

АСТРОБІОЛОГІЯ: КОРОТКИЙ ІСТОРИЧНИЙ ЕКСКУРС, ЇЇ СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ В УКРАЇНІ

На сучасному етапі розвитку людської цивілізації стрімкий розвиток високотехнологічних космічних технологій, зростаючий науковий і комерційний інтерес до космосу та підвищена увага до фундаментальних питань про походження й майбутнє життя у Всесвіті вимагає формування нових наукових поглядів щодо розуміння феномена життя, виникнення біосфери та планетарної ролі людини у подальшій еволюції планети Земля. Сучасне суспільство активно шукає відповіді на довчні питання, пов'язані з тим, чи є наша біосфера єдиною формою життя у космосі, а також чи можливий контакт людини з позаземними формами життя й цивілізаціями. Пошуку цих відповідей сприяє така наука, як астробіологія. Метою цієї публікації є короткий огляд сучасного стану астробіології за публікаціями у провідних наукових журналах за останні десятиліття, а також аналіз потенціальних можливостей розвитку цієї науки в Україні.

Астробіологія як наука – це міждисциплінарна галузь, що досліджує питання про походження життя на Землі, як воно розвивалося на цій планеті протягом мільярдів років, його можливе існування за межами Землі, його можливі форми та способи існування, а також питання щодо умов для виникнення й розвитку життя у Всесвіті. Астробіологія досліджує життя як космічний феномен, що може існувати за межами Землі у різних формах, зокрема земних, доставлених космічними апаратами на інші планети. Основною метою астробіології є пошук і дослідження різних форм життя за межами Землі, а також вивчення існування земних форм життя в екстремальних умовах, наближених до умов відкритого космосу та екологічних умов на інших планетах Сонячної та інших зоряних систем. Важливим міждисциплінарним напрямом досліджень у сучасній астробіології є вивчення хімічного складу міжзоряного простору й хімічних процесів, що можуть призводити до утворення органічних молекул. Абіогенний синтез органічних сполук у космічному просторі може відбуватися в умовах край низьких температур, космічного вакууму й високих рівнів іонізуючої радіації. Теорія самозародження життя на планеті Земля припускає, що перші найпростіші живі організми виникли шляхом самоорганізації з органічних сполук, які утворювалися внаслідок їх абіогенного синтезу. На цей час експериментально доведена можливість абіогенного синтезу біологічно значущих органічних молекул. Але ідея самозародження життя, як молекулярно-інформаційного феномена, усе ще залишається гіпотетичною. Альтернативна теорія панспермії передбачає процес самозародження життя у космосі, наприклад на інших планетарних тілах, а на Землю живі організми потрапили з космічним пилом, кометами та астероїдами. Можливість того, що організми можуть пережити рух у космічному просторі, підтверджується деякими дослідженнями щодо стійкості певних видів організмів до екстремальних факторів відкритого космосу та екологічних умов на деяких планетах і супутниках, зокрема на Марсі, Енцеладі та інших космічних тілах. Важливим напрямом досліджень у сучасній астробіології є пошук біосигнатур, які можуть достовірно свідчити про наявність певних форм життя. Розвиток астробіології породжує ряд системних питань, що потребують також екологічного бачення стосовно можливості існування різних форм життя на інших планетах. Важливим питанням у астробіології є проблема впливу космічних чинників на земну біосферу та можливі біосфери інших планет. Ці фактори пов'язані в першу чергу з активністю зірок, навколо яких формуються планетарні системи. У зв'язку з активним розвитком космічних місій до планет Сонячної системи та їх супутників постало питання щодо можливості переносу земних форм життя на космічних зондах на інші планети, що у свою чергу породжує проблеми, пов'язані з астробіологічним "забрудненням" та етичною відповідальністю людської цивілізації за розповсюдження земних форм життя внаслідок контамінації космічних зондів. Окрему увагу в огляді приділено питанням підготовки висококваліфікованих спеціалістів у галузі астробіології в університетах і відповідних навчально-наукових центрах, зокрема на базі Астробіологічного центру Сполученого Королівства при Единбурзькому університеті. Обґрунтовується необхідність відкриття Міжнародного астробіологічного центру на базі Київського національного університету імені Тараса Шевченка спільно з Університетом Единбурга.

Астробіологія є новою міждисциплінарною і затребуваною наукою. Вона має свою власну наукову проблематику, методологію. Подальший розвиток цієї сфери знань вимагає залучення фахівців з різних природничих і гуманітарних сфер знань, яких треба готувати на основі нових міждисциплінарних освітніх навчальних курсів і програм підготовки бакалаврів, магістрів та докторів філософії.

Ключові слова: астробіологія, астроекологія, астробіологічні науково-навчальні центри.

Вступ

На сучасному етапі розвитку людської цивілізації стрімкий розвиток високотехнологічних космічних технологій, зростаючий науковий і комерційний інтерес до космосу та підвищена увага до фундаментальних питань

щодо походження життя та його майбутнє існування у Всесвіті вимагає докладання нових зусиль стосовно глибокого розуміння феномену життя, виникнення біосфери та планетарної ролі людини у подальшій еволюції планети Земля. Сучасне суспільство активно

шукає відповіді на довічні питання, пов'язані з тим, чи є наша біосфера єдиною формою життя у космосі, а також чи можливий контакт людини з позаземними формами життя й цивілізаціями. Пошуку цих відповідей сприяє така наука, як астробіологія.

Метою цієї публікації є короткий огляд сучасного стану астробіології за публікаціями у провідних наукових журналах за останні десятиліття, а також аналіз потенціальних можливостей розвитку цієї науки в Україні.

Результати

В історичному аспекті астробіологія – це нова наука, часовий відлік якої почався із середини ХХ ст. Хоча окремі дослідники доводять, що сучасна астробіологія сягає корінням у давні часи історії становлення наукової парадигми про Всесвіт (Nascimento-Dias, & Martinez-Frias, 2023). Але перехід від різноманітних гіпотез і філософських дискусій до наукових досліджень і космічних місій відбувся у другій половині ХХ ст. Він пов'язаний з активним розвитком космічних технологій, що потребували нових знань про вплив космічних факторів на технічні системи, стан здоров'я астронавтів, а також про умови тривалого перебування людини та інших живих істот у космосі. З часом, за результатами різних планетарних місій, постало питання щодо реальної можливості існування живих форм на інших планетах і супутниках у Сонячній системі. На сьогодні переважна більшість космічних програм і космічних місій включають дослідження, пов'язані з вивченням умов на планетах та їх супутниках, а також з пошуком маркерів (біосигнатур) життя.

Термін "астробіологія" виник на початку ХХ ст. Але певний час існували такі синоніми до цього терміну, як "екзобіологія" (наука про зовнішнє життя), ксенобіологія (наука про чужоземне життя). Нині термін астробіологія використовується для охоплення широкого кола наукових питань, які перебувають на стику між планетарними та біологічними науками, які охоплюють процес походження та еволюції життя на Землі, а також питання про те, чи існують випадки життя в іншому місці за межами Землі.

Астробіологія як наука – міждисциплінарна галузь, що досліджує питання про те, як виникло життя на Землі, як воно розвивалося у зв'язку з геосферою та про існування життя за межами Землі, його можливі форми та способи існування, а також питання стосовно умов виникнення і розвитку життя у Всесвіті. Астробіологія досліджує, чи дійсно життя як космічний феномен може існувати за межами Землі у різних формах, зокрема земних, які доставляються космічними апаратами на інші планети. Астробіологія з її науковими методами та унікальною міждисциплінарністю знаходиться в центрі цих досліджень, об'єднуючи знання біології, хімії, фізики, кліматології, геофізики, геології, астрономії та астрофізики. На сьогодні існує декілька провідних міжнародних наукових періодичних видань, на сторінках яких обговорюються результати досліджень і сучасні астробіологічні концепції та гіпотези. Серед них найвагомішими є "Astrobiology" (Mary Ann Liebert, Inc.), "International Journal of Astrobiology" (Cambridge University Press), "Frontiers in Astronomy and Space Sciences" (Frontiers Media S.A.) та інші.

Основна мета астробіології – вивчення походження, еволюції та поширення життя у Всесвіті (включаючи його майбутнє). Одним із ключових його питань є пошук і дослідження різноманітних форм життя за межами Землі, а також вивчення існування земних форм життя в екстремальних умовах, наближених до умов відкритої космосу та умов середовища на інших планетах Сонячної та інших зоряних систем.

Астробіологія має безпосереднє відношення до таких проблем сучасної біології, як вивчення походження та еволюції життя, його організації та космобіосферного поширення у Всесвіті. Основні питання, на які прагне відповісти астробіологія, такі:

- як зароджується, розвивається і поширюється життя;
- чи можливе життя в екстремальних умовах на інших планетах або супутниках;
- чи можуть живі організми витримувати умови відкритого космосу й потрапляти на інші планети у складі космічного пилу, метеоритів та астероїдів;
- які можуть бути маркери (біосигнатури) життя і яким чином ми можемо їх спостерігати;
- чи можуть і яким чином живі організми пристосовуються до екстремальних умов існування, подібних до тих, що існують на інших небесних тілах – планетах та їхніх супутниках, астероїдах, метеоритах і кометах;
- чи може відбуватись перенесення життя на інші планетарні тіла під час дослідницьких зусиль людини.

На цей час у астробіологічних дослідженнях можна виділити декілька основних аспектів.

