

СТАЛЕ МАЙБУТНЄ В НАСТУПНОМУ ДЕСЯТИЛІТТІ, ЩО ЗАСНОВАНЕ НА ҐРУНТОЗНАВСТВІ

ШВЕЦЬ О.М. – аспірант

<https://orcid.org/0000-0001-5860-9394>

Державний біотехнологічний університет

Актуальність. Пізнання та набуття знань про ґрунти і ґрунтовий покрив, про їх утворення, систематику, географію, структуру, морфологічну будову, склад, властивості, їхні різноманітні функції та послуги (продуктивні, екологічні, соціальні, інформаційні), про закономірності сучасної еволюції є основою для вибору ефективних рішень з управління ґрунтово-земельними ресурсами та збалансованим землекористуванням [1–10]. Ця загальновідома і беззаперечна істина перебуває в центрі уваги сучасних фундаментальних і прикладних досліджень у вітчизняній і світовій наукових практиках. Посилення негативного впливу кліматичних і антропогенних чинників на агроекологічний стан ґрунтового покриву та всього довкілля потребує внесення постійних інноваційних корективів у практику землеробства, меліорації та охорони ґрунтових ресурсів, передусім чорноземів і чорноземоподібних ґрунтів, якими багата українська земля. Своєчасна управлінська реакція на погіршення корисних властивостей ґрунтів, деградаційну спрямованість сучасних ґрунтотворних процесів, грубе порушення основ чинного земельного законодавства кінце потрібна для забезпечення сталого (збалансованого) розвитку не лише аграрної сфери людської діяльності, а й усього народногосподарського комплексу України [8].

Оскільки чисельність населення світу продовжує зростати і, як очікується, досягне 8,6 мільярда людей до 2030 року, вкрай важливо поважати і захищати природні ресурси, включаючи ґрунт, воду, повітря, корисні копалини і біорізноманіття, які підтримують життя на Землі, включаючи людство. Нинішні темпи споживання і неадекватне управління ресурсами чинять безпрецедентний тиск на глобальні системи, за оцінками, у всьому світі деградувало від одного до шести мільярдів гектарів (до 30%) земель [6]. Деградація земель негативно позначається на 3,2 мільярда людей, загрожує сталому добробуту і є основною причиною зміни клімату і втрати біорізноманіття [9].

Глобальні ініціативи щодо вирішення цих проблем включають Порядок денний ООН у галузі сталого розвитку на період до 2030 року та стратегічний план Конвенції ООН про біорізноманіття на 2020 рік. Загалом, ці документи охоплюють сфери поліпшення життя людей і екологічної стійкості, залежать від участі всіх країн і зацікавлених сторін і зажадають інноваційних, своєчасних і міждисциплінарних підходів [5].

Ґрунти відіграють центральну роль у підтримці природних систем і благополуччя людини [9], однак нині біорізноманіття ґрунтів – різноманітність життя

у ґрунті, яка стимулює екосистеми, підтримує життя на поверхні і здорові ландшафти, що, як і раніше, значною мірою ігнорується в глобальному порядку денному. Наприклад, термін «біорізноманіття ґрунтів» не фігурує в документації ООН, тоді як лісам, водно-болотним угіддям, річкам і посушливим землям приділяється особлива увага у зв'язку з їх користю. Ґрунтові організми, включаючи бактерії, гриби, нематоди, дощових черв'яків, кротів і навіть коріння рослин, становлять більшу частину живої біомаси на Землі [1] і більше 25% всіх описаних видів, не кажучи вже про генетичну різноманітність, представлену всередині цих видів. Активність і складні взаємодії ґрунтових організмів забезпечують основу для багатьох функцій екосистем, включаючи кругообіг поживних речовин, боротьбу з патогенами, проникнення води, основи харчових мереж і підтримку агроекосистем. Наше розуміння найважливіших зв'язків між біорізноманіттям ґрунтів та стійкістю швидко розвивається [10]. Настав час використовувати ці знання для підтримки глобальних дій та створення більш цілісного порядку денного в галузі сталого розвитку, що може одночасно вирішувати проблеми втрати біорізноманіття, зміни клімату та деградації земель.

Як і більшість ресурсів, на які покладаються люди, ґрунти та біорізноманіття ґрунтів перебувають під загрозою через деградацію земель, зміни клімату, забруднення, урбанізацію, а також надмірне та неправильне використання. Ґрунти є обмеженим, непоправним ресурсом, оскільки вони не можуть бути заповнені протягом терміну служби гумусу. Формування ґрунтів залежить від складного балансу між часом, кліматом, топографією, основним вихідним матеріалом і, звичайно ж, організмами [5–9]. Тому вибір часу – швидкість, з якою ми діємо для захисту ґрунтів, – має вирішальне значення. У низці глобальних зусиль була визнана нагальна необхідність, з якою ми повинні діяти. Наприклад, глобальна ініціатива з біорізноманіття ґрунтів, запущена в 2011 році, покликана об'єднати дослідників і політиків для інтеграції знань, які ми отримали в минулому, з діями для сталого майбутнього.

