціалом поширення та адаптації. Місячна гонитва та активні дослідження Марсу, в яку вклучилися провідні космічні гравці, робить цю проблему надзвичайно актуальною. Тут можливими є чотири аспекти. Перший пов'язаний із поширенням біоти небезпечною для людини. Другий – із функціонуванням позаземних плантацій, які забезпечуватимуть жителів станцій продуктами харчування, киснем та іншими корисними речовинами. Третій – із проблемами пошуку позаземного життя на фоні поширення в зоні пошуку земних форм.

Четвертий – загроза для аборигенної біоти, знання про яку є фундаментальними джерелами до розкриття сутності життя у Всесвіті загалом. На цьому етапі надзвичайно важливим є прогнозування потенціалу певних територій для спонтанного поширення живих організмів, так і для корекції дослідницьких територій в пошуках позаземного життя (Хом'як, 2021).

Автогенна динаміка екосистем залежна від обмеженого числа груп факторів, хоч і не є жорстко детермінованою. На її темпи і напрямки впливають зовнішні чинники, в тому числі антропогенні, ендоекогенетичний потенціал та сингенетичні можливості. У більшості випадків, автогенна динаміка фототрофних екосистем призводить до збільшення об'ємів надземної фітомаси та зростання її віку (Khomiak et al., 2019). Це відбувається до моменту досягнення максимальних значень доступних в певній кліматичній зоні та на певному етапі еволюції. Точка, в якій вектор динаміки екосистем може досягнути до еволюційно-кліматичного бар'єру, буде клімаксічним атрактором, до якого спрямований саморозвиток усіх екосистем. Якщо вплив одного із трьох груп чинників буде настільки сильним, що зміни надземної фітомаси і її віку припиняться, то екосистема перебуватиме в стані, описаному Юджином Одумом як катастрофічний клімакс (Odum, 1971).

Зовнішні впливи чи внутрішня реорганізація екосистеми, що ведуть до зупинки накопичення фітомаси та збільшення її віку, спричиняють тимчасову зупинку динаміки. Вона запускається одразу, після того, як дигресійний фактор зникає. Складнішими і більш тривалими в часі є блокування процесів ендоекогенезу та сингенезу. Максимальні значення надземної фітомаси та її віку можливі лише в вузькому діапазоні показників едафічних факторів. Насамперед, мова іде про багаторічний режим вологості та загальний сольовий режим, які варіюють досить сильно. Наприклад для території Українського Полісся оптимальні показники цих факторів дорівнюють 11,77–12,37 (HD) і 6,2–6,5 (SL) балів за шкалою Дідуха-Плюти відповідно (Khomiak et al., 2019). Доки едафотоп, який заселяється природною біотою, не досягне цих значень, кліматичний (енергетичний) клімакс неможливий. Саме тому, такі умови середовища називаються клімаксічним оптимумом. Взаємодія біоти із навколишнім середовищем у більшості

випадків веде до наближення із клімаксічним оптимумом. Це виникло в результаті тривалої еволюції екосистем. Лише у випадку, коли ми маємо справу із досить новими і незвичними формами заселення біоти (наприклад, вплив інвазійних видів трансформерів або постійне насадження монокультур) оптимізація едафічних умов не відбувається. Зміни в едафотопі відбуваються за рахунок появи в комплексі органічних речовин, які синтезовані біотою (наприклад, гумусу) та зміни механічного складу (впливи на ґрунтові капіляри, зміна механічного складу, утворення мінерально-органічних комплексів). Потрапляння в ґрунти органічних речовин та зміни в хімічному чи фізичному складі здебільшого сприяють наближенню до клімаксічного оптимуму.

Однак, для того щоб зростала надземна фітомаса та її вік паралельно із покращенням умов середовища, необхідною є заміна угруповань автотрофів із домінуванням одного типу біоморф на інший. Це відбувається за рахунок наявного в ґрунті банку насіння та вегетативних зачатків або його занесення зовні (Harbar et al., 2023). Відсутність можливості появи видів необхідних для наступних стадій сукцесії призводить, до зупинки динаміки – сингенетичного катастрофічного клімаксу. Ще однією причиною такої зупинки, може бути формування угруповання із зависокою конкурентоздатністю в порівнянні із тим, яке має вищу надземну фітомасу і вік. Зазвичай, таке відбувається в угрупованнях інвазійних видів (Khomiak et al., 2019).

Фітомаса та її вік є ознаками не лише стану динаміки екосистем, а й глибини тераформінгу. Тут під тераформінгом ми розуміємо спонтанний або керований процес перетворення непридатної для життя або позбавленої живих організмів ділянки планети. В традиційному розумінні це поняття трактують досить вузько – керований процес перетворення незаселеної живими організмами планети на заселену земними видами. З точки зору астроєкології це не зовсім логічне звуження поняття. Принципи, за якими відбувається заселення незайнятої території не змінюються. Це стосуватиметься, як інших планет, так і будь яких позаземних об'єктів чи порушених ділянок на Землі (Khomiak & Vasylenko, 2023). При цьому, спонтанний тераформінг весь час супроводжуватиме цілеспрямовану діяльність людини. В такому випадку діяль-

ність людини впливатиме на динаміку не обов'язково у протилежному від клімаксичного атрактора напрямку.