Важливим міждисциплінарним напрямом у сучасній астробіології є дослідження хімічного складу міжзоряного простору та хімічних процесів, що можуть призводити до утворення органічних молекул. Ґрунтуючись на великому масиві астрофізичних даних, світова наукова спільнота вважає, що хімічна "конституція" Всесвіту є універсальною і, відповідно, хімічна еволюція у Всесвіті є одним із етапів його еволюції, під час якої відбувається утворення й поширення у космосі хімічних елементів та їх хімічних сполук з моменту Великого вибуху і до сьогодні. Згідно із сучасними уявленнями перші хімічні елементи сформувалися у перші хвилини після Великого вибуху шляхом первинного нуклеосинтезу. Це переважно водень (H) і гелій (He), а також у невеликій кількості літій (Li) і берилій (Be). Утворення зірок у процесі подальшої еволюції Всесвіту призвело до утворення в них більш важливих елементів, таких як карбон (C), нітроген (N) і кисень (O). Важкі елементи, включаючи залізо (Fe) і нікель (Ni), утворюються переважно у масивних зірках і вивільнюються в космічний простір під час вибухів наднових зірок. У хмарах міжзоряного газу та у дисках навколо молодих зірок формуються прості та більш складні органічні сполуки, що можуть бути молекулярними "цеглинками" для життя. Знайдено такі сполуки, як метан (CH₄), аміак (NH₃), ароматичні вуглеводні, прості амінокислоти та більш складні органічні сполуки. Утворенню органічних сполук сприяє ультрафіолетове випромінювання, космічні промені та інші фізичні чинники (Kaiser, & Balucani, 2002; Sandford et al., 2020).

Важливим є той факт, що утворення органічних сполук у космічному просторі може відбуватися в умовах вкрай низьких температур (Puzzarini, & Varone, 2020), що свідчить про можливе хімічне розмаїття у Всесвіті. Яскравим прикладом є Церера – карликова планета, що розташована в головному поясі астероїдів між орбітами Марса та Юпітера, на якій знайдено велику кількість органічних сполук як на її поверхні, так і під зовнішніми шарами планетарних порід (Rizos et al., 2024).

Абіогенний синтез біологічно значущих сполук є одним із ключових проблем сучасної астробіології. На сьогодні обговорюється і експериментально перевіряється принципова можливість абіогенного синтезу амінокислот і коротких пептидів (Frenkel-Pinter et al., 2020), нуклеотидів (Mahipal Yadav et al., 2020), фосфоліпідів (Fiore, Chieffo, & Lopez, 2022), порфіринів (Pleyer et al., 2022) та інших сполук.

Походження життя на Землі – це одна з найбільших фундаментальних проблем сучасної науки, яка залишається невирішеною. Нині обговорюються дві головні конкуруючі теорії, дослідники яких намагаються пояснити, як саме могло виникнути життя на нашій та інших планетах чи інших космічних тілах.

Першу теорію можна умовно назвати теорією самозародження життя або теорією біохімічної еволюції. Ця теорія припускає, що життя виникло шляхом самоорганізації з органічних сполук, які утворювалися внаслідок їх абіогенного синтезу, тобто за рахунок певних хімічних реакцій за первинних умов на Землі. Друга половина ХХ і початок ХХІ ст. пройшли під прапором активної верифікації цієї гіпотези. У лабораторних дослідженнях відтворювались умови, що існували на початку еволюції нашої планети. Коацерватні системи в експериментах Опаріна і Холдейна, Міллера та Урі стали класичними прикладами, що демонструють принципову можливість абіогенезу. Результати експериментів Міллера та Урі, які на цей час згадують навіть у шкільних підручниках, довели утворення амінокислот, азотистих основ та інших біологічно значущих сполук, які є елементарними "будівельними блоками" життя.

Наступним поштовхом у розвитку цієї гіпотези стали роботи Манфреда Ейгена (Eigen, 1971; Eigen, & Schuster, 1982), за які він отримав Нобелівську премію з хімії. Гіпотетична модель Ейгена пояснювала, як життя могло зародитися за допомогою коротких генетичних послідовностей, які, незважаючи на їх обмежену інформаційну ємність, могли ефективно відтворюватися за механізмом реплікації. Основними властивостями гіперциклів Ейгена є автокаталітична конкуренція, селективна поведінка, здатність використовувати мінімальну кінетичну перевагу, швидка еволюція у бік зростання інформаційної ємності, кінетичні механізми добору найефективніших варіантів. Таким чином математична модель гіперциклів пояснювала можливі шляхи виникнення конкурентної боротьби, природного добору й еволюційних механізмів, характерних для біологічних систем, організованих на основі генетично-метаболических гіперциклів.

Наступним важливим етапом розвитку теорії самозародження життя було відкриття каталітичної активності деяких форм РНК, що призвело до появи гіпотези РНК-світу (Lehto, & Karetnikov, 2005). Здатність рибозимів каталізувати прямі й побічні реакції стала важливим поясненням можливості виникнення та еволюції нових метаболических шляхів (Janzen et al., 2020). Обговорюються гіпотетичні шляхи виникнення та еволюції рибосом як РНК-протеїнових автокаталітичних систем (Bowman et al., 2020). Відповідно до гіпотези РНК-світу, гіперцикли на основі РНК могли відіграти ключову роль у переході від хімічних до біологічних процесів, а перші примітивні форми життя могли базуватися на молекулах РНК, які здатні не лише зберігати генетичну інформацію, але й виконувати каталітичні функції. Їхня подальша еволюція могла привести до виникнення генетичного коду. У науково-популярній літературі ця гіпотеза отримала назву *гіпотези РНК-життя*.

Не дивлячись на певні успіхи, теорія самозародження життя стикається з фундаментальною проблемою щодо виникнення механізмів, які забезпечують відповідність генетичного коду нуклеїнових кислот послідовності амінокислот у білкових ланцюгах. Фактично це є фундаментальним питанням про те, яким чином могла виникнути найпростіша молекулярно-інформаційна система, що існує і розвивається на основі закладеної програми, записаної у вигляді послідовності нуклео-

тидів. Така мінімальна інформаційна система має складатись із програмних інформаційних записів-алгоритмів, підсистем їхнього збереження, відтворення, читання, трансферу, обробки та алгоритмічної реалізації інформаційних записів у вигляді збірки функціональних елементів-конструкцій (молекулярних машин), що забезпечують роботу вищеперерахованих підсистем. Відсутність будь-якої підсистеми в такій молекулярно-інформаційній системі робить її нежиттєздатною. Тобто будь-яка теорія самозародження життя має пояснювати можливість одночасного виникнення всіх підсистем інформаційної системи в її мінімальній конфігурації. На жаль, на даному етапі розвитку науки маємо констатувати той факт, що розуміння шляхів стосовно вирішення цього ключового питання немає.

Друга точка зору щодо виникнення життя на Землі ґрунтується на ідеї, що життя, як космічний феномен, зародилося десь у космосі як закономірний результат еволюції Всесвіту, а на Землю воно було занесено з космічним пилом, на астероїдах і метеоритах. У розгорненому вигляді ця ідея представлена теорією панспермії (Burchell, 2004), яка має давні історичні коріння (Temple, 2007). Слабкою стороною гіпотези є невизначеність щодо питання появи життя у космосі. Ця теорія все ж вимагає пояснень стосовно виникнення феномена життя у контексті процесів, описаних тут вище. Але результати сучасних експериментів у межах наземних досліджень, в яких імітували умови відкритого космосу або умови на інших планетах (Lorenz et al., 2022; Rzymiski et al., 2022), а також космічних місій, що передбачали тривале перебування мікроорганізмів в умовах відкритого космосу (Mancinelli, 2015), доводять, що мікроорганізми можуть виживати в космосі, але час їх виживання не такий великий, щоб подолати великі міжзор'яні відстані. Однак, у зв'язку з активним розвитком космічних місій, набуває неабияку актуальність питання про перенесення земної мікрофлори на інші планети й космічні тіла Сонячної системи на космічних зондах (Carte et al., 2024). Отже, констатуємо той факт, що теорія панспермії має окремих прихильників, але залишається вкрай дискусійною.

У зв'язку з вибуховим розвитком космічних досліджень, інформаційних технологій і технологій штучного інтелекту в сучасній біології та астробіології як ніколи гостро стоїть проблема щодо розуміння феномена життя та його головних ознак. Яке життя ми знаємо? Яке життя ми шукаємо на інших планетах? На цей час ми розуміємо, що знаємо тільки земні форми життя, причому остаточного системного розуміння цього феномена до сих пір бракує. Тому все ще тривають дискусії навколо цього (Malaterre, Jeancolas, & Nghe, 2022; Smith, 2016; Carr, & Rees, 2003). Аналіз дискусії з цієї проблеми, що продовжує точитися до сьогодні, свідчить про те, що це питання залишається на теренах природничої філософії, теоретичних ідей, гіпотез і здогадок (Colo'n-Santos et al., 2024).

Чи є принципово інші альтернативні форми життя на Землі окрім тих що ми знаємо? Чи є життя унікальним явищем Землі, чи універсальним процесом у Всесвіті? А чи дійсно всі наші космічні програми можуть дати відповідь на питання про те, яке життя шукаємо? Чи є якісь інші альтернативні форми життя на інших планетах? Такі питання активно обговорюються на шпальтах наукових журналів із астробіологічної тематики (Cleveland, & Copley, 2005; McKay, 2020).

Аналіз різних думок свідчить, що ми обов'язково маємо розглядати можливість "альтернативних форм

життя", які можуть базуватися на інших хімічних основах (напр., заміна води на метан чи вуглецю на кремній), що суттєво розширює межі розуміння сутності феномена життя (Gobato et al., 2022; Petkowski, Bains, & Seager, 2020; Kan et al., 2016).

Перераховані вище проблеми свідчать про велику складність їх розв'язання. Що ми маємо шукати? Яким чином маємо це робити? Отримати відповіді на ці питання нам допомагають технології пошуку так званих біосигнатур. Визначення біосигнатур і розробка нових методів пошуку життя є окремою проблемою в астробіології. Тут важливим напрямом є визначення ключових ознак, які могли б указати на існування життя на інших планетах або в космічному просторі (Schwieterman, Kiang, & Parenteau, 2018).