Інші установи також почали враховувати біорізноманіття ґрунтів у розгляді ґрунтів, у тому числі глобальне ґрунтове партнерство, Продовольча та сільськогосподарська організація ООН, міждержавна платформа з біорізноманіття та екосистемних послуг (МПБЕП), а в 2019 році Конвенція ООН про біологічне різноманіття запросила глобальну доповідь про біорізноманіття ґрунтів [2].

До цих недавніх зусиль інтеграція ґрунту для природи та глобальної стійкості в основному була зосереджена на фізичних та хімічних властивостях ґрунту з невеликим урахуванням біорізноманіття. Але нині визнано, що включення ґрунтової біоти в явному вигляді поряд з абіотичними факторами ґрунту в оцінці управління земельними ресурсами може краще служити цілям сталого розвитку, ніж розгляд тільки абіотичних властивостей ґрунту [10]. Цей цілісний погляд на ґрунти отримав підтримку з боку землевласників, менеджерів та агентств і ясно показує, що різні зацікавлені сторони прагнуть захистити цей найважливіший ресурс, використовуючи міждисциплінарні та стійко орієнтовані методи. Незважаючи на цю енергію, необхідно зробити більше для визнання та врахування ролі ґрунтового біорізноманіття в побудові сталого майбутнього. Наприклад, у більшості досліджень біорізноманіття ґрунтів розглядається як різноманітність на рівні спільноти, на різних видах і трофічних рівнях; однак різноманітність всередині видів є найважливішим компонентом біорізноманіття, який практично ігнорувався в ґрунтових середовищах проживання. Таким чином, прагнучи спрямувати глобальні програми та виявляти синергію між різними секторами (дослідження, користувачі, громадськість та політика), визначається:

- узагальнення поточних досліджень, що охоплюють способи, якими біорізноманіття ґрунтів може сприяти глобальному порядку денному в галузі сталого розвитку;

- глобальні зміни та тиск, що загрожують біорізноманіттю ґрунтів;

- дії, які сприятимуть збереженню біорізноманіття ґрунтів, одночасно впливаючи на цілі та завдання в галузі сталого розвитку та біорізноманіття;

- прогалини в знаннях про зв'язок біорізноманіття ґрунтів зі стійкістю.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Глобальні знання про розподіл ґрунтового біорізноманіття помітно відстають від наземних знань. Постійно з'являються нові спостереження і розуміння таксонів, що мешкають у ґрунті, і їх місць існування. Ініціативи щодо об'єднання глобальних наборів даних дозволили створити карти, які показують прогалини в біогеографії, біомасі та функціях, а також розподіл видів нематод [2], бактерій [5] та грибів [9]. Ці зусилля з узагальнення виявили прогалини в знаннях про розподіл ґрунтових таксонів. З огляду на велику невизначеність щодо глобального розподілу ґрунтового біорізноманіття порівняно з наземним біорізноманіттям аналіз показав, що лише 37% районів з найвищими рівнями як надземного, так і підземного біорізноманіття перекриваються [6]. Тому необхідні додаткові дослідження, особливо на глобальному півдні, який вкрай недостатньо представлений у науковій літературі, для уточнення цих карт і зміцнення довіри, необхідної для формування умов збереження середовища проживання з урахуванням ґрунтової біоти. Знання про спільноти ґрунтових мікробів в останні десятиліття зросли в геометричній прогресії з появою

молекулярних інструментів, але знання про багатьох ґрунтових безхребетних сповільнилися в міру скорочення таксономічних знань у багатьох академічних інститутах. Розуміння та оцінка ґрунтового біорізноманіття в рамках таксонів є серйозною прогалиною в знаннях. За оцінками, ґрунтові організми мають набагато більшу частку неописаних видів, ніж більші наземні та водні таксони, що ускладнює оцінку того, які види можуть потребувати збереження і як найкращим чином розставити пріоритети в зусиллях щодо збереження [8]. Крім того, відставання в розумінні генетичного різноманіття ґрунтової біоти, як фауни, так і мікробів, може уповільнити відкриття фармацевтичних препаратів [4; 2; 5], а також здатність ґрунтових спільнот реагувати на зміну клімату. Розуміння ґрунтових організмів, як мікробних, так і фауністичних, досить докладне, щоб визначити статус збереження (наприклад, поширений / рідкісний / знаходиться під загрозою зникнення), необхідно для того, щоб наздогнати наземні знання і обґрунтувати дії.

Зв'язування біорізноманіття ґрунтів з екосистемними послугами та функціями є найважливішою сферою для збору інформації. ґрунтові організми відіграють центральну роль у кругообігу поживних речовин, стимулюючи виробництво сільськогосподарських культур і тваринництва, але не вистачає чіткого розуміння того, які організми або спільноти беруть у цьому безпосередню участь. Це призводить до неоднозначності рекомендацій виробників щодо використання біології ґрунту для сталого сільського господарства. Кількість і якість води є головною турботою сільського господарства і людства. Зв'язування впливу біорізноманіття ґрунтів на рух і якість води в масштабі вододілу, можливо, за допомогою моделювання, і масштабування цих результатів до дій у масштабі ландшафту, придатного для вирішення поточних проблем з водними ресурсами, є пріоритетом. Розширення знань про біорізноманіття ґрунтів для глобальних дій у сфері зміни клімату є ще одним ключовим завданням. Нещодавня робота сприяє розумінню того, як біологія ґрунту може впливати на кругообіг вуглецю, і наступні кроки включають включення біорізноманіття в моделі зміни клімату для поліпшення прогнозів [3].