Метою дослідження є прогнозування потенціалу спонтанного тераформінгу в змодельованих умовах незаселеного біотою субстрату. Відповідно до мети було поставлено такі завдання:

- Змодельувати основні параметри ймовірних едафічних умов незаселеного субстрату;
- Встановити основні вектори заселення та потенціал трансформації такого субстрату біотою;
- Визначити тератрансформаційний потенціал біоти на різних первинних субстратах.

### Матеріал і методи

Матеріалами дослідження є геоботанічні описи зроблені в 2004–2023 роках на території Українського Полісся, в районі гірничих промислових об'єктів та перелогів. Дослідження проводилися маршрутно-експедиційними, напівстаціонарними та стаціонарними методами. Класифікація рослинних угруповань виконувалася за принципами школи Браун Бланке (Westhoff & Maarel, 1973), а їхня ідентифікація з використанням «Продромусу рослинності України» (Дубина та ін., 2019). Встановлення величини чинників середовища здійснювалося із використанням методів синфітоіндикації. Нами використовувалась уніфікована шкала Дідуха-Плюти для абіотичних факторів (Дідух і Плюта, 1994), шкала Дідуха-Хом'яка для антропогенного фактора та оригінальна шкала бази даних EcoDBase для встановлення показника динаміки. Для синфітоіндикаційного аналізу застосовувалася програма Simargl 1.12. Для моделювання динаміки екосистем використовувалась програмне середовище Python.

Дані про субстрат було отримано із матеріалів Звітів оцінки впливу на довкілля гірничих підприємств, великомасштабних мап ґрунтів та за допомогою гіперспектральної зйомки рихлих осадових порід (Khomiak & Benndorf, 2021). Аналіз розмірів мінеральних часточок та деякі параметри їхньої хімічної будови здійснювалися за допомогою програми штучного інтелекту на основі пакету програм Python (Khomiak et al., 2024)

### Результати

За нашими спостереженнями, в залежності від субстрату можливі декілька варіантів спонтанного тераформінгу, які з точки зору теорії динаміки є автогенною сукцесією із

переходом до ендоекогенетичної зупинки (катастрофічного клімаксу). Гіпотетично, ця зупинка триватиме до тих пір, поки не відбудуться зміна мінеральної частини едафотопу та із подальшим її наповненням біогенними елементами. В умовах Землі та за її межами, якщо відкинути кліматичні фактори, процес спонтанного тераформінгу буде повністю залежати від едафотопу. Земна біота може зіткнутися із труднощами, які не здатна буде подолати. У такому випадку, її поширення буде неможливе, а отже процес тераформінгу буде відсутній. Однак, як показують останні дослідження, навіть на сусідні із нами космічні об'єкти може проникати земна біота і розвиватися в їхньому середовищі. Мова йде про одноклітинних екстремофілів. Більшу частину часу вони будуть знаходитися в стані анабіозу, але в моменти, коли умови тимчасово покращуватимуться будуть тимчасово активізувати процес розмноження. В земних умовах вони практично першими з'являються на порушених ділянках. Якщо потрапляють на кристалічні монолітні породи із поверхнями близькими до вертикальних, то вони залишаються тут єдиними представниками біоти протягом тривалого часу (рис. 1). Разом із тим, слід зазначити, що у таких умовах вони не здатні швидко і у великих обсягах продукувати фітомасу і змінювати едафотоп. Тому їхнє проникнення на іншу планету розтягне її тераформінг на сотні мільйонів років. В ідеальних умовах поліських ґрунтів вони продукують за даними М. М. Голлербаха та Е. А. Штини до 130–133 кг/га. Це лише 0,007–3% надземної фітомаси інших автотрофів цих екосистем. Це може зашкодити дослідницьким місіям, направленим на пошуки позаземного життя. Спонтанне заселення одноклітинними організмами приміщень космічних станцій ведеться набагато активніше і вже може становити загрозу людям завдавати шкоду їхнім плантаціям культурних рослин.

