

# ТЕОРЕТИЧНА АСТРОЕКОЛОГІЯ

**Хом'як Оксана**

аспірант Інституту маркшейдерії та геодезії

Фрейбергський Університет гірництва і технологій, м. Фрейберг, Німеччина

**Хом'як Іван**

доцент кафедри екології та географії

Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, Україна

## Подвійна користь астроекології

### Вступ.

Екологія зароджувалася в лоні природничих наук в розпал Наукової революції. З часом, теоретики і практики усвідомили важливість опису зв'язків між середовищем та біотою. Інформації про ці зв'язки накопичувалося усе більше і більше, і переобтяжена нею біологія здійснила відбрунькування свого окремого розділу – екології. Однак, інші розділи біології продовжували доповнювати екологією свої вузькоспеціалізовані науки, де екологія була мультидисциплінарною наукою.

У окремих галузях біології частка екологічних досліджень така велика, що їх важко відділити від екології, незважаючи на їхню історію і самостійний розвиток. Однією із найбільш щільно інтегрованих із екологією розділів біології є астробіологія. Практично кожне астробіологічне дослідження, гіпотеза чи теоретичний огляд є по суті екологічними.

На перший погляд здається, що широке застосування екологічних досліджень в астробіології виключає потребу у відділенні від неї астроекології. Адаже, виглядає так, що астробіологія і є астроекологією. Щоб відповісти на це запитання необхідно глибше проаналізувати структуру астробіології. Ми розглядаємо її ширше ніж просто екзобіологію чи ксенобіологію. Вона включатиме, як життя на інших природних космічних об'єктах, так і вплив космічних факторів на біосистеми та вплив космогенних факторів на біоту Землі. Останні два напрями досліджень дійсно є класичними екологічними, однак майбутнє вивчення позаземної біоти (екзобіологія або ксенобіологія) є набагато ширшими. В багатьох публікаціях, присвячених цьому напрямку, екологічні аспекти присутні але займають лише невелику частину усього масиву досліджень. Наприклад, лише частково екологічними будуть пошуки біосигнатур та астрогологія пов'язана із пошуками слідів життя в гірських породах позаземного походження. Отже, астроекологія перебиває лише частину астробіології. В одних дослідженнях вона повністю домінує, а в інших присутня лише її невелика частка.

### 1. Загальне значення астроекології.

У наш час обсяги досліджень позаземного простору досягнув свого історичного максимуму. Це не лише наслідок їхньої популяризації. Результати досліджень позаземного простору зростають, і якісно, і кількісно. Цьому є глибокі об'єктивні причини. Наші знання про нього можна уявити у вигляді сфери. Це сфера отриманих відповідей. Однак, її поверхня – це площина усвідомленого невідомого. Оскільки, чим більша сфера, тим більша площа її поверхні, то чим більше ми знаємо, тим із більшою кількістю невідомого ми зіштовхуємося. Щоб знаходити відповіді на ці запитання та ще більше розширювати «сферу знань» нам потрібні ще більші ресурси. Щоб зберегти темпи наших досліджень, нам потрібно усе більше і більше цих ресурсів. Наприклад, 2022 року згідно із доповіддю «Government Space Defense» витрати на космічний сектор становили рекордні 103 млрд. доларів. Цей ріст і близько не відповідає потребам, що виникають через розширення «сфери знань» та зростання «площі невідомого». З цієї причини ми мусимо бути максимально ефективними. Ми мусимо направляти інструменти нашого

астробіологічного пошуку туди, де шанси спостерігати ознаки життя є найвищими. Таким фільтром для пошукових програм є астроекологія. Якщо ми сприймаємо ізотропність Всесвіту, то можемо припустити, що існують загальні для усіх його найбільш загальні екологічні закони.

Коли ми використовуємо ресурси потужних телескопів для пошуків біосигнатур, то ми не маємо направляти їх до усіх підряд зірок в порядку наближення до нас, в алфавітному чи будь якому іншому порядку. Знаючи певні характеристики цих зірок, ми можемо розділити варіанти пошуків на групи із більшими чи меншими ймовірностями успіху. На сьогодні, більшість параметрів формули Дрейка вираховується за параметрами можливості існування життя але їх можна замінити на ймовірність його знищення в наслідок катастрофічних чи несприятливих подій в космічному просторі. Таким чином, ми не лише визначимо ймовірну кількість планет із розвинутим життям, а й отримаємо пояснення парадоксу Фермі. Відкриття астрофізиків, зроблені останні кілька десятиліть, вказують на те, що космос ворожий до життя (Burns and Parsons, 2022). Отже, при його пошуках, ми мусимо брати до уваги не стільки місця, де може існувати життя, а де воно ймовірно знищене. Місць де життя малоімовірне, набагато більше ніж про це уявляли в середині ХХ століття. Таким чином, пошуки життя в космічному просторі перетворюються на полювання на єдинорога. Це не робить їх менш важливими. Адже, ми також належимо до життя оточеного космосом. Ми знаходимося в небезпеці не менше, ніж інші населені світи (Ord, 2020). Наш егоцентризм перетворив нас із подібних богам царів природи на її губителів. Насправді ми все ще вразливі та безпомічні перед катастрофами планетарного чи космічного масштабу. Насправді, одне із десятків космічних явищ з більшою ймовірністю перетворить нас на викопні артефакти, ніж один із сотень наших злочинів щодо довкілля. Ми змінюємо довкілля набагато повільніше, ніж це може зробити падіння астероїда, вибух супервулкану, гама-спалах, вибух наднової чи дещо вища за звичайну зміна активності Сонця. Хоч наші зміни довкілля видаються занадто швидкими, ми все рівно встигаємо на них реагувати та намагатися виправити. Із космічними загрозами так не вийде. Вони розгортаються набагато швидше, ніж глобальні зміни клімату, зниження біорізноманіття чи потоншення озонового шару в атмосфері. Їхні впливи, зазвичай, є більш незворотними та масштабними. На підготовку захисту від них потрібно набагато більше часу. І цей час потрібен на науковий прогрес, який не рухається за планом. Нерозв'язані проблеми фізики та інженерії в багатьох галузях є цьому чудовою демонстрацією цього. Наприклад, ми до цих пір користуємося хімічною енергією для польотів у космос і до цих пір не можемо зробити економічно вигідні та масові термоядерні електростанції. Якої б гармонії із дикою природою ми не досягнули, а одне із перерахованих космічних явищ може перетворити нас на купу мертвих гірських порід. Астроекологія на відміну від популярного та поширеного енвайронменталізму вириває нас із солодких снів «помилки того, хто вижив». Вона вчить нас орієнтуватися на реальні загрози для існування та стимулює концентрувати зусилля на захисті від них.