Невизначеність також існує щодо загроз біорізноманіттю ґрунтів та рішень щодо захисту ґрунтових організмів та їх внеску в сталий розвиток. Існує досить досліджень, щоб знати, що ґрунтови середовища існування стикаються з численними загрозами від прямого і непрямого надходження забруднюючих речовин і поживних речовин до змін у наземних спільнотах, включаючи екзотичні види. Проте залишається багато питань щодо того, як саме ці фактори впливають на недостатньо вивчені таксони, такі як протисти та енхітреїди [8]. Бракує також знань про біорізноманіття ґрунтів у певних типах середовищ існування, таких як міські райони, які довгий час недооцінювалися екологами та експертами з ґрунтів. Навіть у добре вивчених системах, таких як сільськогосподарське виробництво, існують прогалини в знаннях. Більшість досліджень, включаючи дослідження в галузі біорізноманіття

ґрунтів, були зосереджені на методах промислового обробки просапних культур, при цьому дуже мало досліджень присвячено дрібному натуральному господарству, яке становить значну частину світового сільського господарства. Розширення досліджень у цих сферах покращить розуміння та підвищить впевненість експертів у рекомендаціях щодо захисту біорізноманіття ґрунтів та підвищення ефективності його функціонування для забезпечення глобальної стійкості.

Метою статті є розгляд та аналіз сталого майбутнього в наступному десятилітті, заснованому на ґрунтознавстві.

Матеріали і методи. Поставлене автором цільове завдання вирішувалося методами збору, узагальнення та аналізу досягнень у ґрунтознавчих дослідженнях (переважно в останні десятиріччя) з наступним оцінюванням їхньої інноваційності та перспективності. Авторська методологічна орієнтація – на структурно-функціональний підхід до аналізу досягнень із вивчення ґрунтів і ґрунтового покриву як складних, динамічних природних об'єктів з їх численними зв'язками з навколишнім природним середовищем, передусім із рослинним покривом, гідро-, літо- та атмосферою. Ґрунтовий покрив автори розглядають як відкрити гетерогенну біоорганомінеральну буферну самоорганізуючу систему, поверхневу родючу оболонку кори вивітрювання як висхідну (початкову) ланку в ланцюгах малого біологічного і великого геологічного кругообігів речовин та енергії.

Аналіз і практика організації наукових досліджень показують, що проблемні питання, які слід вирішувати, можна об'єднати, як і в будь-якій природознавчій дисципліні, у 2 великі групи завдань: завдання, які вирішують за досить короткий проміжок часу (3–5 років) допрацюванням проблемних питань, систематизацією досягнутих знань, їх поглибленням та вдосконаленням; завдання фундаментальної цінності, вирішення яких потребує тривалого часу (15 і більше років) і які спрямовані на докорінну інноваційну корекцію ґрунтоохоронних, меліоративних і агротехнологічних заходів, що забезпечують градаційну трансформацію ґрунтів і ґрунтового покриву.

Останніми десятиріччями науково-дослідницькі зусилля ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського» були спрямовані на узагальнення, аналіз і синтез ґрунтознавчих досягнень та створення динамічної інформаційної бази даних про ґрунтові ресурси України з подальшою трансформацією її в «Інформаційну систему ґрунтових ресурсів України» (ІСГРУ) та з перспективою адаптивного входження у світову «Глобальну ґрунтового-інформаційну систему» (Global Soil Information System – GLOSIS) у рамках діяльності Глобального ґрунтового партнерства (Global Soil Partnership). Інноваційний пріоритет у створенні національної Інформаційної системи України про ґрунтові ресурси (ІСГРУ) надано методичним і конструктивним особливостям 3 найбільш інформативних міжнародних баз даних: Базі даних ґрунтів і земель (Soil and Terrain database – SOTER), Світовій ґрунтовій інформаційній службі

(World Soil Information Service – WoSIS) і Карті ґрунтів світу (Global Soil Map). Подальші дослідження з розв'язання проблем створення, наповнення та функціонування ІСГРУ, її адаптацію та входження в міжнародні бази даних, а також як методологічної основи для аналізу і виявлення слабких і сильних сторін у ґрунтознавчих дослідженнях, мають стати інноваційними завданнями та пріоритетами в розвитку вітчизняного інформаційного ґрунтознавства [9].

Ґрунти забезпечують засоби до існування всього населення Землі – понад 7,5 мільярда людей, вони є основою для численних екосистемних функцій, які прямо або побічно підтримують здоров'я і благополуччя людини. Це найбільш очевидно, коли ми розглядаємо ґрунт як середовище, на якому майже всі продовольчі культури і корми для худоби, включаючи пасовища, безпосередньо сприяють досягненню цілей сталого розвитку. Саме живі спільноти – ґрунтового біорізноманіття – в ґрунті керують процесами, що мають центральне значення для росту рослин, безпосередньо впливають на здоров'я і благополуччя людини за допомогою виробництва кормів для сільськогосподарських культур і худоби.