Оскільки, серед одноклітинних автотрофних екстремофілів значна частка ціанобактерій та зелених водоростей, то існує ймовірність їхньої зустрічі із ліхнеофільними грибами, із подальшим утворенням лишайників. Лишайникові угруповання потребують умов, які ближчі до клімаксичного оптимуму, але здатні створювати більші запаси надземної фітомаси та здійснювати глибшу тератрансформацію. За можливостями лишайників різних біоморф створювати запаси фітомаси, їх можна виши-

кувати у такий ряд: накипні, листуваті, куцисті. Накипні або кіркові біоморфи здатні закріплюватися на різних монолітних поверхнях. Вони є наступною після водоростевої стадії автогенної сукцесії (див. рис. 1). Оптимальний баланс освітлення та зволоження дозволяє перейти до домінування більш продуктивних листуватих форм. Перехід до куцистої форми є ще більш складним. В земних умовах вони не часто займають епілітні або епіфітні субстрати. Підтримання життєдіяльності такого організму вимагає ще більшої кількості вологи. Куцистим лишайникам необхідні специфічні мікрокліматичні умови, коли світла буде достатньо для фотосинтезу або рихлий субстрат в при поверхневому шарі якого затримуватиметься волога. Оскільки, для формування таких угруповань необхідні специфічні набори видів (ліхнеофільні гриби, водорості, ціанобактерії бажано із здатністю до фіксації азоту, тощо), то їхнє спонтанне виникнення на віддалених космічних об'єктах є малоімовірними. Однак існуватиме пряма залежність між цією ймовірністю і частотою відвідування планети земними апаратами.

Наявність крупнозернистого субстрату, навіть із невеликою кількістю необхідних

мінеральних речовин (4–5 балів за шкалою Дідуха-Плюти) та багаторічним режимом зволоження 9–10 балів, дозволяє оселитися тут угрупованням мохів та екстриміофільних вищих судинних рослин. Переважено це мохи класів *Bryopsida* та *Polytrichopsida*, а також вищі судинні рослини родин *Caryophyllaceae* та *Poaceae*. Наприклад, на території Центрального Полісся вони формують угруповання *Nardetea strictae* Rivas Goday et Borja Carbonell in Rivas Goday et Mayor López.1966, *Koelerio glaucae-Corynephoretea canescentis* Klika in Klika et Novak 1941 та *Sedo-Scleranthea* Br.-Bl. 1955. Едафічні умови необхідні до такого типу оселищ можуть бути створені від початку або з'явитися в результаті тривалого тераформінгу зі сторони ціанобактерій, суходільних одноклітинних водоростей та лишайників. Порушені земні екосистеми, наприклад в районі кар'єрів, зазвичай вже мають такі умови і ця стадія стартує одразу після послаблення дії зовнішнього фактора. Оскільки, в таких екосистемах може формуватися до 2 т/га надземної фітомаси, то їхній тераформінговий потенціал у 10–15 раз потужніший ніж у найпродуктивніших бактеріально-водоростевих та лишайникових екосистем.

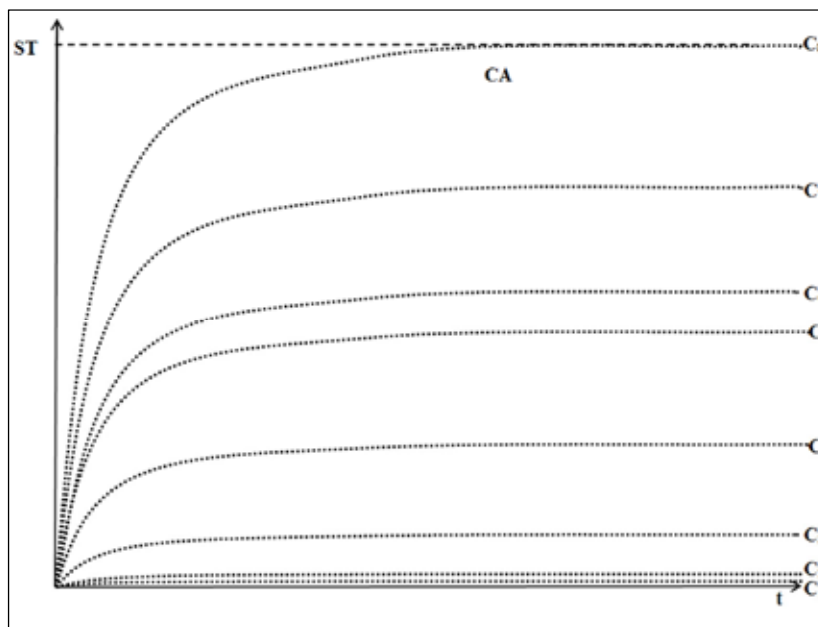


Рис. 1. Варіанти спонтанного тераформінгу в різних едафічних умовах.

Умовні позначення: ST – показник природної динаміки, t – час, C1 – формування водоростево-бактеріальних екосистем, C2 – формування лишайникових екосистем, C3 – формування мохово-злакових екосистем, C4 – формування екосистем злаковників, C5 – формування екосистем похідних лісів, C6 – формування екосистем екстриміофільних корінних лісів, C7 – формування корінних лісів, C8 – формування клімаксічних лісів, CA – клімаксічний аттрактор