Астроекологічні дослідження можуть носити внутрішньодисциплінарний та мультидисциплінарний характер. У центрі уваги типової астроекології знаходиться не сам об'єкт біоти, а його зв'язки із навколишнім середовищем. Отже, коли ми шукаємо залишки життя в метеориті чи позаземній гірській породі, то це не є астроекологічним дослідженням в класичному розумінні. Це буде астроекологією лише тоді, коли нас цікавитимуть умови навколишнього середовища в районі існування цього метеорита чи гірської породи, як знайдена біота взаємодіяла із ним або адаптувалася до нього.

Візьмемо для прикладу періодичні рецензовані журнали в яких 50% і більше публікацій присвячено астробіології (табл. 1). Ми можемо це визначити за тим, як автори визначають об'єкт досліджень. Якщо предметом дослідження є зв'язки цієї біоти із навколишнім середовищем, то таку публікацію можна вважати астроекологічною. Якщо предметом дослідження є біота або пошуки її слідів а не зв'язки із середовищем, то таку публікацію можна вважати чисто астробіологічною. І врешті решт, якщо це не є предметом дослідження але згадується в результатах дослідження або їх обговоренні, то така публікація лише містить елементи астроекологічним досліджень. Розподіл публікацій на групи здійснюється на суб'єктивний погляд

автора. Якби провести опитування серед більшого числа фахових дослідників екологів, то можливо наведені нижче результати зміняться в один чи інший бік.

Нами проаналізовано 26 наукових видань, у яких зустрічаються астробіологічні публікації за 2022 рік. Із цього списку обрано 3 видання, в яких частка класичних астробіологічних публікацій перевищувала 50% (табл. 1). Це журнали «Astrobiology» (61,54%), «International Journal of Astrobiology» (56,76%) та «Life Sciences in Space Research» (56,6%). Решта їхніх публікацій були пов'язані із космосом, але не були зосереджені на дослідженнях біоти, яка знаходиться за межами Землі. Це були дослідження приладів для спостереження за певними параметрами космічного простору, питання освіти, історії та філософії. Частка визначених астроекологічних публікацій, де предметом дослідження є взаємодія живих організмів із навколишнім середовищем, коливалася від 15,38 до 20,75 % від загальної кількості та від 25 до 38,09% від кількості астробіологічних статей. Ще частина дослідників не ставили собі за основну мету вивчати взаємозв'язки біоти із організмами але в статтях згадували про цей аспект. Такі частково астроекологічні публікації займають від 7,55 до 15,38% від загальної кількості та від 13,33 до 25% від кількості астробіологічних публікацій. Якщо об'єднати ці категорії разом, то їхня частка коливатиметься від 28,3 до 32,43% від загальної кількості та від 50 до 57,14% від кількості астробіологічних публікацій.

Таблиця 1. Частка астроекологічних публікацій в провідних астробіологічних журналах.

Назва журналу	число загальне публікацій	Астробіологічні публікації		Астроекологічні публікації		Публікації із елементами астроекології	
		Кількість (шт.)	Частка (%)	Кількість (шт.)	Частка (%)	Кількість (шт.)	Частка (%)
Astrobiology	13	8	61,54	2	15,38	2	15,38
International Journal of Astrobiology	37	21	56,76	8	21,62	4	10,81
Life Sciences in Space Research	53	30	56,60	11	20,75	4	7,55

## 2. Роль астроекології в астробіологічних дослідженнях.

Велика частка астробіологічних досліджень пов'язані із земною біотою. Насамперед, мова іде про дослідження екстремофілів, стійкості земних екосистем, загальнопланетарних змін середовища та пов'язаних із ними вимирань, зв'язок людини із біосферою, тривалості життя та його збереження в екстремальних умовах. Наприклад, наша «Лабораторія теорії екосистем» досліджує динаміку заселення порушених земель рослинами. Наша робота направлена на пошук загальних закономірностей динаміки відновлення природного рослинного покриву. Це може бути теоретичною основою для побудови алгоритмів тераформінгу колонізованих планет. Таке наше дослідження можна вважати астроекологічним, тому, що ми вивчаємо, як адаптуються види до певного позбавленого життя середовища і як вони самі змінюють це середовище, роблячи його придатним для інших груп видів.