Біосигнатури – це хімічні, фізичні або біологічні ознаки, які вказують на наявність або присутність у минулому життя. На цей час головними біосигнатурами є:

- хімічні біосигнатури: специфічні молекули або хімічні елементи, такі як метан, кисень, озон та інші органічні й неорганічні молекули, що продукуються живими організмами або входять до їх складу (Lukas Pleyer, Strasdeit, & Fox, 2022; Houtkooper, & Schulze-Makuch, 2007);
- фізичні біосигнатури: певні типи скельних утворень або мінералів, які можуть бути створені тільки живими організмами (Banfield et al., 2001);
- геологічні структури біологічного походження: мікроскопічні залишки або сліди життя, які збереглися у геологічних породах і свідчать про певну активність біологічних процесів. Вони є важливими підтвердженнями еволюції життя на Землі та можуть свідчити про існування життя на інших планетах (Wickramaratna, 2021).

Останнім часом усе частіше піднімається питання щодо цивілізаційних сигнатур, які можуть вказувати на існування технологічно розвинених цивілізацій на інших планетах. Вони є розширенням пошуку біосигнатур, але фокусуються на штучних феноменах, які можуть бути створені високорозвиненими технологічними соціальними спільнотами. Це може бути штучний електромагнітний фон у діапазоні від радіочастот до світлових імпульсів, продукція тепла від споруд і технологічних систем, штучні атмосферні аномалії, аномалії у динаміці планет і світіння зірок у зоряних системах тощо (Annis, 1999; Lingam, & Loeb, 2021; Fischer et al., 2022).

На цей час розглядаються різні стратегії та методи пошуку біосигнатур на інших планетах за допомогою роботизованих досліджень, включаючи вже розгорнені, а також ті, що розробляються для польотів і майбутніх місій. Пропонуються також стратегії для дистанційних спостережень за допомогою поточних і майбутніх земних та космічних телескопів. Переважна більшість біо-і техносигнатурних методів ґрунтується на спектральних характеристиках поглинання й випромінювання електромагнітних хвиль у різних енергетичних діапазонах. Покращення нашого розуміння біосигнатур та розробки нових методів на Землі сприятиме зусиллям з виявлення життя на інших планетах (Chou, Grefenstette, & Borges, 2024).

Проблема пошуку біосигнатур щільно пов'язана з багатьма міждисциплінарними питаннями. Аналіз літератури свідчить, що пошук життя в нашій Сонячній системі поки базується на нашому розумінні земних форм життя та пов'язаних з ними біосигнатур. Наприклад, гомохіральність, тобто переважання L-амінокислот і D-цукрів, є важливою ознакою життя на Землі. Вияв-

лення надлишків цих хіральних молекул може вказувати на існуюче або вимерле життя в іншому світі. Однак, наприклад, метеорити містять позаземні амінокислоти та цукрові кислоти з хіральністю, подібною до земної, що ускладнює використання хіральної асиметрії як біосигнатури. Таким чином маємо переглядати поточні знання про амінокислоти та цукри у метеоритах і пропонувати нові критерії для майбутніх місій з виявлення життя, щоб визначити походження хіральної асиметрії. (Glavin et al., 2020; Franqueria et al., 2022).

Окремим і важливим питанням у сучасній астробіології є дослідження виживання земних живих організмів у екстремальних умовах. У зв'язку з цим астробіологію часто порівнюють з біологією екстремофілів. Екстремофіли – це земні організми, які живуть з нашої точки зору в дуже складних екстремальних умовах навколишнього середовища. Такі організми в астробіології розглядають як біологічні моделі можливого позаземного життя – у міжзоряному просторі та на інших планетах, планетоїдах, кометах і метеоритах. Серед екстремальних факторів, які можуть діяти на живі організми у космосі, розглядають високі рівні іонізуючої радіації, вкрай низький або високий атмосферний тиск, нехарактерний для умов на поверхні Землі, хімічний склад поверхні й гірських порід планет та їх атмосфери, низькі температури, невагомість тощо.

Пошук відповідей на питання про межі життя та його здатність виживати та розмножуватися в екстремальних умовах вимагає проведення спеціальних досліджень у лабораторіях, де вивчають виживання живих організмів у штучно відтворених відповідних екстремальних умовах. Такі дослідження проводять з використанням переважно представників бактеріального світу (Robinson, & McQuaig, 2022). Дуже важливими є дослідження впливу умов відкритого космосу на різні мікроорганізми, які проводили на Міжнародній космічній станції, такі як галофільні цианобактерії *Halorubrum chaoviator* (Mancinelli, 2015), *Bacillus subtilis* (Panitz et al., 2015), *Trichoderma longibrachiatum* (Neuberger et al., 2015) та інші. Результати цих експериментів свідчать, що експозиція мікроорганізмів протягом як короткого (дні – тижні), так і довготривалого терміну (до двох років) не призводить до тотальної загибелі бактеріальних популяцій. Певна частина мікробної популяції все одно залишається життєздатною. Це підтверджується і модельними експериментами, що проводились у лабораторіях (Olsson-Francis, Watson, & Cockell, 2013; Lorenz et al., 2022). Отримання нових знань щодо стійкості окремих земних форм життя до умов на інших планетах і відкритого космосу набуває особливого значення у зв'язку з активним розвитком космічних наукових і комерційних програм (Prasad et al., 2021).

Останнім часом різними дослідницькими групами проведено серію досліджень з виживаності мікроорганізмів в умовах, характерних для поверхні Марса (Al Soudi et al., 2017; Rzymiski et al., 2022). Показано, що окремі види земних мікроорганізмів можуть існувати в умовах такого вкрай агресивного хімічного оточення й низького атмосферного тиску (Rzymiski et al., 2022). Якщо це дійсно так, то для подальшого дослідження цієї проблеми потрібно враховувати весь комплекс планетарних умов для життя на Марсі. У зв'язку з цим виникає потреба у біоекологічному баченні щодо можливості існування різних форм життя на Марсі та колонізації цієї планети людиною (Meuger, Naqq-Misra, & de Souza Mendonça, 2024). Це є вкрай актуальним також при вивченні інших планет Сонячної системи та

таких їхніх супутників, як Енцелад (Roche et al., 2023) та інші. Варто звернути увагу і на той факт, що ареною астробіології є також дослідження планет у далекому космосі у зонах, потенційно придатних для життя. Відкриття екзопланет прискорилося за останнє десятиліття і ця тенденція набирає обертів завдяки принципово новим обсерваторіям і методам спостереження у космосі (Extance, 2024). Для визначення потенційної придатності планети до життя важливо розуміти різні фактори та процеси. Кліматичні моделі, які давно застосовуються до Землі, тепер використовуються і для екзопланет, допомагаючи зрозуміти, як орбітальні, поверхневі й атмосферні властивості впливають на клімат і придатність для життя (Shields, 2019).

Не менш складним питанням в астробіології є проблема впливу космічних факторів на земну біосферу й потенційно можливі біосфери інших планет. Це пов'язано, у першу чергу, з активністю зірок, навколо яких формуються планетарні системи. Комплекс цих чинників називають космічною погодою. У контексті астробіології, яка розглядає довготривалі впливи, імовірно, треба говорити не про погоду, а про космічний клімат. Ці тривалі динамічні фактори надають системного впливу на різні планетарні оболонки планет – атмосферу, гідросферу, літосферу, а також біосферу, якщо остання існує на планеті (Airapetian, et al 2020). Ця проблема поки що найбільш вивчена на прикладі сонячно-земних зв'язків (Buzulukova, Bruce, & Tsurutani, 2022; Marinho, Paulucci, & Galante, 2014; Zarrouk, & Vennaseur, 2009). Всі ці аспекти зоряно-планетарних зв'язків є важливими у контексті астробіології.

Ще один важливий аспект астробіології – це можливість перенесення земних форм життя на космічних зондах на інші планети Сонячної системи під час космічних місії (Burchell, 2004). А це, у свою чергу, ставить перед людством черговий виклик стосовно астробіологічного "забруднення" шляхом перенесення земних мікроорганізмів (Carte et al., 2024a; Carte et al., 2024b) і вірусів (Pavletic' et al., 2022) різними космічними апаратами.

Яскравим прикладом палкої дискусії щодо поширення життя у космічному просторі та біозабруднення космічних об'єктів земною мікрофлорою є ситуація навколо зразка з вуглецевого астероїду Рюгу, доставленого на землю японським зондом у рамках місії Хаябуса-2. У структурі зразка спостерігали різноманітні нитки органічної природи, які мають розміри та морфологію мікроорганізмів. Цей факт розглядали як доказ існування мікроорганізмів на вуглецевих метеоритах і, відповідно, підтвердження гіпотези панспермії. Але виявилось, що велика кількість ниток змінюється з часом; зростання та зменшення популяції прокаріотів відбувалось із часом генерації приблизно 5 дб. Більш детальні дослідження показали, що, не дивлячись на всі заходи стерильності, мікроорганізми у метеоритному зразку виявились результатом звичайного біологічного забруднення (Genge et al., 2024). Здається, що у цій дискусії поставлена крапка і ніяких мікроорганізмів у космічному просторі не існує. Однак ці дослідження доводять дуже важливий факт, що наземна біота може швидко колонізувати позаземні космічні об'єкти, навіть якщо вжити певних запобіжних заходів щодо контролю забруднення.

Отже, швидка колонізація зразка земною мікробіотою підкреслює, що позаземна органічна речовина може бути джерелом для пластичного й енергетичного метаболізму макроорганізмів, у тому числі й на інших планетах (Waajen et al., 2024). Окрім того, певна стійкість мікроорганізмів до умов відкритого космосу,

яка експериментально доведена, залишає дискусію про існування живих форм у космосі й панспермію відкритою. А це, у свою чергу, ставить етичні питання стосовно відповідальності людської цивілізації за поширення земних форм життя внаслідок контамінації космічних зондів, які ми відправляємо на інші планети, та їхні супутники. Тобто проблеми астробіозабруднення і майбутньої колонізації планет породжують важливі етичні питання. Одне з головних полягає у тому, чи повинні люди ставитися до передбачуваного позаземного життя й перенесення земних форм життя з біоцентричної чи антропоцентричної позиції щодо розширення власного людського простору існування на інших планетах (Chon-Torres, 2018; Chon-Torres et al., 2024; Peters, 2018). У майбутньому людська цивілізація буде вирішувати і такі важкі питання.