Наступні стадії динаміки екосистем, такі як стадія злаковників, похідних лісів, екстримофільних корінних лісів, типових корінних лісів та клімаксихних лісів, практично неможливі без попереднього тераформінгу. Для забезпечення їхнього функціонування необхідно більш стале забезпечення оптимальною кількістю вологи та мінеральних речовин. Це можливе не лише за наявності води та солей у ґрунті, а й органічних макромолекул, які регулюють їхній рух крізь нього. Такі органічні макромолекулярні комплекси формуються лише за рахунок потрапляння в первинний ґрунтовий субстрат відмерлих решток живих організмів. Коли умови починають наближатися до оптимальних, то в межах кожної групи можуть формуватися свої екосистеми, автотрофні блоки яких мають земні аналоги. Наприклад на території Полісся, в екосистем злаковників ними будуть угруповання порядку *Gaietalia veri* Mirk. et Naum. 1986 (класу *Molinio-Arrhenatheretea* R. Tx 1937), для похідних лісів асоціації *Salicetum capreae* Schreier 1955 (класу *Robinietae* Jurco ex Hadac et Sofron 1980), для екстримофільних корінних лісів асоціації *Cladonio-Pinetum* Juraszek 1927 (класу *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939), для типових корінних лісів це всі інші класи лісової рослинності (*Quercetea robori-petraeae* Br.-Bl. et Tüxen ex Oberdorfer 1957, *Vaccinio-Piceetea*, *Carpino-Fagetea sylvaticae* Jakucs ex Passarge 1968, *Quercetea pubescentis* Doing Kraft ex Scamoni et Passarge 1959, *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et Tüxen ex Westhoff, Dijk et al. 1946, *Pyrolo-Pinetum* Korneck 1974) і для клімаксихних лісів пралісові угруповання класу *Carpino-Fagetea sylvaticae*.

За умови константності в зоні оптимуму показників інших факторів можна помітити залежність між розмірами часточок мінеральної основи ґрунту і можливостями тераформінгу (рис. 2). В реальній природній обстановці ми спостерігаємо суміш часточок різного розміру. Певний тип субстрату визначається за їхньою домінуючою групою. Разом із тим ми не розглядаємо тут ґрунти на основі певного типу механічних часточок, а лише виходимо на денну поверхню осадкових порід. В земних умовах це відбувається в районі гірничих розробок, бойових дій, рухів земної кори та дії водяної ерозії. Інопланетні субстрати априорі мають бути їхніми аналогами.

За нашими спостереженнями максимальні темпи приросту надземної фітомаси

та найвищі її показники спостерігаються на лесових гірських породах. Такий субстрат найкраще поєднується із відмерлою органікою, а умови едафотоп на його основі наближається до клімаксихного оптимуму. В таких умовах за 10 років наземна фітомаса перевищує 60 т/га, а показники динаміки (ST) досягають 12 балів. В інших едафічних умовах розвиток екосистем досягає певного рівня і залишається в ньому в стані катастрофічного клімаксу. Тобто, коли розміри часточок субстрату помітно більші або менші за діапазон від 0,005 мм до 0,05 мм, тоді процеси тераформінгу сповільнюються. Дрібні мінеральні часточки, за допомогою переміщення із вітром і водою, прикривають менш придатні субстрати. Розміри таких часточок залежать від сили вітру. Слабкі та помірні вітри в основному переносять лес, більш потужні крупніші піски. Вода здатна переносити, як дуже дрібні часточки мулу та глини, так і переміщувати гравій. Накопичення поверх малопродатних до тераформінгу порід часточок близьких до лесу дозволяє прискорити його. Те саме відбувається, коли дрібні часточки заповнюють щілини між крупними уламками кристалічних порід. Таким чином, подальша динаміка буде пов'язана саме із дрібнозернистим субстратом, а не вищезгаданими уламками.

### Обговорення

Моделювання динаміки екосистем на первинних субстратах має кілька напрямків прикладного та теоретичного характеру. По перше, це прогнозування та розробка алгоритмів регулювання відновлення рослинності після порушень природного та антропогенного характеру на Землі. По друге, це спроба передбачити та запобігти небажаним наслідкам спонтанного перенесення організмів за межі Землі. По третє, це планування тераформінгу в процесі космічної експансії.

За своєю фундаментальною суттю, земні процеси відновлення екосистем не дуже відрізняються від позаземних. Єдина різниця в тому, що тут ми маємо велику кількість організмів, які добре адаптовані до земного середовища. За межами нашої планети усі живі організми не є аборигенними і випадково або навмисно переміщують людиною. Їхня адаптованість позаземних умов середовища не пов'язана із тривалим еволюційним процесом у ньому. Разом із тим, наші спостереження за порушеними ґрунтами в районі гірничих підприємств, дозволяють