У дослідженні екстремофілів до уваги береться їхнє видове різноманіття, генетика, морфологічні, біохімічні та біофізичні реакції на умови середовища та інше (Cockell et al. 2019). Астроекологічні дослідження в цьому напрямку направлені на пошуки меж витривалості для життя в космосі (Cockell, Samuels, Stevens, 2022). При цьому, ця область найбільше страждає від «земного шовінізму». Що таке екстремальні умови середовища? Ми часто вважаємо їх такими, якщо вони помітно відхиляються від зони оптимуму для людини чи більшості живих організмів Землі (Cockell, et al. 2016; Cockell, Stevens, Prescott, 2019). Однак, те, що є екстремальним для нас

чи для більшості видів, які нас оточують може бути оптимальним для інопланетного життя (Carré at all 2022). Отже, для визначення екстремальності нам потрібно сформулювати універсальне визначення життя у Всесвіті (Hall, Krausman, Morrison, 1997). Опираючись на ізотропність Всесвіту, ми можемо припустити що в будь-якому його куточку зустрічаються ті само хімічні елементи із тими само властивостями. Оскільки, для відтворювальної функції біоти її гомеостазу та подразливості необхідна висока різноманітність речовин в поширеному поляризованому розчиннику, то пошуки життя на вуглецевій основі в умовах, де присутня рідка вода є не різновидом «вуглецевого шовінізму», а найбільш ймовірною теоретичною моделлю (Benner, 2010). Отже, природні умови, в яких може формуватися високе різноманіття водних розчинів вуглеводневих сполук є оптимальними, а крайні показники факторів такого екологічного спектру є екстремальними (Heller, 2020).

Найчастіше астробіологія екстремофілів зосереджується на двох питаннях. Перше – це визначення меж витривалості живих організмів (Cockell, Samuels, Stevens, 2022; Hoffmann, Chown, Clusella-Trullas, 2013). Друге – це порівняння екстремальних середовищ на Землі, заселених біотою, із відомими або модульованими умовами середовища на інших планетах. Найчастіше для порівняння використовується Марс. У цьому є дві причини. По-перше, Марс єдина відома нам планета, де середовище найбільш наближене до необхідного для життя. Отже, він міг гіпотетично бути в минулому заселений біотою. По-друге, це найближча планета доступна для нашого детального вивчення. Саме тому більшість дослідників цього напрямку вивчають можливості проживання земних екстремофілів на Марсі. Наприклад, у 2022 році у журналі *Astrobiology* опублікована стаття американських дослідників Robin M. Cesur, Irfan M. Ansari, Fei Chen, Benton C. Clark, and Mark A. Schneegurt (Cesur at all 2022). Вони досліджували ріст мікроорганізмів (*Halomonas*, *Marinococcus*, *Planococcus*), стійких до солі. Дослідження проводилися в районі Hot Lake, Washington; Basque Lake, British Columbia, and Great Salt Plains, Oklahoma, в умовах осушення. Автори стверджують, що ріст мікроорганізмів у розчинених розсолах можливі на таких планетах як Марс. Коли умови стають більш вологими, можуть утворюватися придатні для життя розсоли. Здатність мікроорганізмів вижити після висихання вказує на ймовірність, що після занесення із Землі на космічних кораблях, існує ризик зараження ними поверхні Марса. Таке дослідження відповідає усім критеріям за якими визначають астроекологічну науку.

Наша палеонтологія, планетологія та астрофізика стверджують, що умови середовища на планетах не залишаються стабільними. Їхні великі зміни частіше за все призводять до погіршення життєвості більшості видів, тобто стають екстремальними. Інколи, вони настільки сильно відхиляються від оптимуму, що спричиняють масові вимирання видів (Bostrom, Ćirković, 2011). Земля пережила декілька масових вимирань, п'ять із яких наблизили біосферу нашої планети до межі зникнення (Raup, Sepkoski, 1982). Ми зараз стурбовані шостим масовим вимиранням. Людина стала потужною геологічною силою і отримала здатність змінювати середовище в масштабах планети. Однак, теперішні масштаби зниження біорізноманіття ще дуже далекі до попередніх п'яти вимирань. Сьогодні вважають, що попередні вимирання спричинені явищами космічного масштабу, які спостерігаються в надрах планети та за її межами. Вивчення таких потенційних загроз має стратегічне прикладне значення – застерігає нас і нашу біосферу від зникнення (Sapio, 2022). Це є однією із основ астробіоетики (Chon-Torres, 2018).

Спроби виявити причини великих вимирань весь час нас повертають до позаземних факторів. Наприклад, Yukio Isozaki (2022) пише про це в своїй статті «Paleozoic Extinctions in Cosmoclimatological Context: 'Non-Bolide' Extraterrestrial Causes for Global Chilling». Він наголошує на тому, що останнім часом палеобіологи та астробіологи все частіше повертаються до позаземних причин глобальних вимирань. Це на його думку не є поверненням до старої моделі, пов'язаної із падінням крупного метеорита. Це генерована на нових астрофізичних відкриттях концепція, яка розглядає сценарії пов'язані із процесами, як всередині сонячної системи, так і за її межами. Вона включає в себе прямий та опосередкований вплив Сонця та інших об'єктів Сонячної системи на клімат Землі, відлуння вибухів наднових, міграція темної матерії і звичайно ж класичні падіння крупних метеоритів. Прямий вплив проявляється через зміни в атмосфері або кількості енергії яка через неї проходить. Опосередкований вплив здійснювався через тектонічну активність, яка

міняла фізичні та хімічні властивості атмосфери. Аналогічні ідеї ми зустрічаємо в інших авторів (Bostrom, Ćirković, 2011). Наприклад, встановлений 27,5 цикл катастрофічних змін в середовищі Землі (Rampino, Caldeira, Zhual, 2021) порівнюють із  $32 \pm 3$  млн. років циклом вертикальних коливань Сонячної системи навколо середньої площини Галактики (Rampino et al. 1986). Дехто із дослідників вважає, що в районі площини Галактики відбувається збільшення потоку космічних променів може призвести до значних кліматичних змін (Gies, Hiesel, 2005; Svensmark, 2006, Shaviv et al., 2014).