Підсумовуючи усе вищенаведене, маємо констатувати, що астробіологія, як міждисциплінарна наука, активно розвивається і на цей час є затребуваною у різних сферах практичної діяльності людини, пов'язаних з дослідженнями й освоєнням ближнього космосу. У межах одного короткого літературного огляду неможливо розглянути всі питання, що стосуються цієї сфери знань і навколо неї, включаючи космічне право, політику країн у галузі космічних технологій тощо. Тим не менш важливо зазначити ще один аспект, який стосується освітньої діяльності.

Активний розвиток у космічній сфері з боку державного та приватного секторів, а також досягнення синтетичної біології, біологічної інженерії та астробіології відкривають нові можливості не лише для наукових досліджень, але й для створення захоплюючих навчальних матеріалів, що використовують важливі наукові досягнення для навчання міждисциплінарного типу, готуючи нове покоління вчених, космічних інженерів та фахових експертів у галузі астробіології.

В останні десятиліття у провідних країнах світу активно розроблялись і впроваджувались на академічному, державному й інституційному рівнях офіційні освітні програми з астробіології, (Styczinski et al., 2024). Серед таких варто згадати University of Washington Astrobiology Program (USA), Master's program in Astrobiology and Planetary Sciences (University of Edinburgh, UK), Canadian Astrobiology Training Program (Canada), Florida Institute of Technology Astrobiology Degree Program (USA), International Space University Master of Space Studies Program (France) та інші. Більш детальну інформацію про понад два десятки провідних освітніх установ, де здійснюється навчання і проводяться наукові дослідження з астробіології, можна знайти за посиланням (Styczinski et al., 2021).

Створення освітніх програм потребує широких знань і міждисциплінарного досвіду. Через міждисциплінарний характер цієї галузі, кар'єрні шляхи в астробіології часто починаються в інших сферах знань, таких як астрономія, геологія, біологія, біотехнологія, екологія. Поява астробіології сприяла тісній співпраці фахівців з різних освітніх галузей для розробки навчальних курсів з астробіології. З іншого боку, підготовка фахівців з астробіології вимагає створення відповідних навчально-методичних центрів і навчально-наукових лабораторій.

Як приклад успішної реалізації цього освітнього напрямку можна навести досвід в Единбурзькому університеті, де створено курс для бакалаврів "Астробіологія", який об'єднує студентів із 12-ти факультетів та щоразу має бути обмежений 200 студентами через свою популярність. А в Університеті Вашингтону протягом

останніх 20-ти років здійснюється підготовка магістрів і докторів філософії з астробіології.

В Україні розвиток астробіології тільки починається. Держава має певний потенціал для цього, пов'язаний з академічними науково-дослідними інститутами та університетами, які можуть бути залучені для розвитку цієї галузі знань. Серед науково-дослідних установ Національної академії наук України варто згадати такі, як Головна астрономічна обсерваторія, Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного, Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного, Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, Інститут проблем кріобіології і кріомедицини Національної академії наук України та інші.

В освітній і науковій сферах провідні університети України можуть стати важливими центрами з розвитку астробіології як міждисциплінарної галузі знань. Саме класичні університети, де можливе поєднання освітньої та наукової діяльності у різних галузях, мають стати головними центрами. Такою установою в Україні може стати Київський національний університет імені Тараса Шевченка, у якому є всі передумови для розвитку цієї науки. Першим кроком може бути організація Міжнародного науково-освітнього астробіологічного центру, до складу якого має входити науково-дослідна лабораторія. Це також потребує стратегічного підходу до інтеграції власних наукових, освітніх та інфраструктурних власних ресурсів і можливостей інших установ, зацікавлених у створенні такого міждисциплінарного центру з астробіології. Зокрема, Київський національний університет імені Тараса Шевченка має висококваліфікованих фахівців у галузях біології, медицини, хімії, фізики, астрономії та геології, які можуть забезпечувати освітній процес і брати участь у наукових дослідженнях. Існує досвід попередніх досліджень у суміжних напрямках з біології, екології, астрономії, астрофізики, планетології.

В освітньо-науковому підрозділі університету Навчально-науковому центрі "Інститут біології та медицини" існує відповідний простір для створення окремої науково-дослідної лабораторії з астробіології, адаптованої для роботи з біологічними об'єктами і зразками, хімічними речовинами та фізичними впливами. Освітня складова представлена потужною базою для навчання студентів і аспірантів, які зацікавлені в астробіології як міждисциплінарній галузі науки. Високий фаховий рівень викладачів є запорукою успішної розробки нових спеціальних міждисциплінарних курсів і освітніх програм з астробіології. Широкі міжнародні зв'язки сприятимуть розвитку цього напрямку діяльності та участі у міжнародних грантах, орієнтованих на вивчення космосу та його впливу на життя. Лабораторія астробіології має стати міжнародним центром міждисциплінарних досліджень із проблем астробіології та астроекології та сприяти розвитку фундаментальної науки й співпраці на міжнародному рівні.

Важливо звернути увагу на те, що з ініціативою створення Міжнародного астробіологічного центру і відповідної науково-дослідної лабораторії в Україні виступив Університет Единбургу, де подібний науковий підрозділ давно створений і успішно працює. Заснування Міжнародного міждисциплінарного центру з астробіології у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка з партнерською участю Центру астробіології Університету Единбургу (Велика Британія) та інших зацікавлених установ і організацій має стати унікальним майданчиком для навчання, досліджень та міжнародної співпраці студентів і науковців у галузі астробіології та суміжних сфер діяльності.

Першими кроками діяльності такого Центру може бути розробка та впровадження навчальних курсів з астробіології та планетарних наук для бакалаврів і магістрів різних спеціальностей з урахуванням специфіки освітніх галузей. Досвід із проведення наукових досліджень студенти отримуватимуть у астробіологічній лабораторії. А у разі набуття популярності й затребуваності астробіології в Україні наступним кроком може стати відкриття відповідних міждисциплінарних освітніх програм, які передбачають використання інфраструктури та кадрового потенціалу не тільки Київського національного університету, але й інших партнерів Центру, включаючи студентів, аспірантів і дослідників з інститутів Національної академії наук України. Особливий акцент має бути зроблений на фахову підготовку, корисну для загального розвитку державного і приватного космічного сектора України. Безперечно, одним із найважливіших напрямів діяльності Центру мають стати наукові дослідження у кооперації з міжнародними партнерами. Наукові проєкти можуть бути присвячені як вивченню окремих проблем астробіології, так і розробці й реалізації наукових космічних місій із залученням студентів бакалаврату, магістрату та аспірантури.

На цей час є певні обнадійливі передумови. Зокрема, у 2019 та 2021 рр. Единбурзьким університетом разом зі спеціалістами з України реалізована спільна місія з астробіології, а саме на Міжнародній космічній станції було проведено дослідження із впливу мікрогравітації на мікробний видобуток елементів з гірських порід за допомогою обладнання, розробленого разом з ESA. Другий політ на космічну станцію став можливим завдяки комерційному маршруту 'Bioreactor Express', організованому компанією Kayser Space Ltd, яка надала допомогу в розробці відповідного космічного обладнання. Існують певні можливості щодо продовження спільних наземних експериментів та експериментів на МКС за допомогою обладнання, розробленого в Університеті Единбургу та інших космічних зондів у майбутньому.

Реальність поглиблення співпраці у сфері науки та освіти політично підкріплюється на самому високому державного рівня. У січні 2025 р. Україна та Сполучене Королівство Великої Британії та Північної Ірландії підписали Угоду про сторічне партнерство, яка передбачає дев'ять ключових напрямів діяльності, у тому числі у сфері освіти, науки і новітніх технологій. Це відкриває додаткові можливості для поглиблення співпраці у галузі астробіології та космічної біології між Україною та Великою Британією.

Дискусія і висновки

Отже констатуємо, що астробіологія є новою міждисциплінарною і затребуваною наукою. Вона має свою власну наукову проблематику і методологію, пов'язану з діяльністю людини у космосі. Подальший розвиток цієї сфери знань вимагає залучення фахівців з різних природничих і гуманітарних сфер знань, яких треба готувати на основі нових міждисциплінарних освітніх навчальних курсів і програм підготовки бакалаврів, магістрів та докторів філософії.

Внесок авторів: Віктор Мартинюк – концептуалізація, огляд літератури, написання основного тексту, Чарльз Кокелл – обговорення проблеми, редагування, підготовка англійського резюме.