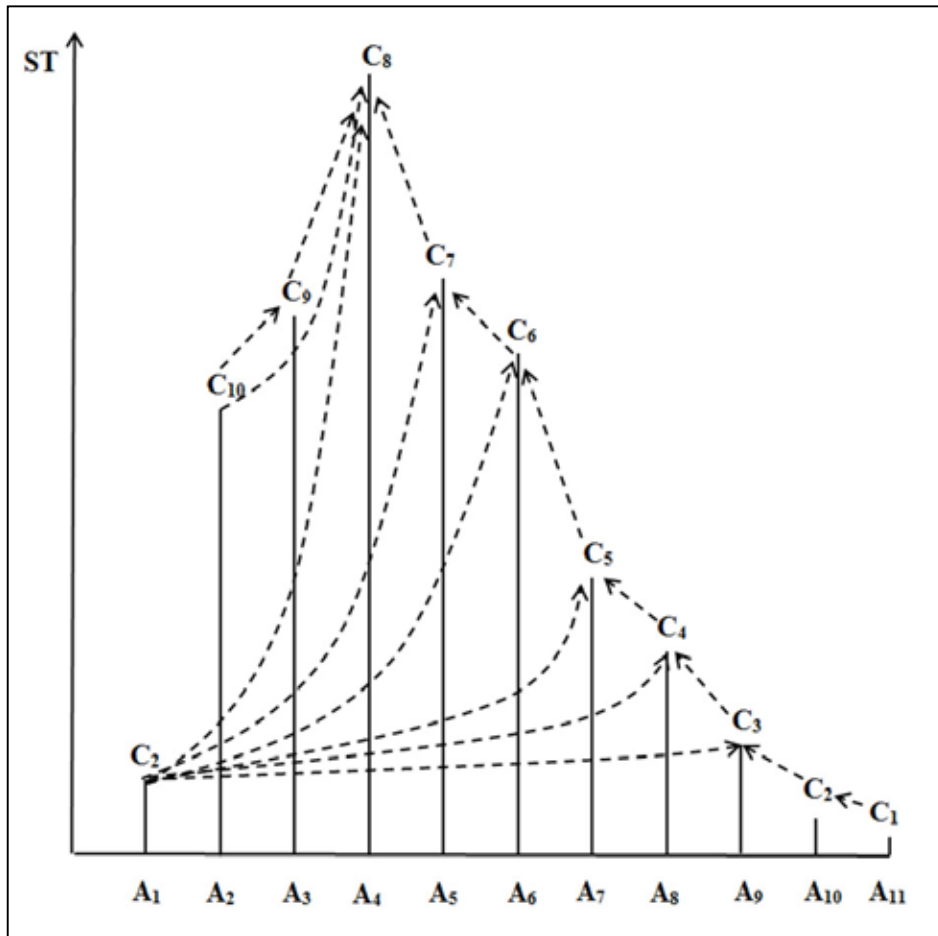


Рис. 2. Варіанти спонтанного тераформінгу в різних едафічних умовах на прикладах кар'єрів та ярів Українського Полісся. Умовні позначення: ST – показник природної динаміки, A<sub>1</sub> – глинисті сланці (d < 0,001 мм, спресований із пористістю 1-3%), A<sub>2</sub> – глина (d ≈ 0,001 мм), A<sub>3</sub> – суглинок (суміш d ≈ 0,005мм – 40%, d ≈ 0,002 мм – 40%, d < 0,002 мм – 20%), A<sub>4</sub> – лес (d від 0,005 мм до 0,05 мм – 60%), A<sub>5</sub> – пісок (d ≈ 0,1-0,5 мм), A<sub>6</sub> – крупнозернистий пісок (d 0,5-3 мм), A<sub>7</sub> – дрібний гравій (d ≈ 3-5 мм), A<sub>8</sub> – крупний гравій (d ≈ 5-10 мм), A<sub>9</sub> – дрібні уламки каменю (d ≈ 1-10 см), A<sub>10</sub> – крупні уламки каменю (d ≈ 0,1-1,5 м), A<sub>11</sub> – крупні камінні моноліти (d > 1,5 м), C<sub>1</sub> – формування водоростево-бактеріальних екосистем та оселищ накипних і листових лишайників, C<sub>2</sub> – формування лишайникових та мохових екосистем, C<sub>3</sub> – формування мохово-злакових екосистем, C<sub>4</sub> – формування екосистем екстриміфільних злаковників, C<sub>5</sub> – формування злаково-чагарничкових екосистем, C<sub>6</sub> – формування екосистем екстриміфільних корінних лісів, C<sub>7</sub> – формування корінних лісів, C<sub>8</sub> – формування клімаксічних лісів, C<sub>9</sub> – формування екосистем похідних лісів, C<sub>10</sub> – формування похідних лісів та чагарників

не лише вибудувати загальні теорії динаміки екосистем, а й проектувати спостережувані закономірності на ймовірні процеси спонтанного тераформінгу.