Як для визначення екстремальності умов, так і для визначення загроз вимирання, центральним об'єктом астробіологічних досліджень залишається людина. Людина для астробіологів є живою істотою рівною за популярністю із екстремофільними мікроорганізмами. Велике число астробіологічних публікацій присвячене впливу космічного польоту безпосередньо на організм людини або моделюванню цього на тваринах. Абсолютна більшість цих робіт є екологічними. З одного боку, це пояснюється тим, що медицина здебільшого займається проблемами дезадаптації людини до умов середовища. Наприклад, коли людина втрачає здатність повноцінно функціонувати в певних умовах середовища. З цієї причини ми можемо розглядати інфекційні хвороби та гастрологію, як проблеми біотичних (трофічних) зв'язків із середовищем, а травматологія та ортопедія, як проблеми абіотичних (фізичних, механічних) зв'язків. З іншого боку, причинами хвороб можуть бути як внутрішні (спадково-генетичні, фізіологічні) так і зовнішні або екологічні (біотичні, абіотичні та соціально-психологічні) фактори. Вихід людини за межі поверхні Землі природно на перше місце ставить проблему адаптації. Ми намагаємося наблизити до оптимальних умов перебування за межами рідної планети. Однак, в найближчій перспективі фінансово-технічні та технологічні обмеження не дозволять цього зробити в повному масштабі. Саме тому, велика частина астробіологічних та космічно-медичних досліджень є астроекологічним. Наприклад, у 2022 році журнал «International Journal of Astrobiology» мав 10% таких статей а журнал «Astrobiology» – 6%. У цьому підрахунку виникли труднощі із визначенням до якої категорії віднести спеціальний червневий випуск 2022 року журналу «Astrobiology». Він присвячений поверненню зразків з Марсу. Він є астроекологічним, так як здебільшого пов'язаний із запобіганням заселення цих зразків земною біотою та її рештками. Разом із тим він також присвячений застереженням щодо потрапляння на Землю марсіанської біоти, яка може становити загрозу окремим видам, екосистемам чи здоров'ю людини. Остання загроза носить медичний характер. Журнал «Life Sciences in Space Research» має найбільшу частку астроекологічних статей медичного спрямування – 78 %. Тут є цілий розділ «Health and biology in the space environment» а номер 35 був повністю присвячений впливу радіації на організм.

Екологічні дослідження в межах астробіології охоплюють вплив космічного середовища на людину не лише під час космічних польотів, а й під час перебування на Землі. Насамперед, мова іде про вплив космічної погоди на фізіологію людини та рівень захворювань (Dikpati, et al., 2017). Незважаючи на те, що навколо окремих аспектів зв'язку між космічною погодою і здоров'ям точаться гострі суперечки, це питання лишається актуальним та має неабияке практичне значення.

Крім питань зв'язку між космічним середовищем і біотою нашої планети, що охоплює питань меж витривалості життя, різких катастрофічних змін середовища, впливу на організми перебування в штучному середовищі за межами рідної планети та впливу на життєвість космічної погоди, екологічні аспекти астробіології проявляються і в питаннях виникнення життя на Землі та за її межами. Це досить популярна тема в сучасній астробіології (Malaterre, Jeancolas, Nghe, 2022). Наприклад, журнал «Astrobiology» за 2022 рік опублікував 25 таких статей. В середньому на номер припадало 2,1 публікація. Лише один із номерів не мав жодної публікації, щодо походження життя а максимальне число таких статей досягало 4 на номер. За звичай, це 1 або 3 статті на номер (по 33,3% номерів). Більша частина цих статей ближче до хімії ніж до екології. Адаже вони розглядають зв'язок абіотичного процесу утворення пребіотиків із середовищем, а екологія досліджує зв'язок надорганізованих біосистем із ним. Екологія починається там, де ми розглядаємо формування перших екосистем або ймовірні вектори еволюції, а не передумови виникнення життя.

### 3. Чиста астроекологія.

Чи потрібно астроекологію відокремлювати в окрему гілку астробіології? Чи задовольняє сучасні дослідницькі та прикладні потреби її теперішній мультидисциплінарний статус? Астроекологія відрізняється від решти астробіології метою, об'єктом та загальними методами дослідження. Тоді, коли астробіологія використовує зв'язки об'єкту із середовищем, як інструмент дослідження цього об'єкту, то астроекологія зосереджена на вивченні самих зв'язків. Найголовніше те, що астроекологія використовує переважно індуктивні методи. Решта розділів астробіології частіше використовують дедуктивні методи, коли зв'язки із довкіллям є лише однією із характеристик об'єкту біоти. Для цього вона використовує вже існуючі біологічні закони, що стосуються відносин живих організмів із довкіллям. Зміна вектору використання отриманих знань, як це робить екологія, та перехід до індуктивного методу, дозволить генерувати нові наукові закони. Оскільки, ми виходимо за межі нашої рідної планети, то ці закони будуть ще більш загальними й менш залежними від «земного шовінізму». Звичайно, коли настане пора досліджень життя за межами нашої планети, теоретична екологія може пережити наукову революцію, як ту, що пережили в свій час природничі науки.