Список використаних джерел

Airapetian, V. S., Barnes, R., Cohen, O., Collinson, G. A., Airapetian, V. S., Barnes, R., Cohen, O., Collinson, G. A., Danchi, W. C., Dong, C. F., Del Genio, A. D., France, K., Garcia-Sage, K., Glocer, A., Gopalswamy, N.,

- Grenfell, J. L., Gronoff, G., Güdel, M., Herbst, K., Henning, W. G., Jackman, C. H., Jin, M., Johnstone, C. P., ... & Yamashiki, Y. (2020). Impact of space weather on climate and habitability of terrestrial-type exoplanets. *International Journal of Astrobiology*, 19(2), 136–194. <https://doi.org/10.1017/S1473550419000132>
- Al Soufi, A. F., Farhat, O., Chen, F., Benton, C., Clark, B. C., & Schneegurt, M. A. (2017). Bacterial growth tolerance to concentrations of chlorate and perchlorate salts relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*, 16(3), 229–235. <https://doi.org/10.1017/S1473550416000434>
- Annis, J. (1999). Placing a limit on star-fed Kardashev type III civilisations. *Journal of the British Interplanetary Society*, 52(1), 33–36.
- Banfield, J. F., Moreau, J. W., Chan, C. S., Welch, S. A., & Little, B. (2001). Mineralogical biosignatures and the search for life on Mars. *Astrobiology*, 1(4), 447–465. <https://doi.org/10.1089/153110701753593856>
- Bowman, J. C., Petrov, A. S., Frenkel-Pinter, M., Penev, P. I., & Williams, L. D. (2020). Root of the tree: The significance, evolution, and origins of the ribosome. *Chemical Reviews*, 120(11), 4848–4878. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00742>
- Burchell, M. J. (2004). Panspermia today. *International Journal of Astrobiology*, 3(2), 73–80. <https://doi.org/10.1017/S147355040002113>
- Buzulukova, N., & Tsurutani, B. (2022). Space weather: From solar origins to risks and hazards evolving in time. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, Article 1017103. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.1017103>
- Carr, B. J., & Rees, M. J. (2003). Fine-tuning in living systems. *International Journal of Astrobiology*, 2(2), 79–86. <https://doi.org/10.1017/S1473550403001472>
- Carte, M. E., Chen, F., Clark, B. C., & Schneegurt, M. A. (2024a). Succession of the bacterial community from a spacecraft assembly clean room when enriched in brines relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*, 23, Article e5. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000277>
- Carte, M. E., Gandikota, S., Chen, F., Clark, B. C., & Schneegurt, M. A. (2024b). Succession of the fungal community of a spacecraft assembly clean room when enriched in brines relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*, 23, Article e15. <https://doi.org/10.1017/S1473550424000090>
- Chon-Torres, O. A. (2018). Astrobioethics. *International Journal of Astrobiology*, 17(1), 51–56. <https://doi.org/10.1017/S1473550417000064>
- Chon-Torres, O. A., Chela-Flores, J., Dunér, D., Persson, E., Milligan, T., Martínez-Frías, J., Losch, A., Pryor, A., & Murga-Moreno, C. A. (2024). Astrobiocentrism: Reflections on challenges in the transition to a vision of life and humanity in space. *International Journal of Astrobiology*, 23, Article e6. <https://doi.org/10.1017/S1473550424000016>
- Chou, L., Grefenstette, N., & Borges, S. (2024). Chapter 8: Searching for life beyond Earth. *Astrobiology*, 24(S1), S149–S167. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0104>
- Cleland, C. E., & Copley, S. D. (2005). The possibility of alternative microbial life on Earth. *International Journal of Astrobiology*, 4(3–4), 165–173. <https://doi.org/10.1017/S147355040500279X>
- Colón-Santos, S., Vázquez-Salazar, A., Adams, A., Colón-Santos, S., Vázquez-Salazar, A., Adams, A., Campillo-Balderas, J. A., Hernández-Morales, R., Jácome, R., Muñoz-Velasco, I., Rodríguez, L. E., Schaible, M. J., Schaible, G. A., Szeinbaum, N., Thweatt, J. L., & Trubl, G. (2024). Chapter 2: What is life? *Astrobiology*, 24(S1), S24–S41. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0116>
- DasSarma, P., Laye, V. J., Harvey, J., Reid, C., Shultz, J., Yarborough, A., Lamb, A., Koske-Phillips, A., Herbst, A., Molina, F., Grah, O., Phillips, T., & DasSarma, S. (2017). Survival of halophilic Archaea in Earth's cold stratosphere. *International Journal of Astrobiology*, 16(4), 321–327. <https://doi.org/10.1017/S1473550416000410>
- De Sanctis, M. C., Baratta, G. A., Brucato, J. R., De Sanctis, M. C., Baratta, G., Brucato, J. R., Castillo-Rogez, J. C., Ciarniello, M., Cozzolino, F., De Angelis, S., Ferrari, M., Fulvio, D., Germanà, M., Mennella, V., Pagnoscin, S., Palumbo, M. E., Poggiali, G., Popa, C., Raponi, A., Scirè, C., Strazzulla, G., & Urso, R. G. (2024). Recent replenishment of aliphatic organics on Ceres from a large subsurface reservoir. *Science Advances*, 10(39), Article eadp3681. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp3681>
- Eigen, M. (1971). Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Die Naturwissenschaften*, 58(10), 465–523. <https://doi.org/10.1007/BF00623322>
- Eigen, M., & Schuster, P. (1982). Stages of emerging life – Five principles of early organization. *Journal of Molecular Evolution*, 19(1), 47–61. <https://doi.org/10.1007/BF02100223>
- Extance, A. (2024). How the James Webb Space Telescope is revealing the weather and chemistry on planets around other stars. *ACS Central Science*, 10(7), 1307–1310. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.4c00820>
- Fischer, D., Sheffield, A., Tan, J., Ling, L., & Zhao, C. (2022). Technosignatures. *Astrobiology*. <https://pressbooks.cuny.edu/astrobiology/chapter/technosignatures/>
- Fiore, M., Chieffo, C., & Lopez, A. (2022). Synthesis of phospholipids under plausible prebiotic conditions and analogies with phospholipid biochemistry for origin of life studies. *Astrobiology*, 22(5), 598–616. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0059>
- Franqueria, M., Raut, A., Devi, A., & Pandit, S. (2022). *New methodologies in the search for life: Final report*. International Space University Space Studies Program. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25712.94727>
- Frenkel-Pinter, M., Samanta, M., Ashkenasy, G., & Leman, L. J. (2020). Prebiotic peptides: Molecular hubs in the origin of life. *Chemical Reviews*, 120(11), 4707–4765. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00664>
- Genge, M. J., Almeida, N., Van Ginneken, M., Pinault, L., Preston, L. J., Wozniakiewicz, P. J., & Yano, H. (2024). Rapid colonization of a space-returned Ryugu sample. *Meteoritics & Planetary Science*, 60(1), 64–73. <https://doi.org/10.1111/maps.14288>
- Glavin, D. P., Burton, A. S., Elsila, J. E., Aponte, J. C., & Dworkin, J. P. (2020). The search for chiral asymmetry as a potential biosignature in our solar system. *Chemical Reviews*, 120(11), 4660–4689. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00474>
- Gobato, R., Heidari, A., Mitra, A., & Valverde, L. F. (2022). The possibility of silicon-based life. *Bulletin of Pure & Applied Sciences-Chemistry*, 41(1), 52–58. <https://doi.org/10.5958/2320-320X.2022.00007.3>
- Houtkooper, J. M., & Schulze-Makuch, D. (2007). A possible biogenic origin for hydrogen peroxide on Mars: The Viking results reinterpreted. *International Journal of Astrobiology*, 6(2), 147–152. <https://doi.org/10.1017/S1473550407003746>
- Janzen, E., Blanco, C., Peng, H., Kenchel, J., & Chen, I. A. (2020). Promiscuous ribozymes and their proposed role in prebiotic evolution. *Chemical Reviews*, 120(11), 4879–4897. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00620>
- Jennifer Kan, S. B., Lewis, R. D., Chen, K., & Arnold, F. H. (2016). Directed evolution of cytochrome c for carbon–silicon bond formation: Bringing silicon to life. *Science*, 354(6315), 1048–1051. <https://doi.org/10.1126/science.aah6219>
- Kaiser, R. I., & Balucani, N. (2002). Astrobiology – The final frontier in chemical reaction dynamics. *International Journal of Astrobiology*, 1(1), 15–23. <https://doi.org/10.1017/S1473550402001015>
- Kelly, C. S. (2016). Life is hard: Countering definitional pessimism concerning the definition of life. *International Journal of Astrobiology*, 15(4), 277–289. <https://doi.org/10.1017/S1473550416000021>
- Lehto, K., & Karetnikov, A. (2005). Relicts and models of the RNA world. *International Journal of Astrobiology*, 4(1), 33–41. <https://doi.org/10.1017/S1473550405002521>
- Lingam, M., & Loeb, A. (2020). What's in a name: The etymology of astrobiology. *International Journal of Astrobiology*, 19(6), 489–495. <https://doi.org/10.1017/S1473550420000154>
- Lingam, M., & Loeb, A. (2021). *Life in the cosmos: From biosignatures to technosignatures*. Harvard University Press.
- Lorenz, C., Bianchi, E., Benesperi, R., Loppi, S., Papini, A., Poggiali, G., & Brucato, J. R. (2022). Survival of *Xanthoria parietina* in simulated space conditions: Vitality assessment and spectroscopic analysis. *International Journal of Astrobiology*, 21(3), 137–153. <https://doi.org/10.1017/S1473550422000076>
- Lukas Pleyer, H. L., Strasdeit, H., & Fox, S. (2018). A possible prebiotic ancestry of porphyrin-type protein cofactors. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 48(3), 347–371. <https://doi.org/10.1007/s11084-018-9567-4>
- Mahipal Yadav, M., Kumar, R., & Krishnamurthy, R. (2020). Chemistry of abiotic nucleotide synthesis. *Chemical Reviews*, 120(11), 4766–4805. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00546>
- Malaterre, C., Jeancolas, C., & Nghe, P. (2022). The origin of life: What is the question? *Astrobiology*, 22(7), 851–862. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0162>
- Mancinelli, R. L. (2015). The effect of the space environment on the survival of *Halorubrum chaoviator* and *Synechococcus* (Nägeli): Data from the space experiment OSMO on EXPOSE-R. *International Journal of Astrobiology*, 14(1), 123–128. <https://doi.org/10.1017/S147355041400055X>
- Marinho, F., Paulucci, L., & Galante, D. (2014). Propagation and energy deposition of cosmic rays' muons on terrestrial environments. *International Journal of Astrobiology*, 13(4), 319–323. <https://doi.org/10.1017/S1473550414000160>
- McKay, C. P. (2020). What is life – And when do we search for it on other worlds. *Astrobiology*, 20(2), 163–166. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2136>
- Meurer, J. C., Haqq-Misra, J., & de Souza Mendonça, M. (2024). Astroecology: Bridging the gap between ecology and astrobiology. *International Journal of Astrobiology*, 23, Article e3. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000265>
- Nascimento-Dias, B. L., & Martínez-Frías, J. (2023). Brief review about history of astrobiology. *International Journal of Astrobiology*, 22(1), 67–78. <https://doi.org/10.1017/S1473550422000386>
- Neuberger, K., Lux-Endrich, A., Panitz, C., & Horneck, G. (2015). Survival of spores of *Trichoderma longibrachiatum* in space: Data from the space experiment SPORES on EXPOSE-R. *International Journal of Astrobiology*, 14(1), 129–135. <https://doi.org/10.1017/S1473550414000408>
- Olsson-Francis, K., Watson, J. S., & Cockell, C. S. (2013). Cyanobacteria isolated from the high-intertidal zone: A model for studying the physiological prerequisites for survival in low Earth orbit. *International Journal of Astrobiology*, 12(4), 292–303. <https://doi.org/10.1017/S1473550413000104>
- Panitz, C., Horneck, G., Rabbow, E., Rettberg, P., Moeller, R., Cadet, J., Douki, T., & Reitz, G. (2015). The SPORES experiment of the EXPOSE-R mission: *Bacillus subtilis* spores in artificial meteorites. *International Journal of Astrobiology*, 14(1), 105–114. <https://doi.org/10.1017/S1473550414000251>
- Pavličić, B., Runzheimer, K., Siems, K., Koch, S., Cortesão, M., Ramos-Nascimento, A., & Moeller, R. (2022). Spaceflight virology: What do we know about viral threats in the spaceflight environment? *Astrobiology*, 22(2), 210–224. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0009>