Незважаючи на те, що ми вважаємо проблему колонізації інших планет досить віддаленою, небезпечні наслідки спонтанного тераформінгу стали щоденною реальністю. Мова іде про перенесення на космічні станції мікроорганізмів, здатних розселятися та

розмножуватися в їхніх межах (Carte et al., 2023). Незважаючи на численні запобіжні заходи бактеріальне забруднення космічних апаратів достатнє навіть для класичних бактеріальних сукцесій із власним катастрофічним клімаксом. Нещодавно було досліджено серветки для підлоги, на яких знайшли численних організмів, включаючи хемотрофів із фіксацією нітрогену. Якщо активність переміщення людей та вантажів

зростатиме разом із зростанням різноманітності субстратів, то тут з'являтимуться більш складні угруповання. Вони можуть становити загрозу, як особисто для користувачів станції, так і для біоти, яку вони вирощують. Цю проблему намагаються вирішити у різні способи, тому що традиційні методи захисту рослин в умовах мікрогравітації в замкнених приміщеннях надзвичайно небезпечні. Дослідники підтверджують підвищені ризики зараження популярних овочевих культур (Totslin et al., 2023; Totslin et al., 2024). Для крупних віддалених поселень це буде серйозною проблемою, пов'язаною із втратою харчових ресурсів.

Інвазії земних організмів на досліджувані космічні об'єкти становлять загрозу для «чистоти» отримуваних результатів пошуків позаземного життя. Експерименти показують, що багато представників земної біоти легко адаптуються до позапланетних умов. Наприклад, міжнародною дослідницькою групою було встановлено чотири види бактерій здатних вижити в умовах Марсу (Zaccaria et al., 2024). Їхнє спонтанне проникнення та поширення на цю планету зведе нанівець усі пошуки позаземного життя. Разом із тим, це буде серйозним порушенням принципів біоетики, адже земна біота може становити загрозу аборигенній. Зазвичай, ми розглядаємо етичність людської діяльності за межами Землі лише в аспекті прямої загрози людині. Наприклад, через загрозу космічним польотам і життю на поверхні планети збільшенням антропогенного засмічення простору (Taylor & Newman, 2018). Однак, загроза знищення інопланетної біоти будь якого рівня розвитку теж є аморальним вчинком (Craven et al., 2021).

У більш віддаленій перспективі, коли людство матиме намір тераформувати незаселену планету, воно зіткнеться із рядом проблем, пов'язаних із ефективністю, надійністю та швидкістю цієї процедури. Використання для неї екстремофілів, навіть генномодифікованих, не вирішить ці проблеми. Наприклад, лишайники, як і деякі автотрофні одноклітинні організми, є досить витривалими, щодо екстремальних умов середовища, тому можна припустити, що первинне вселення із спонтанним тераформінгом може здійснюватися ними одночасно. Вони займатимуть відмінні за едафічними умовами, насамперед за механічним складом субстрату умови. Однак, їхні спроможності перетворення поверхні планети досить слабкі. Навіть навмисне розсіювання

клітин цих організмів не здатне значно прискорити цю процедуру. Для швидкого перетворення планети потрібно заселяти великі площі екосистемами із високопродуктивними автотрофами. Для підвищення ефективності тераформінгу потрібно поєднувати цілеспрямоване заселення поверхні планети із спонтанним тераформінгом. Отже, на територіях, де можливе швидке самовідновлення не варто знищувати спонтанну рослинність і створювати штучні плантації.

Оскільки, для тераформінгу потрібні, і умови середовища, і набори насіння, то його процедуру можна скоротити, використовуючи контрольований варіант для формування банку насіння. Це насіння дозволить перехід до більш високопродуктивних екосистем і до прискорення спонтанного тераформінгу. Найбільш ефективним є комбінований підхід із орієнтуванням на ділянки із відмінними едафічними умовами. На найбільш придатних ділянках раціонально створити ядра біорізноманіття. На тих, що наближаються до них та мають рихлий субстрат можна сформувати мохово-злакові екосистеми. Заселення решти планети відбуватиметься спонтанно за рахунок бактеріально-водоростевих та лишайникових екосистем. Спонтанний тераформінг не можливо буде виключити в жодному випадку, якщо в межах планети чи іншого позаземного об'єкту є умови для виживання земних організмів та контакт із об'єктами, що прибули із Землі. Знання про його механізми дозволять уникнути не бажаних змін в довкіллі або використати цей спонтанний процес для більш швидкого, ефективного та надійного тераформінгу планети.

У земних умовах, під час відновлення екосистем після порушень чи рекультивациї теж будуть присутні спонтанне заселення та спонтанний тераформінг. Намагання під час рекультивациї проігнорувати ці закономірності часто закінчуються зниженням її якості або й повним провалом. Разом із тим, використання спонтанних процесів відтворення природних екосистем та перетворення середовища біотою, дозволяє не лише прискорити ці процеси, а й витратити на них менше зусиль та ресурсів.

#### **Висновки**

Динаміка екосистем, яка призводить до змін середовища, є процесом тераформінгу, під час якого поверхня планети набуває вигляду відповідного певному етапу еволюції біоти. Така динаміка не є жорстко детермінованою та залежна від зовнішніх чин-



ників, в тому числі антропогенних, а також від ендоекогенетичного та сингенетичного потенціалу території. Вона рухається в бік з максимальних значень об'ємів надземної фітомаси та зростання її віку доступних в певній кліматичній зоні та на певному етапі еволюції. Цей процес може бути, як керований людиною, так і спонтанний. Спонтанний тераформінг є автогенною сукцесією із наближенням едафічних умов до кліматичного оптимуму. Він постійно відбувається самостійно або паралельно із цілеспрямованими діями людини.