Ілюстрації цінності ґрунтового біоти для підтримки глобального виробництва продовольства численні і різноманітні. Наприклад, ґрунтова фауна і мікроорганізми керують кругообігом поживних речовин на землі, розкладаючи мертвий рослинний і тваринний матеріал і перетворюючи його в форми, легко використовувані живими організмами. Кругообіг поживних речовин у ґрунті відіграє центральну роль у зростанні рослин, безпосередньо впливаючи на здоров'я і благополуччя людини за допомогою виробництва кормів для сільськогосподарських культур і худоби [7].

Крім підтримки росту рослин, ґрунти впливають на здоров'я і благополуччя людини як джерело і регулятор шкідників і патогенів, а порушення різноманітності і взаємодії ґрунтового біоти можуть перешкоджати регуляції цих захворювань. Шкідники і патогени сільськогосподарських культур і домашньої худоби можуть чинити серйозний негативний вплив на виробництво продуктів харчування, здоров'я і благополуччя людей.

Ґрунти також є домом для хвороботворних організмів, які безпосередньо впливають на людей, таких як паразити-гельмінти (нематода *Strongyloides*) і енцефаліт головного мозку (*Naegleria fowleri*), а також *Coccidioides immitis*, гриб, що викликає лихоманку. Тоді як хвороботворні організми можуть бути проблематичними і навіть небезпечними, різноманітні ґрунтові спільноти, як правило, корисні для здоров'я людини і забезпечують контроль над патогенами за допомогою конкуренції з хвороботворними агентами і хижацтва для людей, домашньої худоби та сільськогосподарських культур [4]. Ґрунтові бактерії та гриби також є цінними джерелами антибіотиків, у тому числі такі, що давно зарекомендували себе, як пеніцилін, що вироблений *Penicillium chrysogenum*, і нових антибіотиків з некультурних бактерій, які показують перспективи для запобігання розвитку стійкості до антибіотиків.

На додаток до безпосередньої підтримки виробництва продовольства за допомогою ведення

сільського господарства і скотарства ґрунт забезпечує доступ до економічних засобів до існування. Сільський спосіб життя і культура, зосереджені навколо сільського господарства, взаємодіють з ґрунтом, іноді прямо, а часто і побічно. Для жінок-фермерів ці економічні можливості також можуть сприяти досягненню ґендерної рівності. Біорізноманіття ґрунту сприяє багатьом аспектам здоров'я і благополуччя людини завдяки численним екосистемним функціям. Пріоритетність біорізноманіття ґрунтів у політиці та діях також визначає пріоритетність цього набору переваг для здоров'я та благополуччя людини, надаючи скоординовану можливість для просування глобальних програм сталого розвитку.

Біорізноманіття ґрунту підтримує життя на суші, включаючи поширені, а також рідкісні і зникаючі види. Визнання того, що ґрунтові організми є частиною глобальної втрати видів, є невід'ємною частиною запобігання вимирання загалом. Ключовим кроком у запобіганні втраті видів, що мешкають у ґрунті, є розгляд ґрунту як середовища проживання, гідного захисту і збереження. Ґрунтові організми також можуть захищати біорізноманіття шляхом боротьби з інвазивними видами.

На додаток до того, що ґрунтові організми становлять 25% наземного біорізноманіття, вони підтримують життя на поверхні як безпосередньо в якості джерела їжі, так і побічно за допомогою таких процесів, як розкладання і кругообіг поживних речовин [16]. Хребетні, включаючи амфібій, птахів, ссавців і рептилій, покладаються на багатьох ґрунтових безхребетних як джерело їжі і можуть використовувати ґрунт як укриття.

Ґрунтові організми мають вирішальне значення для росту і виробництва рослин за рахунок кругообігу поживних речовин. Рослини та інші наземні організми користуються запилювачами, які живуть у ґрунті протягом деякого або всього їхнього життєвого циклу. Своєю чергою рослини живлять ґрунтову харчову мережу через кореневі екsudати і надходження мертвого рослинного матеріалу. Різноманітність рослинних ресурсів, а також складність середовища проживання підтримують високий рівень різноманітності, що відбувається в декількох масштабах (тобто молекулярному, агрегатному, горизонтальному і ландшафтному) [2].

Коли вода проходить через ґрунт на своєму шляху до струмків, річок, океанів, озер і підземних вод, ґрунт і життя в ній об'єднують наземні і водні системи. Під час фільтрації вода проходить через пори ґрунту, як великі, так і малі, що уповільнює швидкість потоку і забезпечує хімічні та біологічні взаємодії. Вода, що виходить з ґрунту, де ці процеси протікають добре, стає чистішою, що приносить користь людям і водній флорі і фауні.

Біорізноманіття ґрунту відіграє очевидну роль у біологічному використанні ґрунтових вод, але багато організмів також сприяють фізичній та хімічній взаємодії між водою та ґрунтовою матрицею. Коріння рослин і їх виділення відіграють вирішальну роль у динаміці водного потоку в ґрунті. Крім того, біотичні взаємодії між рослинами і мікробами можуть безпо-

середньо впливати на гідрологію, і на ці взаємодії впливає зміна клімату [6].