- Peters, T. (2018). Does extraterrestrial life have intrinsic value? An exploration in responsibility ethics. *International Journal of Astrobiology*, 17(4), 347–355. <https://doi.org/10.1017/S147355041700057X>
- Petkowski, J. J., Bains, W., & Seager, S. (2020). On the potential of silicon as a building block for life. *Life*, 10(6), Article 84. <https://doi.org/10.3390/life10060084>
- Pleyer, H. L., Moeller, R., Fujimori, A., Fox, S., & Strasdeit, H. (2022). Chemical, thermal, and radiation resistance of an iron porphyrin: A model study of biosignature stability. *Astrobiology*, 22(7), 877–889. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0144>
- Prasad, B., Richter, P., Vadakedath, N., Haag, F. W. M., Prasad, B., Richter, P., Vadakedath, N., Haag, F. W. M., Strauch, S. M., Mancinelli, R., Schwarzwälder, A., Etchebarre, E., Gaume, N., & Lebert, M. (2021). How the space environment influences organisms: An astrobiological perspective and review. *International Journal of Astrobiology*, 20(3), 159–177. <https://doi.org/10.1017/S1473550421000057>
- Puzzarini, C., & Barone, V. (2020). A never-ending story in the sky: The secrets of chemical evolution. *Physics of Life Reviews*, 32, 59–94. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2019.07.001>
- Rizos, J. L., Sunshine, J. M., Daly, R. T., Nathues, A., De Sanctis, M. C., Raponi, A., Pasckert, J. H., Farnham, T. L., Kloos, J., & Ortiz, J. L. (2024). New candidates for organic-rich regions on Ceres. *The Planetary Science Journal*, 5(12), Article 270. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad86ba>
- Robinson, A., & McQuaig, S. (2022). *Haloferax volcanii* remains viable and shows morphological changes under anoxic (CO₂-enriched) and hypobaric (2.4 kPa) atmospheric conditions. *Astrobiology*, 22(7), 829–837. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0076>
- Roche, M. J., Fox-Powell, M. G., Hamp, R. E., & Byrne, J. B. (2023). Iron reduction as a viable metabolic pathway in Enceladus' ocean. *International Journal of Astrobiology*, 22(5), 539–558. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000125>
- Rzyski, P., Poniedziałek, B., Hippmann, N., & Kaczmarek, L. (2022). Screening the survival of cyanobacteria under perchlorate stress: Potential implications for Mars in situ resource utilization. *Astrobiology*, 22(6), 672–684. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0100>
- Sandford, S. A., Nuevo, M., Bera, P. P., & Lee, T. J. (2020). Prebiotic astrochemistry and the formation of molecules of astrobiological interest in interstellar clouds and protostellar disks. *Chemical Reviews*, 120(11), 4616–4659. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00560>
- Schwieterman, E. W., Kiang, N. Y., Parenteau, M. N., Schwieterman, E. W., Kiang, N. Y., Parenteau, M. N., Harman, C. E., DasSarma, S., Fisher, T. M., Arney, G. N., Hartnett, H. E., Reinhard, C. T., Olson, S. L., Meadows, V. S., Cockell, C. S., Walker, S. I., Grenfell, J. L., Hegde, S., Rugheimer, S., Hu, R., & Lyons, T. W. (2018). Exoplanet biosignatures: A review of remotely detectable signs of life. *Astrobiology*, 18(6), 663–708. <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1729>
- Shields, A. L. (2019). The climates of other worlds: A review of the emerging field of exoplanet climatology. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 243(2), Article 30. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab2fe7>
- Smith, R. S. (2016). Life is hard: countering definitional pessimism concerning the definition of life. *International Journal of Astrobiology*, 15(4), 277–289. <http://doi.org/10.1017/S1473550416000021>
- Styczinski, M. J., Glaser, D. M., Hooks, M., Jia, T. Z., Johnson-Finn, K., Schaible, G. A., & Schaible, M. J. (2024). Chapter 11: Astrobiology education, engagement, and resources. *Astrobiology*, 24(S1), S208–S230. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0098>
- Temple, R. (2007). The prehistory of panspermia: astrophysical or metaphysical? *International Journal of Astrobiology*, 6 (2), 169–180. <http://doi.org/10.1017/S1473550407003692>
- Waajen, A. C., Lima, C., Goodacre, R., & Cockell, C. S. (2024). Life on Earth can grow on extraterrestrial organic carbon. *Scientific Reports*, 14(1), Article 3691. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54195-6>
- Wickramasinghe, S., Chandrajith, R., Senaratne, A., Paul, V., Dash, P., Wickramasinghe, S., & Biggs, P. J. (2021). Bacterial influence on the formation of hematite: Implications for Martian dormant life. *International Journal of Astrobiology*, 20(6), 398–412. <https://doi.org/10.1017/S1473550421000124>
- Wickramasinghe, S. C. (2011). Bacterial morphologies supporting cometary panspermia: A reappraisal. *International Journal of Astrobiology*, 10(1), 25–30. <https://doi.org/10.1017/S1473550410000157>
- Zarrouk, N., & Bennaceur, R. (2009). Extrapolating cosmic ray variations and impacts on life: Morlet wavelet analysis. *International Journal of Astrobiology*, 8(3), 169–174. <https://doi.org/10.1017/S1473550409990085>
- References**
- Airapetian, V. S., Barnes, R., Cohen, O., Collinson, G. A., Airapetian, V. S., Barnes, R., Cohen, O., Collinson, G. A., Danchi, W. C., Dong, C. F., Del Genio, A. D., France, K., Garcia-Sage, K., Gloer, A., Gopalswamy, N., Grenfell, J. L., Gronoff, G., Güdel, M., Herbst, K., Henning, W. G., Jackman, C. H., Jin, M., Johnstone, C. P., ... & Yamashiki, Y. (2020). Impact of space weather on climate and habitability of terrestrial-type exoplanets. *International Journal of Astrobiology*, 19(2), 136–194. <https://doi.org/10.1017/S1473550419000132>
- Al Soudi, A. F., Farhat, O., Chen, F., Benton, C., Clark, B. C., & Schneegurt, M. A. (2017). Bacterial growth tolerance to concentrations of chlorate and perchlorate salts relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*, 16(3), 229–235. <https://doi.org/10.1017/S1473550416000434>
- Annis, J. (1999). Placing a limit on star-fed Kardashev type III civilisations. *Journal of the British Interplanetary Society*, 52(1), 33–36.
- Banfield, J. F., Moreau, J. W., Chan, C. S., Welch, S. A., & Little, B. (2001). Mineralogical biosignatures and the search for life on Mars. *Astrobiology*, 1(4), 447–465. <https://doi.org/10.1089/153110701753593856>
- Bowman, J. C., Petrov, A. S., Frenkel-Pinter, M., Penev, P. I., & Williams, L. D. (2020). Root of the tree: The significance, evolution, and origins of the ribosome. *Chemical Reviews*, 120(11), 4848–4878. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00742>
- Burchell, M. J. (2004). Panspermia today. *International Journal of Astrobiology*, 3(2), 73–80. <https://doi.org/10.1017/S1473550404002113>
- Buzulukova, N., & Tsurutani, B. (2022). Space weather: From solar origins to risks and hazards evolving in time. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, Article 1017103. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.1017103>
- Carr, B. J., & Rees, M. J. (2003). Fine-tuning in living systems. *International Journal of Astrobiology*, 2(2), 79–86. <https://doi.org/10.1017/S1473550403001472>
- Carte, M. E., Chen, F., Clark, B. C., & Schneegurt, M. A. (2024a). Succession of the bacterial community from a spacecraft assembly clean room when enriched in brines relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*, 23, Article e5. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000277>
- Carte, M. E., Gandikota, S., Chen, F., Clark, B. C., & Schneegurt, M. A. (2024b). Succession of the fungal community of a spacecraft assembly clean room when enriched in brines relevant to Mars. *International Journal of Astrobiology*, 23, Article e15. <https://doi.org/10.1017/S1473550424000090>
- Chon-Torres, O. A. (2018). Astroethics. *International Journal of Astrobiology*, 17(1), 51–56. <https://doi.org/10.1017/S1473550417000064>
- Chon-Torres, O. A., Chela-Flores, J., Dunér, D., Persson, E., Milligan, T., Martínez-Frías, J., Losch, A., Pryor, A., & Murga-Moreno, C. A. (2024). Astrobiocentrism: Reflections on challenges in the transition to a vision of life and humanity in space. *International Journal of Astrobiology*, 23, Article e6. <https://doi.org/10.1017/S1473550424000016>
- Chou, L., Grefenstette, N., & Borges, S. (2024). Chapter 8: Searching for life beyond Earth. *Astrobiology*, 24(S1), S149–S167. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0104>
- Cleland, C. E., & Copley, S. D. (2005). The possibility of alternative microbial life on Earth. *International Journal of Astrobiology*, 4(3–4), 165–173. <https://doi.org/10.1017/S147355040500279X>
- Colón-Santos, S., Vázquez-Salazar, A., Adams, A., Colón-Santos, S., Vázquez-Salazar, A., Adams, A., Campillo-Balderas, J. A., Hernández-Morales, R., Jácome, R., Muñoz-Velasco, I., Rodríguez, L. E., Schaible, M. J., Schaible, G. A., Szeinbaum, N., Thweatt, J. L., & Trubl, G. (2024). Chapter 2: What is life? *Astrobiology*, 24(S1), S24–S41. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0116>
- DasSarma, P., Laye, V. J., Harvey, J., Reid, C., Shultz, J., Yarborough, A., Lamb, A., Koske-Phillips, A., Herbst, A., Molina, F., Grah, O., Phillips, T., & DasSarma, S. (2017). Survival of halophilic Archaea in Earth's cold stratosphere. *International Journal of Astrobiology*, 16(4), 321–327. <https://doi.org/10.1017/S1473550416000410>
- De Sanctis, M. C., Baratta, G. A., Brucato, J. R., De Sanctis, M. C., Baratta, G., Brucato, J. R., Castillo-Rogez, J. C., Ciarniello, M., Cozzolino, F., De Angelis, S., Ferrari, M., Fulvio, D., Germanà, M., Mennella, V., Pagnocin, S., Palumbo, M. E., Poggiali, G., Popa, C., Raponi, A., Scirè, C., Strazzulla, G., & Urso, R. G. (2024). Recent replenishment of aliphatic organics on Ceres from a large subsurface reservoir. *Science Advances*, 10(39), Article eadp3681. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp3664>
- Eigen, M. (1971). Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Die Naturwissenschaften*, 58(10), 465–523. <https://doi.org/10.1007/BF00623322>
- Eigen, M., & Schuster, P. (1982). Stages of emerging life – Five principles of early organization. *Journal of Molecular Evolution*, 19(1), 47–61. <https://doi.org/10.1007/BF02100223>
- Extance, A. (2024). How the James Webb Space Telescope is revealing the weather and chemistry on planets around other stars. *ACS Central Science*, 10(7), 1307–1310. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.4c00820>
- Fischer, D., Sheffield, A., Tan, J., Ling, L., & Zhao, C. (2022). Technosignatures. *Astrobiology*. <https://pressbooks.cuny.edu/astrobiology/chapter/technosignatures/>
- Fiore, M., Chieffo, C., & Lopez, A. (2022). Synthesis of phospholipids under plausible prebiotic conditions and analogies with phospholipid biochemistry for origin of life studies. *Astrobiology*, 22(5), 598–616. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0059>
- Franqueria, M., Raut, A., Devi, A., & Pandit, S. (2022). *New methodologies in the search for life: Final report*. International Space University Space Studies Program. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25712.94727>
- Frenkel-Pinter, M., Samanta, M., Ashkenasy, G., & Leman, L. J. (2020). Prebiotic peptides: Molecular hubs in the origin of life. *Chemical Reviews*, 120(11), 4707–4765. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00664>
- Genge, M. J., Almeida, N., Van Ginneken, M., Pinault, L., Preston, L. J., Wozniakiewicz, P. J., & Yano, H. (2024). Rapid colonization of a space-returned Ryugu sample. *Meteoritics & Planetary Science*, 60(1), 64–73. <https://doi.org/10.1111/maps.14288>
- Glavin, D. P., Burton, A. S., Elsila, J. E., Aponte, J. C., & Dworkin, J. P. (2020). The search for chiral asymmetry as a potential biosignature in our solar system. *Chemical Reviews*, 120(11), 4660–4689. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00474>

