

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРВИННИХ СУКЦЕСІЙ ТА ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ З ЗАСЕЛЕННЯ СУБСТРАТІВ ПІОНЕРНИМИ АВТОТРОФАМИ

Історія розвитку нашої планети вказує на вразливість біосфери. Кілька раз в біографії планети траплялись катастрофи, що ставили усе живе на межу вимирання. Відомо п'ять масових вимирань. Вони спричинялися різними факторами: від вивержень супервулканів до зіткнень із небесними тілами. Незважаючи на велику кількість проєктів запобігання глобальним катастрофам, ніхто не дає гарантії в їхньому успіху. Монопланетна біосфера залишається вразливою.

У 1950 році нобелівський лауреат, батько ядерної фізики Енріко Фермі запитав: «Чи є ми єдиною розумною і технологічно просунутою цивілізацією у Всесвіті? Якщо так, чому інші цивілізації мовчать?». Так виник «парадокс Фермі» або явище «великого мовчання». Кількість катастроф, які трапилися на нашій планеті протягом чотирьох із половиною мільярдів років історія життя, могли на інших планетах або відкидати його еволюцію в бік від виникнення розумного життя, або і повністю його знищувати. Тому існування техногенно розвинутої цивілізації ймовірно явище набагато рідкісніше ніж виникнення життя.

Щоб захистити себе від ймовірної катастрофи біосфера «вибрала» стандартне стратегічне рішення перейти до збільшення кількості своїх аналогів. Для цього потрібен вид або група видів здатних подолати космічний простір, щоб перенести життя на інші планети. Однак, виникла проблема із еволюційними стратегіями видів. Їх можна розділити на три групи: ті що намагаються виграти конкурентну боротьбу за основну кількість ресурсів, ті що ідуть у світі попередньої групи, вдовольняючись залишками ресурсів і ті кого витісняють в малопридатні бідні на ресурси екоотопи. Остання група на перший погляд виглядає перспективною для цієї місії. Однак, і для неї є поріг забезпечення ресурсами за межі якого вона не прагне переміститися.

Життя можна визначити як термодинамічну систему, в якій відбувається упорядковане перетворення речовин і енергії. Вже в повітряному просторі виникає дефіцит необхідних для життя речовин який стає бар'єром для найневибагливіших екстримofilів. Тому, в атмосфері можуть певний час перебувати живі істоти але жодна із них не здатна повноцінно жити і розмножуватися протягом багатьох поколінь. Це анулює усі спроби еволюціонувати в бік здатності до космічної експансії.

Виходом із тупикової ситуації для біосфери стали спроби створити дезадаптовану істоту, яка прагнути в космос не за енергетичними ресурсами чи уникаючи конкурентів, а із іншою суб'єктивною метою. Таким видом на сьогодні є *Homo sapiens*. Він вже вийшов в космос і поступово розширює межі його освоєння. Таким чином біосферною місією людини є перетворення монопланетарної біосфери на мультипланетарну.

Умови середовища на незаселених планетах сильно відрізняються від сучасних на нашій планеті, тому пряме перенесення сучасних організмів між планетами неможливе. В свій час наша планета пережила тривалу трансформацію. Насамперед, це стосувалося перетворення атмосфери із вуглекислотно-азотної на киснево-азотну. Протягом перших 3,85—2,45 млрд. років до нашої ери кисень не вироблявся. Однак, збільшення різноманіття одноклітинних хемотрофів дало шанс для еволюції нової групи – фототрофів.

Поява цих видів не означала миттєвого перетворення атмосфери. Із 2,45 до 1,85 млрд. років до н.е. кисень поглинався океаном і породами морського дна а 1,85—0,85 гірськими породами суходолу. Лише біля 0,54 млрд. років до н.е. атмосфера наситилася киснем в близьких до сучасних концентраціях. Це є причиною того, що заселяти на колонізовані планети хемотрофів здатних на них вижити не має смислу, адже вони не здатні будуть зробити потрібні трансформації. Занесення сюди стійких до екстремальних умов фототрофів прискорить перетворення до 1-1,5 млрд. років. Однак, такий час також є неприйнятним з огляду на ймовірні загрози Землі.

Колонізація інших планет це проблема недалекого майбутнього. Однак, не лише практично, а навіть теоретично, ми ще не готові вибудовувати оптимальні алгоритми цього процесу. На першому етапі, необхідним є моделювання екосистем колонізованих планет на основі основних закономірностей що спостерігаються в земних екосистемах. Паралельно необхідно проводити підбір організмів здатних, з одного боку, витримати екстремальні умови на незаселених планетах, а з іншого бути високопродуктивними і здатними до інвазії в піонерні екосистеми.

Нами ставиться серія експериментів направлених на з'ясування впливу окремих факторів середовища незаселених планет на життя автотрофів-екстримofilів. Існує два підходи до постановки такого експерименту. Перший, передбачає створення максимально подібних умов первинних екосистем колонізованої планети. Другий, послідовна перевірка кожного екстремального фактору (температури, ґрунту, радіації, наявності чи відсутності певних хімічних речовин в певних концентраціях).