Поліпшення фільтрації води також збільшує можливості рослин і ґрунтових організмів використовувати розчинені і зважені поживні речовини, такі як нітрати і фосфати, зменшуючи стік поживних речовин у поверхневі і підземні води. Ґрунтовий мікробний метаболізм фосфатів і нітратів переробляє ці поживні речовини в наземних системах і обмежує експорт у водні системи. Використання цих екологічних процесів може стати важливим способом зниження залежності від добрив і поліпшення якості води, а також зменшення зон евтрофікації, таких як великі «мертві зони», які з'являються в Мексиканській затоці поблизу Сполучених Штатів, Оманському морі між Іраном і Оманом, і Жовтому морі поблизу Китаю. На додаток до поживних речовин деякі бактерії і гриби здатні розкласти забруднюючі речовини. Зв'язок біорізноманіття ґрунтів з якістю води та гідрологією – це сфера, в якій гостро необхідні додаткові дослідження, оскільки якість та постачання води є серйозною проблемою для громад у всьому світі, включаючи багаті країни [8].

Оскільки більше 75% органічного вуглецю (C) ґрунту знаходиться у верхньому метрі ґрунтів, управління ґрунтом відіграє ключову роль у тому, як ґрунти можуть діяти як поглинач і накопичувати більше C. Шлях C у ґрунт в основному проходить через рослини, які поглинають вуглекислий газ (CO₂) з атмосфери під час фотосинтезу і використовують його як будівельні блоки для коренів, стебел і листя. Живі рослини переміщують C під землею у вигляді кореневої тканини і корневих виділень, які легко включаються в мікробну біомасу і або вдихаються, або відкладаються у вигляді складних органічних молекул. Оскільки підземний C зберігається у вигляді органічної речовини, він являє собою динамічний пул, який може бути зменшений за рахунок дихання, виділення парникових газів, таких як CO₂, метан (CH₄) і закис азоту (N₂O), або збільшений за рахунок надходження органічних речовин, а саме коренів, детриту і мікробної біомаси ґрунту. Завдяки цим процесам ґрунт є найважливішою частиною вирішення проблеми глобальної зміни клімату. Ґрунт уже є частиною деяких кліматичних рішень.

Роль ґрунтового біорізноманіття в регулюванні викидів парникових газів і зберіганні ґрунтового вуглецю добре визнана. Баланс C у ґрунтах контролюється інтерактивними ефектами клімату, різноманітності рослин і біорізноманіття ґрунтів [7], і саме ґрунтове співтовариство в кінцевому підсумку контролює короткострокові і довгострокові потоки і потоки C у ґрунтах і з них [8]. Багато досліджень зосереджувалися на важливій ролі ґрунтових мікроорганізмів у розкладанні рослинного сміття, значною мірою тому, що бактерії та гриби виробляють набір ферментів, здатних розщеплювати рослинні молекули, що повільно розкладаються, такі як целюлоза та лігнін. В оцінці здатності ґрунтів накопичувати C ми також повинні враховувати конкретні функціональні типи й особливості мікробного співтовариства [3]. Наприклад, мікробні ознаки або функціональні групи, які будуть контролювати

циклічність і зберігання С, включають: ефективність використання С, швидкість обороту біомаси спільноти, позаклітинні ферменти, що продукуються мікробами, і стехіометрію. Деякі з цих показників включаються в нові моделі С, такі як стабілізація матриці мікробної ефективності і стабілізація мікробного мінерального вуглецю.

Ґрунтові тварини також відіграють важливу роль у розкладанні сміття та викидах парникових газів. За рахунок подрібнення листя ґрунтова фауна збільшує площу поверхні підстилки, що збільшує швидкість мікробного розкладання. Багато ґрунтових тварин споживають опале листя, перетравлюючи опале листя і виділяючи екскременти. Екскременти ґрунтової фауни розкладаються повільніше, ніж опале листя. Ґрунтова фауна зазвичай збільшує швидкість розкладання підстилки в помірному і вологому тропічному кліматі, але не обов'язково в холодному сухому середовищі. Активність дощових черв'яків може як стабілізувати С ґрунту, так і збільшити викиди парникових газів залежно від місцевих екосистемних умов і клімату. Біорізноманіття ґрунтів є важливим засобом для більш глибокого розуміння, модельного прогнозування та дій із землекористування для вирішення проблеми зміни клімату.

Результати дослідження та їх обговорення.

Незважаючи на важливу роль, яку біорізноманіття ґрунту відіграє у всіх екосистемах, ґрунтові організми стикаються з багатьма з тих же загроз, що і наземні організми, і отримують набагато менше досліджень, уваги засобів масової інформації та правового захисту. Втрата середовища існування в результаті змін у землекористуванні, зміни клімату та інвазивних видів, як надземних, так і підземних, є такою ж проблемою для ґрунтових організмів, як і для наземних і водних організмів.