- Gobato, R., Heidari, A., Mitra, A., & Valverde, L. F. (2022). The possibility of silicon-based life. *Bulletin of Pure & Applied Sciences-Chemistry*, 41(1), 52–58. <https://doi.org/10.5958/2320-320X.2022.00007.3>
- Houtkooper, J. M., & Schulze-Makuch, D. (2007). A possible biogenic origin for hydrogen peroxide on Mars: The Viking results reinterpreted. *International Journal of Astrobiology*, 6(2), 147–152. <https://doi.org/10.1017/S1473550407003746>
- Janzen, E., Blanco, C., Peng, H., Kenchel, J., & Chen, I. A. (2020). Promiscuous ribozymes and their proposed role in prebiotic evolution. *Chemical Reviews*, 120(11), 4879–4897. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00620>
- Jennifer Kan, S. B., Lewis, R. D., Chen, K., & Arnold, F. H. (2016). Directed evolution of cytochrome c for carbon–silicon bond formation: Bringing silicon to life. *Science*, 354(6315), 1048–1051. <https://doi.org/10.1126/science.aah6219>
- Kaiser, R. I., & Balucani, N. (2002). Astrobiology – The final frontier in chemical reaction dynamics. *International Journal of Astrobiology*, 1(1), 15–23. <https://doi.org/10.1017/S1473550402001015>
- Kelly, C. S. (2016). Life is hard: Countering definitional pessimism concerning the definition of life. *International Journal of Astrobiology*, 15(4), 277–289. <https://doi.org/10.1017/S1473550416000021>
- Lehto, K., & Karetnikov, A. (2005). Relicts and models of the RNA world. *International Journal of Astrobiology*, 4(1), 33–41. <https://doi.org/10.1017/S1473550405002521>
- Lingam, M., & Loeb, A. (2020). What's in a name: The etymology of astrobiology. *International Journal of Astrobiology*, 19(6), 489–495. <https://doi.org/10.1017/S1473550420000154>
- Lingam, M., & Loeb, A. (2021). *Life in the cosmos: From biosignatures to technosignatures*. Harvard University Press.
- Lorenz, C., Bianchi, E., Benesperi, R., Loppi, S., Papini, A., Poggiali, G., & Brucato, J. R. (2022). Survival of *Xanthoria parietina* in simulated space conditions: Vitality assessment and spectroscopic analysis. *International Journal of Astrobiology*, 21(3), 137–153. <https://doi.org/10.1017/S1473550422000076>
- Lukas Pleyer, H. L., Strasdeit, H., & Fox, S. (2018). A possible prebiotic ancestry of porphyrin-type protein cofactors. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 48(3), 347–371. <https://doi.org/10.1007/s11084-018-9567-4>
- Mahipal Yadav, M., Kumar, R., & Krishnamurthy, R. (2020). Chemistry of abiotic nucleotide synthesis. *Chemical Reviews*, 120(11), 4766–4805. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00546>
- Malaterre, C., Jeancolas, C., & Nghe, P. (2022). The origin of life: What is the question? *Astrobiology*, 22(7), 851–862. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0162>
- Mancinelli, R. L. (2015). The effect of the space environment on the survival of *Halorubrum chaoviator* and *Synechococcus* (Nägeli): Data from the space experiment OSMO on EXPOSE-R. *International Journal of Astrobiology*, 14(1), 123–128. <https://doi.org/10.1017/S147355041400055X>
- Marinho, F., Paulucci, L., & Galante, D. (2014). Propagation and energy deposition of cosmic rays' muons on terrestrial environments. *International Journal of Astrobiology*, 13(4), 319–323. <https://doi.org/10.1017/S1473550414000160>
- McKay, C. P. (2020). What is life – And when do we search for it on other worlds. *Astrobiology*, 20(2), 163–166. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2136>
- Meurer, J. C., Haqq-Misra, J., & de Souza Mendonça, M. (2024). Astroecology: Bridging the gap between ecology and astrobiology. *International Journal of Astrobiology*, 23, Article e3. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000265>
- Nascimento-Dias, B. L., & Martinez-Frias, J. (2023). Brief review about history of astrobiology. *International Journal of Astrobiology*, 22(1), 67–78. <https://doi.org/10.1017/S1473550422000386>
- Neuberger, K., Lux-Endrich, A., Panitz, C., & Horneck, G. (2015). Survival of spores of *Trichoderma longibrachiatum* in space: Data from the space experiment SPORES on EXPOSE-R. *International Journal of Astrobiology*, 14(1), 129–135. <https://doi.org/10.1017/S1473550414000408>
- Olsson-Francis, K., Watson, J. S., & Cockell, C. S. (2013). Cyanobacteria isolated from the high-intertidal zone: A model for studying the physiological prerequisites for survival in low Earth orbit. *International Journal of Astrobiology*, 12(4), 292–303. <https://doi.org/10.1017/S1473550413000104>
- Panitz, C., Horneck, G., Rabbow, E., Rettberg, P., Moeller, R., Cadet, J., Douki, T., & Reitz, G. (2015). The SPORES experiment of the EXPOSE-R mission: *Bacillus subtilis* spores in artificial meteorites. *International Journal of Astrobiology*, 14(1), 105–114. <https://doi.org/10.1017/S1473550414000251>
- Pavletić, B., Runzheimer, K., Siems, K., Koch, S., Cortesão, M., Ramos-Nascimento, A., & Moeller, R. (2022). Spaceflight virology: What do we know about viral threats in the spaceflight environment? *Astrobiology*, 22(2), 210–224. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0009>
- Peters, T. (2018). Does extraterrestrial life have intrinsic value? An exploration in responsibility ethics. *International Journal of Astrobiology*, 17(4), 347–355. <https://doi.org/10.1017/S147355041700057X>
- Petkowski, J. J., Bains, W., & Seager, S. (2020). On the potential of silicon as a building block for life. *Life*, 10(6), Article 84. <https://doi.org/10.3390/life10060084>
- Pleyer, H. L., Moeller, R., Fujimori, A., Fox, S., & Strasdeit, H. (2022). Chemical, thermal, and radiation resistance of an iron porphyrin: A model study of biosignature stability. *Astrobiology*, 22(7), 877–889. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0144>
- Prasad, B., Richter, P., Vadakedath, N., Haag, F. W. M., Prasad, B., Richter, P., Vadakedath, N., Haag, F. W. M., Strauch, S. M., Mancinelli, R., Schwarzwälder, A., Etcheparre, E., Gaume, N., & Lebert, M. (2021). How the space environment influences organisms: An astrobiological perspective and review. *International Journal of Astrobiology*, 20(3), 159–177. <https://doi.org/10.1017/S1473550421000057>
- Puzzarini, C., & Barone, V. (2020). A never-ending story in the sky: The secrets of chemical evolution. *Physics of Life Reviews*, 32, 59–94. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2019.07.001>
- Rizos, J. L., Sunshine, J. M., Daly, R. T., Nathues, A., De Sanctis, M. C., Raponi, A., Pasckert, J. H., Farnham, T. L., Kloos, J., & Ortiz, J. L. (2024). New candidates for organic-rich regions on Ceres. *The Planetary Science Journal*, 5(12), Article 270. <https://doi.org/10.3847/PSSJ/ad86ba>
- Robinson, A., & McQuaig, S. (2022). *Haloferax volcanii* remains viable and shows morphological changes under anoxic (CO₂-enriched) and hypobaric (2.4 kPa) atmospheric conditions. *Astrobiology*, 22(7), 829–837. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0076>
- Roche, M. J., Fox-Powell, M. G., Hamp, R. E., & Byrne, J. B. (2023). Iron reduction as a viable metabolic pathway in Enceladus' ocean. *International Journal of Astrobiology*, 22(5), 539–558. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000125>
- Rzyski, P., Poniedziałek, B., Hippmann, N., & Kaczmarek, L. (2022). Screening the survival of cyanobacteria under perchlorate stress: Potential implications for Mars in situ resource utilization. *Astrobiology*, 22(6), 672–684. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0100>
- Sandford, S. A., Nuevo, M., Bera, P. P., & Lee, T. J. (2020). Prebiotic astrochemistry and the formation of molecules of astrobiological interest in interstellar clouds and protostellar disks. *Chemical Reviews*, 120(11), 4616–4659. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00560>
- Schwieterman, E. W., Kiang, N. Y., Parenteau, M. N., Schwieterman, E. W., Kiang, N. Y., Parenteau, M. N., Harman, C. E., DasSarma, S., Fisher, T. M., Arney, G. N., Hartnett, H. E., Reinhard, C. T., Olson, S. L., Meadows, V. S., Cockell, C. S., Walker, S. I., Grenfell, J. L., Hegde, S., Rugheimer, S., Hu, R., & Lyons, T. W. (2018). Exoplanet biosignatures: A review of remotely detectable signs of life. *Astrobiology*, 18(6), 663–708. <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1729>
- Shields, A. L. (2019). The climates of other worlds: A review of the emerging field of exoplanet climatology. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 243(2), Article 30. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab2f7>
- Smith, R. S. (2016). Life is hard: countering definitional pessimism concerning the definition of life. *International Journal of Astrobiology*, 15(4), 277–289. <https://doi.org/10.1017/S1473550416000021>
- Styczinski, M. J., Glaser, D. M., Hooks, M., Jia, T. Z., Johnson-Finn, K., Schaible, G. A., & Schaible, M. J. (2024). Chapter 11: Astrobiology education, engagement, and resources. *Astrobiology*, 24(S1), S208–S230. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0098>
- Temple, R. (2007). The prehistory of panspermia: astrophysical or metaphysical? *International Journal of Astrobiology*, 6 (2), 169–180. <http://doi.org/10.1017/S1473550407003692>
- Waajen, A. C., Lima, C., Goodacre, R., & Cockell, C. S. (2024). Life on Earth can grow on extraterrestrial organic carbon. *Scientific Reports*, 14(1), Article 3691. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54195-6>
- Wickramaratna, S., Chandrajith, R., Senaratne, A., Paul, V., Dash, P., Wickramasinghe, S., & Biggs, P. J. (2021). Bacterial influence on the formation of hematite: Implications for Martian dormant life. *International Journal of Astrobiology*, 20(6), 398–412. <https://doi.org/10.1017/S1473550421000124>
- Wickramasinghe, C. (2011). Bacterial morphologies supporting cometary panspermia: A reappraisal. *International Journal of Astrobiology*, 10(1), 25–30. <https://doi.org/10.1017/S1473550410000157>
- Zarrouk, N., & Bennaceur, R. (2009). Extrapolating cosmic ray variations and impacts on life: Morlet wavelet analysis. *International Journal of Astrobiology*, 8(3), 169–174. <https://doi.org/10.1017/S1473550409990085>