У залежності від субстрату можливі декілька варіантів спонтанного тераформінгу, які є автогенною сукцесією із переходом до ендоекогенетичного катастро-

фічного клімаксу. Він триватиме, поки не відбудуться зміна мінеральної частини едафотопу із подальшим її наповненням біогенними елементами. Кліматичний клімакс можливий в вузькій амплітуді показників едафічних факторів та в присутності банку насіння або вегетативних зачатків рослин чи їхньої діаспори яка проникає на територію за меж екосистеми.

За умови константності в зоні оптимуму показників інших факторів, існує залежність між розмірами часточок мінеральної основи ґрунту і потенціалом спонтанного тераформінгу. Для земної біоти оптимальними показниками є часточки розміром від 0,005 мм до 0,05 мм, що відповідають еоловому лесу.

### Список використаної літератури

- Дідух Я.П., Плюта П.Г. Фітоіндикація екологічних факторів Київ : Наукова думка, 1994. 280 с.
- Дубина Д.В. та ін. Продромус рослинності України. Київ : Наукова думка, 2019. 784 с.
- Хом'як І.В. Глобальні екологічні проблеми з точки зору астроекології. *Екологічні науки*. 2021. № 6 (39). С. 154–157.
- Carte M.E., Chen F., Clark B.C., Schneegurt M.A. Succession of the bacterial community from a spacecraft assembly clean room when enriched in brines relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*. 2024. № 23. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000277>.
- Chon-Torres O.A. Astrobioethics. *International Journal of Astrobiology*. 2018. № 17. P. 51–56.
- Craven E., Winters M., Smith A.L., Lalime E., Mancinelli R., Shire, B., Ruvkun G. Biological safety in the context of backward planetary protection and Mars Sample Return: conclusions from the Sterilization Working Group. *International Journal of Astrobiology*. 2021. № 20 (1). P. 1–28.
- Harbar O., Khomiak I., Kotsiuba I., Demchuk N., Onyshchuk I. Anthropogenic and natural dynamics of landscape ecosystems of the Slovechansko-Ovruchsky ridge (Ukraine). *Soc. ekol.* 2021. № 3. P. 347–367.
- Harbar O., Lavryk O., Khomiak I., Vlasenko R., Andriychuk T., Kostiuk V. Spatiotemporal analysis of the changes of the main habitats of the Kozachelaherska arena (Nyzhniodniprovsky sands, Kherson region, Ukraine) in the period of 1990–2020. *Auc Geographica*, 2023. № 53. P. 64–73.
- Khomiak I., Harbar O., Demchuk N., Kotsiuba I., Onyshchuk I. Above-ground phytomas dynamics in autogenic succession of an ecosystem. *Forestry ideas*. 2019. № 1. P. 136–146.
- Khomiak I., Vasylenko O. Using the rules of natural recovery of ecosystems for the process of revegetation and terraforming. *Ekologia i racjonalne zarzadzanie przyrodą: edukacja, nauka i praktyka [Zasób elektroniczny]: materiały z międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej, (Łomża – Żytomierz, 15.11.2023 r. / Pod redakcją naukową Zoia Sharlovych, Janusz Lisowski, Ruslana Romaniuk. Część 1. Łomża: MANS w Łomży, 2023. P. 199–203.*
- Khomiak O., Benndorf J. Image segmentation methods for quick characterization of ore chip using RGB images. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 942. № 1. 012033 p.
- Khomiak O., Benndorf J., Verbeek G. Sub-Surface Soil Characterization Using Image Analysis: Material Recognition Using the Grey Level Co-Occurrence Matrix Applied to a Video-CPT-Cone. *Mining*. 2024. № 4 (1). P. 91–105.
- Odum Eugene P. *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia: H B. Holt.Saunders, 1971. 574 p.
- Onyshchuk I.P., Khomiak I.V. The use of the complex action of environmental factors in the process of space colonization. *Ecological sciences*. 2022. № 3 (42). P. 107–110.
- Taylor A.R., Newman C.J. Law, ethics, and space: Space exploration and environmental values. *Etyka*. 2018. № 56. P. 51–74.
- Totsline N., Kniel K.E., Bais H.P. Microgravity and evasion of plant innate immunity by human bacterial pathogens. *npj Microgravity*. 2023. № 9. 71 p. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00323-x>.

Totsline N., Kniel K.E., Sabagyanam C. et al. Simulated microgravity facilitates stomatal ingression by Salmonella in lettuce and suppresses a biocontrol agent. *Sci Rep.* 2024. № 14. 898 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51573-y>.

Westhoff V., Maarel E. The Braun-Blanquet approach. Handbook of Vegetation Science / Ed. By R.H. Whittaker. Hague : Dordrecht, 1973. P. 619–726.