Нами була закладена серія, де суходільні ціанобактеріоценози з домінуванням ціанобактерій (*Cyanobacteria*) засівались на субстрат, що за агрегатним станом та хімічним складом нагадували марсіанський ґрунт (за узагальненими даними отриманими спетрографічно із марсоходів «Spirit» і «Opportunity» та орбітальних станцій «Mars Global Surveyor», «Pathfinder»). Контрольні зразки знаходилися на земному ґрунті в добре освітленому місці при кімнатній температурі. Дослід №1 знаходиться в аналогічних умовах але на «марсіанському ґрунті»; дослід №2 – при температурі -18°C та експозиції освітлення 12 годин інтенсивністю в 43000 люкс; дослід №3 – з додаванням ультрафіолетового опромінення широкого спектру; дослід №4 – в атмосфері вуглекислого газу концентрацією 95% за тиску 600 Па.

Ґрунт для досліджує суміш уламкових порід величиною від 100 до 2000 мкм та імітації еолових порід, отриманих механічним способом, розміром від 10 до 100 мкм. За хімічним складом це суміш силікатів та різних мінералів на основі оксидів. Сполуки заліза (Fe_2O_3) становлять 14%. Крім цього, до складу суміші входять гідратовані сульфати ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,3%), а також оксиди алюмінію (Al_2O_3), оксиди та карбонати кальцію (CaO і $CaCO_3$), оксид титану (TiO_2).

До складу суміші входить і гіпохлорит кальцію. Ще 40 років тому (в 1975 році) спусковий апарат «Viking 1» отримав дані, які дозволяли висунути гіпотезу про наявність сполук хлору в марсіанському ґрунті. Апарат «Mars Phoenix» в 2008 році знайшов на Марсі перхлорати. В 2012 році апарат «Curiosity» підтвердив цю знахідку в областях ближче до екватора в ще більших концентраціях. Перхлорати є небезпечними для біоти токсичними речовинами. Саме ця речовина в сукупності із іншими факторами може стати нездоланною причиною для спонтанного заселення Марсу біотою. Однак, поверхня планети піддається інтенсивному ультрафіолетовому опроміненню, яке розкладає перхлорати до гіпохлоритів. На думку Единбургського астробіолога Дженифера Вадсворта та Чарльза Кокела деякі земні бактерії здатні витримувати не лише перхлорати а й їхнє поєднання із опроміненням. Це вони підтвердили, провівши серію експериментів на *Bacillus subtilis*. Оскільки, гіпохлорити більш токсичні і можуть стати основним обмежуючим фактором, то для чистоти експерименту ми взяли саме ці сполуки.

Підбираючи угруповання фототрофів, ми керувалися не лише параметрами стійкості до екстремальних умов та інтенсивності росту. Важливою ознакою була їхня здатність до фіксації азоту та здатність вступати в симбіотичні зв'язки із організмами наступних стадій сукцесій. Мова іде про лишайникову стадію.

Спостереження за первинними сукцесіями земних екосистем вказує на те що першою стадією заселення піонерних субстратів є поява ціанобактеріоценозів, які потім замінюються на ліхеноценози. Так проявляється описана Ліндеманом в 1942 році закономірність, де говориться про постійне зростання біомаси під час автогенних сукцесій. Наші дослідження проведені на території Полісся підтвердили цю гіпотезу, пояснивши її зміною ентропії в екосистемах під час саморозвитку.

У симбіотичні зв'язки із лишайниками вступають представники усіх видів водоростей за винятком *Oscillatoriales*. Найчастіше зустрічаються представники роду *Nostoc*. Також часто в такі зв'язки вступають *Scytonema*, *Calothrix* і *Fischerella*.

Nostoc є дуже перспективною групою видів. Він може вступати в симбіоз не лише із лишайниками (наприклад, такими рідкісними реліктовими видами як *Leptogium imbricatum* та *Leptogium schraderi*). Відомо про симбіоз виду із рядом видів сланевих мохів відділу *Anthocerotopsida* (насамперед, виду *Leiosporoceros dussii*, який являється єдиним представником класу *Leiosporocerotopsida* та еволюційно найдавнішим предком усіх видів відділу *Anthocerotopsida*). Цей вид мохів є піонерним для еолових субстратів. Таким чином представники роду забезпечують формування не лише ліхенозної стадії сукцесії а й наступної бріофітної. Основною проблемою для цих ціанобактерій є потреба в регулярних підвищеннях вологості. Ще однією перевагою цього роду є те, що деяких його представників здавна використовують в їжу в Японії (*Nostoc flagelliforme* та *Nostoc commune*). Це може мати неабияке значення для майбутніх колоністів.

Перевірка стійкості ціанобактеріоценозів до дії окремих екстремальних факторів є лише першим етапом в підборі організмів для моделювання первинних сукцесій на піонерних субстратах. Далі потрібно буде перевірити як на них впливає поєднання факторів (комплексний градієнт). Найбільш стійкі види ціанобактерій в подальшому потрібно піддати селекції, заради формування їхньої здатності виживання в умовах незаселених планет. Насамперед, мова іде про виживання в умовах низьких температур і низької вологості. Під час такої селекції доцільним виглядає застосування ГМО-технологій.