Отримано редакцією журналу / Received: 10.01.25
 Прорецензовано / Revised: 14.02.25
 Схвалено до друку / Accepted: 11.03.25

Viktor MARTYNYUK, DSc (Biol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5311-3565
e-mail: vittorio_martini@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Charles COCKELL, PhD, Prof.
ORCID ID: 0000-0003-3662-0503
e-mail: ccockell@exseed.ed.ac.uk
University of Edinburgh, UK Centre for Astrobiology,
Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland

ASTROBIOLOGY: A BRIEF HISTORICAL EXCURSION, ITS CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT IN UKRAINE

At the present stage of the development of human civilization the rapid development of high-tech space technologies, growing scientific and commercial interest in space, and also increased attention to fundamental questions about the origin and future of life in the Universe require the formation of new scientific efforts regarding the understanding of the phenomenon of life, the emergence of the biosphere, and the planetary role of man in the further evolution of planet Earth. Modern society is actively seeking answers to lifelong questions related to whether our biosphere is the only form of life in space, and whether human contact with extraterrestrial life forms and civilizations is possible. The search for these answers is facilitated by such a science as astrobiology. The purpose of this publication is a brief overview of the current state of astrobiology based on publications in leading scientific journals over the past decades, as well as an analysis of the potential opportunities for the development of this science in Ukraine.

Astrobiology as a science is an interdisciplinary field that studies the question of the origin of life on Earth, how it has evolved on this planet for billions of years, its limits, and the existence of life beyond Earth, its possible forms and modes of life existence, as well as the conditions for the emergence and development of life in the Universe. Astrobiology investigates whether life, as a cosmic phenomenon, can exist beyond Earth in various forms, including terrestrial ones delivered by spacecraft to other planets. The main goal of astrobiology is to search for and study various forms of life beyond Earth, as well as to study the existence of terrestrial life forms in extreme conditions, close to the conditions of open space and environmental conditions on other planets of the Solar and other stellar systems. An important interdisciplinary area of research in modern astrobiology is the study of the chemical composition of interstellar space and chemical processes that can lead to the formation of organic molecules. Abiogenic synthesis of organic compounds in outer space can occur under conditions of extremely low temperatures, cosmic vacuum and high levels of ionizing radiation. The theory of the spontaneous origin of life on planet Earth suggests that the first simplest living organisms arose by self-organization from organic compounds that were formed as a result of their abiogenic synthesis. The possibility of abiogenic synthesis of biologically relevant organic molecules has been experimentally proven. But the idea of the spontaneous origin of life as a molecular-informational phenomenon still remains hypothetical. The alternative viewpoint is a theory of panspermia. This theory assumes the process of spontaneous origin of life somewhere else in space, such as on another planetary body, and living organisms came to Earth with space dust, comets and asteroids. The possibility that organisms can survive movement through space is supported by some experimental confirmation based on studies of the resistance of certain types of organisms to extreme factors of open space and environmental conditions on some planets and satellites, in particular on Mars, Enceladus and other celestial bodies. An important area of research in modern astrobiology is the search for biosignatures that can reliably indicate the presence of certain life forms. The development of astrobiology gives rise to a number of systemic issues that must be resolved and which should form a systemic vision of the possibility of the existence of various life forms on other planets. An important issue in astrobiology is the problem of the influence of cosmic factors on the terrestrial biosphere and possible biospheres of other planets. These factors are primarily associated with the activity of stars around which planetary systems are formed. In connection with the active development of space missions to the planets of the Solar System, the question arose of the possibility of transferring terrestrial life forms on space probes to other planets, which in turn raises a number of problems associated with astrobiological "pollution" and the ethical responsibility of human civilization for the spread of terrestrial life forms as a result of contamination of space probes. The review pays special attention to the issues of training highly qualified specialists in the field of astrobiology at universities and relevant educational and scientific centers, in particular on the basis of the UK Astrobiology Center of the University of Edinburgh. The need to open an International Astrobiology Center on the basis of Taras Shevchenko National University of Kyiv together with the University of Edinburgh is substantiated.

Astrobiology is a new, interdisciplinary, and in-demand science. It has its own scientific challenges and methodology. The further development of this field of knowledge requires the involvement of specialists from various natural and humanitarian disciplines, who need to be trained through new interdisciplinary educational courses and programs for the preparation of bachelors, masters, and doctors of philosophy.

K e y w o r d s : *astrobiology, astroecology, astrobiological scientific and educational centers.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.