Zaccaria Tommaso et al. Survival of Environment-Derived Opportunistic Bacterial Pathogens to Martian Conditions: Is There a Concern for Human Missions to Mars? *Astrobiology.* 2024. <https://doi.org/10.1089/ast.2023.0057>.

### References (translated and transliterated)

Didukh, Ya.P., & Pliuta, P.H. (1994). Fitoindykatsiia ekolohichnykh faktoriv [Phytoindication of environmental factors]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Dubyna, D.V., et al. (2019). Prodrumus roslynnosti Ukrainy [Prodrumus vegetation of Ukraine]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Khomiak, I.V. (2021). Hlobalni ekolohichni problemy z tochyky zoru astroekolohii [Global environmental problems from the point of view of astroecology]. *Ekolohichni nauky [Ecological Sciences]*, 6 (39), 154–157 [in Ukrainian].

Carte, M.E., Chen, F., Clark, B.C., & Schneegurt, M.A. (2024). Succession of the bacterial community from a spacecraft assembly clean room when enriched in brines relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*, 23. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000277> [in English].

Chon-Torres, O.A. (2018). Astrobioethics. *Int. J. Astrobiology*, 17, 51–56 [in English].

Craven, E., Winters, M., Smith, A.L., Lalime, E., Mancinelli, R., Shirey, B., & Ruvkun, G. (2021). Biological safety in the context of backward planetary protection and Mars Sample Return: conclusions from the Sterilization Working Group. *International Journal of Astrobiology*, 20 (1), 1–28 [in English].

Harbar, O., Khomiak, I., Kotsiuba, I., Demchuk, N., & Onyshchuk, I. (2021). Anthropogenic and natural dynamics of landscape ecosystems of the Slovechansko-Ovruchsky ridge (Ukraine). *Soc. Ekol*, 3, 347–367 [in English].

Harbar, O., Lavryk, O., Khomiak, I., Vlasenko, R., Andriychuk, T., & Kostyuk, V. (2023). Spatiotemporal analysis of the changes of the main habitats of the Kozachelaherska arena (Nyzhniodniprovsky sands, Kherson region, Ukraine) in the period of 1990–2020. *Auc Geographica*, 53, 64–73 [in English].

Khomiak, I., Harbar, O., Demchuk, N., Kotsiuba, I., & Onyshchuk, I. (2019). Above-ground phytomas dynamics in autogenic succession of an ecosystem. *Forestry ideas*, 1, 136–146 [in English].

Khomiak, I., & Vasylenko, O. (2023). Using the rules of natural recovery of ecosystems for the process of revegetation and terraforming. *Ekologia i racjonalne zarzadzanie przyrodą: edukacja, nauka i praktyka [Zasób elektroniczny]: materiały z międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej, Łomża – Żytomierz, 15.11.2023 r. / Pod redakcją naukową Zoia Sharlovych, Janusz Lisowski, Ruslana Romaniuk. Część 1. Łomża: MANS w Łomży, 199–203* [in English].

Khomiak, O., & Benndorf, J. (2021). Image segmentation methods for quick characterization of ore chip using RGB images. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 942 (1), 012033 [in English].

Khomiak, O., Benndorf, J., & Verbeek, G. (2024). Sub-Surface Soil Characterization Using Image Analysis: Material Recognition Using the Grey Level Co-Occurrence Matrix Applied to a Video-CPT-Cone. *Mining*, 4 (1), 91–105 [in English].

Odum Eugene, P. (1971). *Fundamentals of Ecology*. H B.Holt.Saunders [in English].

Onyshchuk, I.P., & Khomiak, I.V. (2022). The use of the complex action of environmental factors in the process of space colonization. *Ecological sciences*, 3 (42), 107–110 [in English].

Taylor, A.R., & Newman, C.J. (2018). Law, ethics, and space: Space exploration and environmental values. *Etyka*, 56, 51–74 [in English].

Totsline, N., Kniel, K.E., & Bais, H.P. (2023). Microgravity and evasion of plant innate immunity by human bacterial pathogens. *npj Microgravit*, 9, 71. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00323-x> [in English].

Totsline, N., Kniel, K.E., & Sabagyanam, C. et al. (2024). Simulated microgravity facilitates stomatal ingression by Salmonella in lettuce and suppresses a biocontrol agent. *Sci Rep*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51573-y> [in English].

Westhoff, V., & Maarel, E. (1973). The Braun-Blanquet approach. Handbook of Vegetation Science / Ed. By R.H. Whittaker. Hague : Dordrecht [in English].

Zaccaria Tommaso et al., (2024). Survival of Environment-Derived Opportunistic Bacterial Pathogens to Martian Conditions: Is There a Concern for Human Missions to Mars? *Astrobiology*. <https://doi.org/10.1089/ast.2023.0057> [in English].

Отримано: 30.04.2024

Прийнято: 10.05.2024