З одного боку, навіть сучасні експерименти і спостереження наповнюють загальну екологію новими даними. Ми маємо змогу досліджувати такі нові фактори середовища, які не зустрічаються на нашій планеті. Наприклад, вплив мікрогравітації чи космічного вакууму. З іншого боку, чи достатньо цих нових знань і чи зможуть вони вплинути на розвиток екологічних теорій? Земна екологія будувала свої теорії на основі спостережень за біотою. З часом, коли територія досліджень та коло об'єктів розширювалося, то окремі теорії відкидалися, інші корегувалися чи доповнювалися. Часто ми спостерігали події типу «The Black Swan». Вихід за межі попереднього емпіричного досвіду призводив до зміни наукових парадигм (Khomiak, 2023). Астрономія та астрофізика без зупинки це демонструють.

Розробка нових загальних екологічних теорій на основі спостереження за земними екосистемами стикається із кількома проблемами. Серед них – велика кількість фактичного матеріалу, яка більше створює інформаційний шум, ніж дозволяє виокремити конкретну закономірність. Ми із цим стикнулися, коли намагалися розробити універсальну термодинамічну модель динаміки екосистем (Khomiak, et al 2019). Факторів і закономірностей було стільки, що визначити ключову закономірність видавалося неможливим. Лише погляд на екосистеми, як на термодинамічні системи, тобто вихід за межі спостережуваних об'єктів, дозволив побудувати модель із непоганими перспективами прогнозування динаміки. Другою проблемою є залежність природних біосистем від факторів незначної сили. Встановити причинно-наслідковий ланцюжок між фактором середовища і реакцією біосистеми не завжди просто. В земних умовах ми часто не ставимо таких перед собою таких задач, тому що можемо потонути під завалами гіпотез та спроб їх перевірити. Наприклад, у нашому дослідженні впливу ЛЕП на біорізноманіття дощових черв'яків, ми встановили які види на різній відстані від них (Vlasenko, et al 2020). Аналіз комплексу окремих впливів ЛЕП на життєдіяльність дощових черв'яків не приніс переконливих результатів. Щоб вивести закономірність, яка буде претендувати на роль загального екологічного закону, нам потрібно абстрагуватися від земного досвіду. Найкращим помічником на цьому шляху є астроекологія. Астроекологія повертає нас до погляду на земне життя як на комічне явище. (Mautner, 2004). Наприклад, в роботі Christopher E. Carr розглядається можливість і значення порівняння виникнення життя на Землі і на Марсі. Століття земного дослідження життя на нашій планеті не дали відчутного результату в наближенні до розуміння, що це таке і як воно виникає. Ми занадто зашорені в дослідженні цього питання і часто мислимо стереотипами нашої тихої гавані. Пошуки життя за межами Землі не лише розширюють наші можливості, а й примушують нас більш глибоко і об'єктивно розглядати його сутність.

## 5. Астроекологія і прикладна екологія

Розвиток астроекології, як окремого розділу астробіології, може вплинути не лише на прогрес загальної екології, а й на виконання прикладних задач (Khomiak, 2021). У прикладній екології ми дуже часто стикаємося із невиправданим оптимізмом та некритичним слідуванням за модними трендами. Мимоволі на загал виносять успіх певних модних екологічних акцій і вперто замовчуються численні провали. Це стосується, насамперед, відновлюваної екології та впровадження строгого заповідного режиму. Однак, екологічні теорії, побудовані на упередженнях та земному шовінізмі, провокують впровадження недоречних, неефективних і навіть шкідливих методів. Якщо позбутися від земного шовінізму в екології, то її прикладні проекти будуть набагато ефективнішими, більш прогнозованими та безпечними. Через місток прокладений між астроекологією та класичною прикладною екологією можна рухатися в обидва боки, отримуючи вигоду.

Мова йде не лише про таку ексклюзивну річ, як космічна медицина, чиї дослідження досить поширені, як частина астроекології. Є речі, які вже діють із великою ефективністю. Мається на увазі використання дистанційного зондування поверхні Землі задля питань екологічної безпеки та раціонального використання природних ресурсів. Ні екологія, ні охорона довкілля не мали таких можливостей до виведення на орбіту моніторингових супутників. Вони стежать за глобальними змінами клімату, станом довкілля в тому числі небезпечними надзвичайними ситуаціями (аваріями, пожежами, викидами небезпечних відходів), станом ландшафтів дикої природи. Без цих технологій ми не могли б оперативно реагувати на загрози довкілля та оцінювати їхній масштаб. Також, ми не могли б повністю оцінити глобальні екологічні проблеми – глобальну зміну клімату, деградацію ландшафтів дикої природи, проблему озонового шару, деградацію ґрунтів, тощо. Наприклад, нами було проаналізовано зміни природних екосистем найбільшої пустелі Європи Олешківські піски. (Harbar et al. 2023). Через те, що Російська Федерація окупувала ці території і тут зараз ведуться активні бойові дії, завершити дослідження в традиційний спосіб було неможливо. Разом із тим стан унікальних оселищ викликав тривогу ще до повномасштабного вторгнення. Використання технологій супутникового моніторингу дозволило зробити перший етап такого дослідження – оцінити, як відбувалися зміни природної рослинності з огляду на «мирні» зміни середовища. Продовживши дослідження ми отримаємо можливість визначити постмілітарні порушення рослинного покриву та наперед розробити алгоритми його відновлення та збереження після перемоги України у цій війні.