Втрата середовища проживання є основною загрозою для ґрунтової біоти. Сільське господарство є основною причиною втрати середовища існування і скорочення біорізноманіття в усьому світі, включаючи переведення земель у сільськогосподарське використання і методи управління в агро-екосистемах. Якість середовища проживання може погіршитися через забруднення, включаючи надмірне надходження поживних речовин і інвазивних видів. Забруднення важкими металами може призвести до того, що в громадах будуть домінувати кілька таксонів, які можуть переносити або навіть процвітати у разі високих рівнів хімічного впливу з відповідним зменшенням таксонів, поширених у незабруднених ґрунтах. Збільшення надходження азоту в результаті атмосферного осадження або прямого внесення добрив також є формою забруднення і може призвести до зміни бактеріальних спільнот ґрунту, зменшення ацидобактерій і веррукомікробій і збільшення актинобактерій і ферм, а також зниження загальної мікробної активності.

Інвазивні види також можуть вплинути на якість середовища проживання. Інвазивні рослини можуть змінювати підземні спільноти за рахунок виділення ексудатів, токсичних для деяких ґрунтових організмів, таких як арбускулярні мікоризні гриби, змін у N-циклі, таких як інвазивні бобові, змін частоти та

інтенсивності пожеж та/або змін у підстилці рослин і коренях. Здебільшого інвазивні рослини збільшують різноманітність і велику кількість ґрунтових організмів, особливо коли інвазивні рослини призводять до збільшення підстилки і коренів. В інших ситуаціях ґрунтові організми можуть бути інвазивними видами, що знижують пристосованість рослин, різноманітність і чисельність тварин. Є достатньо досліджень про те, що ґрунтові середовища існування стикаються з численними загрозами, від прямого і непрямого надходження забруднюючих речовин і поживних речовин до змін у надземних спільнотах, включаючи екзотичні види. Однак втрата і деградація середовища проживання – не єдині загрози біорізноманіттю ґрунтів.

Зміна клімату є першочерговою проблемою нашого покоління, і на ґрунтову біоту це впливає так само, як і на все інше життя на Землі. Зміна клімату включає у себе низку змін навколишнього середовища, включаючи концентрацію парникових газів в атмосфері, а саме CO₂, кількість і частоту опадів, а також температуру. У глобальному масштабі ці змінні, за прогнозами, зміняться в різних напрямках і величинах, і тому розуміння того, як біорізноманіття ґрунтів реагує на зміну клімату, вимагає глибокого розуміння як біорізноманіття ґрунтів у біомас, прогнозованих наслідків зміни клімату, так і того, як популяції і спільноти ґрунтових таксонів можуть реагувати. Метааналіз досліджень мікробного співтовариства ґрунту показав, що реакція чисельності ґрунтових грибів на підвищений рівень CO₂ варіювалася залежно від таксона та екосистеми. Змінні режими випадання опадів впливають як на надземних, так і підземних комах. Температура також має унікальний вплив на ґрунтові спільноти. Підвищені температури мають фізіологічний вплив на ґрунтову біоту, оскільки деякі таксони мають дуже вузький температурний діапазон для оптимального функціонування, а інші можуть переносити більш широкий діапазон. З огляду на численні взаємопов'язані наслідки глобальної зміни клімату та надмірну різноманітність ґрунтових спільнот існує багато невідомостей у розумінні впливу зміни клімату на біорізноманіття ґрунтів.

Наявні можливості для збереження і підтримки біорізноманіття ґрунтів, яке своєю чергою підтримує різноманітність життя в усьому світі, включаючи людство. Багато заходів, спрямованих на підтримку біорізноманіття на поверхні, також підтримують біорізноманіття під землею. Оскільки біорізноманіття ґрунтів вплетене в багато аспектів екосистем, чіткий розгляд біорізноманіття ґрунтів може забезпечити цілісний підхід до просування багатьох компонентів глобальної стратегії сталого розвитку. Збереження наявних природних зон, відновлення деградованих місць проживання, застосування стійких методів ведення сільського господарства і використання міського біорізноманіття – все це методи, які зміцнюють і підтримують різноманітні ґрунтові спільноти, а також функції і послуги, які вони надають у всіх екосистемах.

Захист природних земель має вагомий значення для захисту ґрунтової біоти та функцій, які вона

забезпечує. У визначенні пріоритетів охорони природних територій основна увага приділялася надземному біорізноманіттю, значною мірою тому, що знання про біорізноманіття ґрунтів відстають від знань про надземне біорізноманіття. Захист ґрунтового середовища проживання в природних зонах є важливим джерелом цієї інформації, що представляє унікальні місця проживання та екосистеми з меншим впливом людини. Біорізноманіття ґрунтів у межах природних зон покращує якість води і може забезпечити захист населених пунктів від повеней в екстремальних ситуаціях. Ґрунтові організми в незайманих ґрунтах також мають вирішальне значення для вирішення проблеми глобальної зміни клімату, оскільки вони накопичують С і регулюють кругообіг парникових газів. Моделі показали, що захист районів від вирубки лісів або перетворення у сільське господарство може бути економічно ефективним способом запобігання викидам парникових газів у ґрунті внаслідок мікробної діяльності, приносячи соціальні вигоди, що набагато перевищують передбачувані витрати.