З іншого боку, ми можемо прогнозувати та ліквідувати загрози довкіллю, що йдуть не тільки від людини. Також, ми можемо передбачати ймовірні загрози, які створюють космічні об'єкти, визначати їхні наслідки та шукати шляхи до виживання. Про такі загрози ми багато дізнаємося із сучасних досліджень астрофізики але найбільш цінну інформацію отримуємо із планетології. Дослідження планет, де в принципі було високо ймовірним присутність життя може стати моделями майбутнього нашої Землі (Prakash, et al. 2022).

Крім безпекового аспекту космічного моніторингу є інше його практичне застосування. Мова йде про сільське господарство. Тут є кілька векторів взаємодії із астроекологією. Найбільш поширеним є супутниковий моніторинг сільськогосподарських угідь. Тепер не потрібно, як століття тому, агрономам обходити свої поля, визначаючи в них проблемні ділянки та успішність вирощування культур. Зараз для невеличких ділянок використовують квадрокоптери, а в більшому масштабі розшифровані супутникові знімки. Останній підхід дає навіть більше переваг ніж використання безпілотних літальних апаратів. Справа в тому, що ми можемо отримати велику серію знімків протягом тривалого часу на великій за площею території, яка дозволить нам моделювати та прогнозувати багаторічні зміни експлуатованих угідь. Таким чином, ми можемо передбачити, а отже і запобігти, водній та вітровій ерозії, засоленню ґрунту, змінам його родючості, тощо. Другою вигодою для сільського господарства є спроби астробіологів вирощувати сільськогосподарську продукцію за межами Землі. Це значно розширює знання про сільськогосподарські породи і сорти, що зазвичай не цікавить земних дослідників аграріїв. Астробіологічні дослідження не лише дають нові знання щодо культурних видів в позаземних

умовах, але й відкривають нові аспекти впливу на земне сільське господарство космічних факторів. Мова іде, насамперед, про взаємозв'язок між сонячною погодою та фізіологією сільськогосподарських організмів.

Однак, найкращою демонстрацією подвійної вигоди астроекології та прикладної екології є місток прокладений між тераформінгом та відновлюваною екологією. По суті, і там, і там ми намагаємося перетворити незаселену біотою територію на повноцінні природні екосистеми. Звичайно, на Землі ми маємо спонтанний банк насіння, який самостійно переміщується на порушену територію та відносно прийнятні абіотичні умови. На інших планетах, у наших резервах буде лише те насіння, яке ми доставили та розмножили перед тераформінгом. Крім того, абіотичні умови прийдеться ще формувати використовуючи технічні засоби, оранжереї та види екстремофіли. Однак, на більш просунутих стадіях тераформінг та відновлення порушених земних території однаковий, як технологічно, так і за суттю. Разом із тим, ми можемо спостерігати, як помилку в практиці відновлюваної екології на Землі, так і в ідеях тераформінгу за її межами. Часто для тераформінгу пропонуються види здатні витримати первинні умови середовища на колонізованій планеті. Однак, кожен земний еколог скаже, що екосистеми сформовані лишайниками, водоростями чи автотрофними бактеріями перетворюють середовище надзвичайно повільно. Це настільки повільний процес, що його прийнято вважати формою катастрофічного клімаксу. Отже, якщо намагатися здійснити тераформінг виключно екстремофільними продуцентами, то прийдеться чекати результату сотні тисяч а, можливо, і сотні мільйонів років. Разом із тим «земний еколог», знає що камінні осипи чи території кар'єрів, заростають набагато швидше у інший спосіб. Тут природа не чекає поки екстремофіли перетворять субстрат на привабливий для вищих судинних рослин. Тут іде два паралельних процеси. Один повільний – екстремофільний на ділянках кристалічних монолітів не піддатливих ендоекогенезу. Другий швидкий – формування трав'яної рослинності, а то й похідних лісів в розщелинах між брилами. Те саме доцільно буде робити і при тераформінгу, коли поверхня планети буде заселятиметься екстремофілами але основний процес (формування ґрунту, банку насіння та перетворення атмосфери) відбуватиметься в численних оранжереях поміж бідних на життя пустель.

Іншою стороною зв'язку між астроекологією та відновлюваною екологією є процеси, які відбуваються на Землі. У нашу лабораторію інколи приходять люди, що жаліються на невдалу рекультивацію чи відновлення природної рослинності. Вони стверджують, що діяли, за поширеною методикою але зазнали невдачі. Справа в тому, що часто земні методи рекультивації та відновлення є недостатньо надійними та ефективними. Ми часто отримуємо позитивний результат не тому, що діємо вірно, а тому, що природні процеси відновлення самі виправили наші помилки. Однак, надія на таку допомогу, не робить наші методи ефективними. Алгоритми тераформінгу, в яких не передбачено, що наші помилки будуть виправлені за рахунок насінневої діаспори сусідніх екосистем та інших природних процесів, дають можливість підвищити надійність та ефективність нашого земного відновлення порушених екосистем. А ще вони очищають наш погляд на певних представників біоти та на певні екологічні процеси від земного шовінізму. Наприклад, «земні екологи» відносять рослини, які найчастіше зустрічаються в агроекосистемах чи поруч із людиною бур'янами та рудералами. Ми спостерігаємо сторічну дискусію про їхні стратегії виживання, яка до цього часу не стихає. Однак, коли б ми поглянули на ці види із відстороненого погляду астроекології, то усе одразу стало б на місця. Ці види є вищими судинними рослинами, які першими приходять на порушені субстрати. До активних перетворень людиною поверхні планети, вони зустрічалися в місцях, де геологічні чи метеорологічні процеси руйнували ґрунтовий та рослинний покрив. Наші агроекосистеми, селітебні екосистеми та технотопи вони сприймають, як класичні порушені субстрати. Пристосування до таких умов середовища та набагато швидші за класичних екстремофілів темпи їхнього заселення, робить ці види ідеальними на проміжних етапах тераформінгу (Черняєва, et al. 2022).

Прикладів того, де астроекологія не лише збагачує сферу знань людства, а й має пряму чи опосередковану вигоду для земної прикладної екології дуже багато. Та чи стануть вони контраргументом для противників будь яких космічних програм? Одним із основних аргументів проти людської експансії в космос є те, що ми порушили біосферу на рідній планеті і усі ці



асоціальні, аморальні та руйнівні риси виносимо в космос на інші планети. Іншими словами, мовляв ми морально не готові прилітати на інші небесні тіла, так як можемо становити загрозу для них, через наш руйнівний потенціал. (Schwartz, 2018; Chon-Torres 2018) Другим аргументом є «марнування» ресурсів на космос, тоді коли на поверхні планети недостатньо ресурсів для вирішення актуальних проблем на Землі.

Можна наводити багато контраргументів проти цих двох тверджень. Можна порівняти приклади, коли ми витрачаємо на так звані репутаційні витрати у рази більше ніж частка податків та приватних інвестицій, вкладених в освоєння космосу. Ми купуємо нові авто, гаджети одяг, та інші речі, за таку ціну і в такій кількості, яка набагато перевищує наші базові потреби в них. Нове дорожче авто чи гаджет ми хочемо мати не через недосконалість старого чи нездатність дешевшого забезпечити наші потреби, а через бажання демонструвати свою соціальну успішність. Ми вважаємо себе єдиним розумним видом на планеті, але продовжуємо подібно до павіанів міряться кольором своїх сідниць, використовуючи для цього речі, якими володіємо.

Іншим контраргументом є те, що розвиток космічних технологій у рази посилює наші спроможності запобігати завданню шкоди довкіллю та виправляти уже завдану шкоду. Багато речей, які внесені в сьогоднішній перелік найбільш актуальних проблем людства були б не достатньо досліджені, а можливо і невідомі повною мірою без космічних технологій.

Однак, найважливішим контраргументом є те що розвиток космічних технологій, астробіології і астроекології, як її частини, підвищують наші шанси на виживання. На сьогодні жоден вид на планеті не здатен побачити та усвідомити космічну загрозу, дослідити її, розробити план порятунку і втілити його у життя. Наша космічна експансія – це не лише шанс на виживання для людства, а й для усього живого на цій планеті.

## **Висновки.**

Астроекологію слід виокремлювати із астробіології, тому що вона вивчає зв'язки біосистем із навколишнім середовищем, як окремі явища, а не лише як окремі характеристики цих біосистем. Це дозволить визначити основні патерни зв'язку біоти із середовищем за межами Землі, що дасть нам нові екологічні теорії та очистить загальну екологію від «земного шовінізму».

Основними функціями сучасної астроекології є розширення сфери знань, що підвищить наші шанси на виживання; створення нових екологічних теорій та критичний аналіз старих; розкриття механізмів адаптації до позаземного середовища, що полегшить нашу космічну експансію і приготує до майбутнього контакту із позаземною біотою.

Загальна екологія повинна будуватися на основі теорій відфільтрованих астроекологією, тому що вона охоплює зв'язки із біотою в просторі більшому ніж одна планета.

Астроекологія збагачується знаннями отриманими в досліджуваному людиною космічному просторі та на нашій планеті. Під час використання знань, отриманих на Землі, відбувається двостороннє збагачення класичної земної екології та астроекології. Астроекологія сприяє прогресу екологічної науки та вдосконалює методи прикладної екології. Це стосується насамперед проблем відновлення порушених екосистем, екологічної медицини, екологічної безпеки та сільського господарства.

## **Література:**

- Benner, Steven A. (December 2010). "Defining Life". *Astrobiology*. 10 (10): 1021–1030.
- Bostrom, N., and Ćirković, M. (2011). *Global catastrophic risks*. Oxford: Oxford University Press.
- Charles S. Cockell, Toby Samuels, and Adam H. Stevens. *Habitability Is Binary, But It Is Used by Astrobiologists to Encompass Continuous Ecological Questions*. *Astrobiology*. 2022. VOLUME 22, ISSUE 1. P. 7–13
- Chon-Torres, O. A. (2018). *Astrobioethics*. *Int. J. Astrobiology* 17, 51–56.
- Christophe Malaterre, Cyrille Jeancolas, and Philippe Nghe. *The Origin of Life: What Is the Question?*. *Astrobiology*. Jul 2022. 851-862.