Охорона та управління природними територіями мають вирішальне значення для підтримки біологічного різноманіття, як надземного, так і підземного. Багато рішень з управління земельними ресурсами приймаються наземними рослинами і тваринами, але ґрунтові організми можуть стати важливим напрямом в управлінні природними територіями. Наприклад, використання призначеного вогню для зменшення та запобігання проникненню деревних рослин або інвазивних видів на пасовища приносить користь комахам, що мешкають у ґрунті, і наземним організмам, які покладаються на відкриті місця проживання на луках. Час і інтенсивність пожежі можуть бути змінені для захисту чисельності і різноманітності комах, що мешкають у ґрунті. Деякі інвазивні види рослин впливають на ґрунтові організми, включаючи симбіотичні мікоризні гриби, що може вплинути на здатність місцевих рослин конкурувати. Такі міркування важливі для керуємих земельними ресурсами, які приймають рішення про те, коли і як боротися з інвазивними видами в природних зонах. Багато що ще належить дізнатися про ґрунтові спільноти різних типів середовищ існування по всьому світі, і природні зони є важливим способом як захисту ґрунтових спільнот, так і збереження екосистемних послуг для сталого майбутнього.

Скорочення біорізноманіття та екосистемних послуг, що надаються природою в основному в результаті землекористування людини, є повсюдним явищем у всьому світі. Відновлення екосистем є одним з найкращих способів окупності інвестицій у поліпшення ґрунтового середовища проживання та функціонування з метою забезпечення глобальної стійкості. Відновлення екосистем для збереження біорізноманіття ґрунтів може забезпечити численні екосистемні функції та послуги, які підтримують глобальну стійкість. Біорізноманіття ґрунтів і надані їм послуги можуть бути як метою відновлення, так і засобом відновлення деградованих систем.

Стале виробництво продуктів харчування має велике значення для майбутнього людства і при-

роди на землі, і, як зазначено вище, ґрунт і її біорізноманіття є основою сталого сільського господарства. Стійкі сільськогосподарські дії, орієнтовані на біологію ґрунту, необхідні у всіх культурах і умовах ведення сільського господарства. Існує безліч досліджень промислових систем просапних культур, у тому числі переконливі докази того, що обробка ґрунту негативно впливає на ґрунтові організми з великим розміром тіла, включаючи дощових черв'яків, коллембол і кліщів. Системи без обробки ґрунту і зі зниженою обробкою ґрунту зазвичай підтримують більшу частку грибів, ніж бактерій, порівняно зі звичайними системами. Управління із щорічною обробкою ґрунту призвело до скорочення біорізноманіття ґрунту і зміщення спільнот на користь організмів з малим тілом порівняно із сівозмінними трав бобових і пасовищами, керованими без будь-якої обробки ґрунту. Менш таксономічно різноманітні ґрунтові спільноти можуть призвести до зниження продуктивності рослин, меншого обороту азоту і більшого вимивання фосфору, що може привести до зниження врожайності сільськогосподарських культур і збільшення втрат поживних речовин з агроекосистем. На додаток до обробки ґрунту наявність покривних культур і збереження підстилки є важливими факторами для ґрунтових спільнот. Покривні культури, які вирощуються на полях просапних культур поза основним вегетаційним періодом, запобігають тривалі періоди часу, коли поля оголюють ґрунт. Живі корені покривних культур зменшують ерозію ґрунту і забезпечують ресурси у вигляді кореневої тканини та ексудатів, які підтримують численні ґрунтові організми, включаючи мікроорганізми, гриби та нематоди. Багаторічні культури, як правило, покращують середовище проживання ґрунтових організмів, зменшуючи втрати азоту і створюючи органічну речовину. Різноманітність рослинних ресурсів за рахунок різних сівозмін сільськогосподарських культур і покривних культур може змінити мікробіологічні профілі і активність ґрунту, що призведе до більшого накопичення вуглецю у ґрунті. Збереження підстилки і різноманітність ґрунтових організмів відіграють важливу роль у накопиченні і зберіганні органічної речовини ґрунту, а в деяких системах збільшення вмісту органічного вуглецю у ґрунті також матиме додаткову перевагу у вигляді підвищення врожайності сільськогосподарських культур. Крім того, більше біорізноманіття ґрунту та функціональна надмірність, яку вона забезпечує, можуть збільшити здатність ґрунту продовжувати виконувати такі функції, як обмін поживних речовин та продуктивність рослин у сценаріях глобальних змін.

Багато традиційних підходів до сільського господарства використовують різноманітність культур і сівозмін для поліпшення виробництва і подолання циклів хвороб. У широкому контексті глобального сільського господарства ґрунтові організми відіграють важливу роль у різних підходах та кліматичних умовах. Біорізноманіття ґрунтів лежить в основі сталого сільського господарства, підтримуючи рослинництво і тваринництво у всіх типах систем з меншими витратами, які є дорогими для фермерів

і впливають на нецільові види і місця проживання. Визнання ґрунту складними біологічними екосистемами, які підтримують стійкі агроекосистеми, а не системи введення/виведення, що підлягають оптимізації, є критичною зміною перспективи, необхідної для просування сталого майбутнього.