- Christopher E. Carr. Resolving the History of Life on Earth by Seeking Life As We Know It on Mars. *Astrobiology*. Jul 2022. 880-888.
- Cockell CS, Bush T, Bryce C, et al. (2016) Habitability: a review. *Astrobiology* 16: 89–117.
- Cockell CS, Harrison JP, Stevens AH, et al. (2019a) A low-diversity microbiota inhabits extreme terrestrial basaltic terrains and their fumaroles: implications for the exploration of Mars. *Astrobiology* 19:284–299.
- Cockell CS, Stevens AH, and Prescott R (2019b) Habitability is a binary property. *Nat Astron* 3:956–957.
- Gies D.R., Helsel J.W.. Ice age epochs and the sun's path through the galaxy *Astrophys. J.*, 626 (2) (2005), pp. 844-848
- Hall LS, Krausman PR, and Morrison ML (1997) The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin* 25:173–182.
- Heller R (2020) Habitability is a continuous property of nature. *Nat Astron* 4:294–295.
- Hoffmann AA, Chown SL, and Clusella-Trullas S (2013) Upper thermal limits in terrestrial ectotherms: how constrained are they? *Funct Ecol* 27:934–949.
- Lorenzo Carré, Giuseppe Zaccai, Xavier Delfosse, Eric Girard, and Bruno Franzetti. Relevance of Earth-Bound Extremophiles in the Search for Extraterrestrial Life. *Astrobiology*. Mar 2022. 322-367.
- Luca Lo Sapio. The ethics of astrobiology: Humanity's place in the cosmos and the extinction problem. *Front. Astron. Space Sci.*, 11 October 2022. Volume 9.
- Mausumi Dikpati, Paul S. Cally, Scott W. McIntosh & Eyal Heifetz. (2017) The Origin of the “Seasons” in Space Weather. *Scientific Reports*. volume 7,
- Medha Prakash, Jessica M. Weber, Jessica M. Weber, Laura E. Rodriguez, Rachel Y. Sheppard and Laura M. Barge. Database on mineral mediated carbon reduction: implications for future research. *International Journal of Astrobiology*, Volume 21, Issue 6, December 2022, pp. 423 - 440.
- Michael Noah Mautner. *The Purpose and Future of Life - The Science and Ethics of Seeding the Universe*. Legacy Books. 2004. 229 p.
- Michael R. Rampino, Ken Caldeira, Yuhong Zhual (2021). A pulse of the Earth: A 27.5-Myr underlying cycle in coordinated geological events over the last 260 Myr, *Geoscience Frontiers* Volume 12, Issue 6.
- New record in Government Space Defense spendings driven by investments in Space Security and Early Warning. <https://www.euroconsult-ec.com/press-release/new-record-in-government-space-defense-spendings-driven-by-investments-in-space-security-and-early-warning/>
- Niamh Burns and William T. Parsons. Astrophysical existential threats: a comparative analysis. *International Journal of Astrobiology*, Volume 21, Issue 6, December 2022, pp. 441 - 461.
- Octavio A. Chon-Torres. Astrobioethics. *International Journal of Astrobiology*, Volume 17, Issue 1, January 2018, pp. 51 - 56
- Oleksandr Harbar, Oleksandr Lavryk, Ivan Khomiak, Ruslana Vlasenko, Tamara Andriychuk, Vitaliy Kostyuk. Spatiotemporal analysis of the changes of the main habitats of the Kozachelcherska arena (Nyzhniodniprovsky sands, Kherson region, Ukraine) in the period of 1990–2020. *Auc Geographica*, 2023. 53. P. 64–73
- Ord, T. (2020). *The precipice. Existential risk and the future of humanity*. Oxford: Oxford University Press.
- Rampino M.R., Stothers R.B., Smoluchowski R., Bahcall J.N., Matthews M.S.. Geological periodicities and the Galaxy, *The Galaxy and the Solar System*, University of Arizona, Tucson (1986), pp. 241-259.
- Raup DM, Sepkoski JJ (1982). "Mass extinctions in the marine fossil record". *Science*. 215 (4539): 1501–1503.
- Robin M. Cesur, Irfan M. Ansari, Fei Chen, Benton C. Clark, and Mark A. Schneegurt. Bacterial Growth in Brines Formed by the Deliquescence of Salts Relevant to Cold Arid Worlds. *Astrobiology*. 2022. VOLUME 22, ISSUE 1. P. 104-115
- Schwartz, J. S. J. (2018). *The Ethics of space exploration*. Germany: Springer.

Shaviv J., Prokoph A., Veizer J. Is the solar system's galactic motion imprinted in the Phanerozoic climate? *Sci. Rep.*, 4 (2014), p. 6150

Svensmark H. Imprint of Galactic dynamics on Earth's climate *Astron. Nachricht.*, 327 (9) (2006), pp. 866-870

Vlasenko Ruslana, Khomiak Ivan, Harbar Oleksandr, Demchuk Nataliia (2020) Lumbricides as a bio-indicators of the influence of electrical transmission line in the conditions of Ukrainian Polissia. *Travaux du Muséum National d'Histoire Naturelle "Grigore Antipa"* (63 (1)). pp. 4-18.

Yukio Isozaki (2022) Paleozoic Extinctions in Cosmoclimateological Context: 'Non-Bolide' Extraterrestrial Causes for Global Chilling, *Paleontological Research* 27(1), 14-24

Ivan Khomiak, Oleksandr Harbar, Nataliia Demchuk, Iryna Kotsiuba, and Iryna Onyshchuk Above-ground phytomas dynamics in autogenic succession of an ecosystem. *Forestry ideas*, 2019, vol. 25, No 1 (57): 136–146.

Хом'як І. В. Історія екології : навчальний посібник. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2023. 310 с.

Хом'як І.В., Глобальні екологічні проблеми з точки зору астроекології. *Екологічні науки*. 2021, № 6 (39). С 154-157.

Черняєва О.П., Золенко І.С., Лещенко Д.Є., Хом'як І.В., Відновлення природної рослинності на порушених екотопах – основа для тератрансформаційних моделей // *Матеріали II всеукраїнської науково-практичної конференції «Українське Полісся: проблеми та тренди сучасного розвитку»*. Ніжин: НДУ ім. Гоголя, 2022. С. 56-59.