Приблизно 55% людей у всьому світі живуть у міських районах, і очікується, що до 2050 року це число зросте до 68%. Розширення міських районів може призвести до руйнування ґрунтових середовищ існування в результаті спорудження будівель і тротуарів; однак міські райони можуть бути домом для різноманітних спільнот ґрунтових мікробів і безхребетних. Ґрунт є основою послуг, що надаються природою міським районам. Як згадувалося раніше, ґрунтові організми можуть безпосередньо розкладати забруднюючі речовини і хелатувати важкі метали на колишніх промислових об'єктах, підвищуючи безпеку цих об'єктів у густонаселених районах. Міські ґрунти підтримують рослини в зелених зонах і вуличних бордюрах, які можуть знизити температуру повітря в містах і забезпечити простір для ігор і відпочинку. Ґрунтова фауна відіграє ключову функціональну роль у міських дощових садах, які поглинають зливу воду та фільтрують забруднюючі речовини, знижуючи навантаження на системи управління зливовими водами.

Міські ґрунти демонструють деяку конвергенцію, особливо з вмістом органічного С і загального N у ґрунті, і деяку відмінність від вихідного матеріалу і клімату. З біологічної точки зору глобальне обстеження міських районів виявило конвергенцію спільнот архей і грибів, але не бактерій. Дослідження міських зелених насаджень виявили такі ж рівні ґрунтового біорізноманіття, як і у разі обстеження ґрунтів у навколишніх природних зонах, хоча ця закономірність не обов'язково справедлива для деяких таксонів.

Є безліч способів підтримувати і заохочувати біорізноманіття ґрунтів у міських районах. Зелені насадження підтримують найбільшу біологічну різноманітність ґрунтів у містах. Пріоритет зелених насаджень у міському плануванні є важливим способом збереження біорізноманіття ґрунту та збереження екосистемних переваг, які воно забезпечує. У разі планування використання міського простору, включаючи парки, використання мульчі для ґрунтопокривного покриття замість каменю, збільшує чисельність дощових черв'яків і знижує температуру поверхні, збільшуючи проникнення води і пом'якшуючи ефекти «теплового острова». Активність ґрунтових організмів у дощових садах потенційно може посилити проникнення зливових вод, видалення патогенів і видалення надлишкових поживних речовин і забруднюючих речовин. Ущільнення ґрунту може бути зменшено за рахунок усунення перешкод (наприклад, пішохідного руху або тимчасової споруди). Зелені дахи можуть створити додаткове середовище проживання, підтримуючи унікальні та різноманітні спільноти ґрунтових грибів та жуків. Крім того, продуманий вибір у галузі міського розвитку, який «нарощує, а не руйнує», може стати важливим інструментом захисту біорізнома-

ніття ґрунтів і екосистемних послуг не тільки в міських районах, а й запобігання перетворенню природних зон і продуктивних сільськогосподарських угідь. Додатковою перевагою багатьох з цих підходів є створення місць, де люди можуть збиратися, ділитися, вчитися, грати і відпочивати. Оскільки більша частина людства живе в містах, і цей відсоток зростає, міські райони є важливою частиною нашого сьогодення і майбутнього, і дії, спрямовані на підтримку біологічного різноманіття під землею, можуть зробити міста більш придатними для життя і стійкими.

Висновки і перспективи. Знання та дослідження в галузі біорізноманіття ґрунтів виходять за рамки академічних кіл і використовуються для підтримки вирішення проблем втрати біорізноманіття, місцевих (якість води, продовольча безпека), регіональних (деградація земель) і глобальних (зміна клімату) проблем. Управління ґрунтами як динамічними живими системами, якими вони є, відкриває нову перспективу для комплексних дій і рішень. Ґрунтові організми, мікроскопічні та макроскопічні, підтримують усі екосистеми: кругообіг енергії та поживних речовин для підтримки росту рослин та тварин у наземних системах та підтримання балансу поживних речовин у воді, тим самим впливаючи на водні організми та здоров'я екосистем. Те, як біорізноманіття ґрунту взаємодіє з численними функціями екосистем, робить його природним напрямом для просування цілісного глобального порядку денного в галузі сталого розвитку. Біорізноманіття ґрунтів лежить в основі природних рішень для клімату, біорізноманіття та людства, включаючи захист природних територій, відновлення деградованих екосистем, застосування стійких методів ведення сільського господарства та адаптацію міських районів до природи та людей. Пропонується провести додаткові дослідження, щоб визначити взаємозв'язок між досвідом у галузі біорізноманіття ґрунтів і реальними рішеннями для сталого майбутнього, і це необхідно робити зараз як для захисту біорізноманіття ґрунтів, так і для просування програм сталого розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Bar-On Y.M., Phillips R., Milo R. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. Vol. 115, No. 25. P. 6506–6511. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115> (дата звернення: 31.03.2022).
2. Global mismatches in aboveground and belowground biodiversity / E.K. Cameron et al. *Conservation Biology*. 2019. Vol. 33, No. 5. P. 1187–1192. URL: <https://doi.org/10.1111/cobi.13311> (дата звернення: 31.03.2022).
3. The global soil community and its influence on biogeochemistry / T.W. Crowther et al. *Science*. 2019. Vol. 365, No. 6455. P. eaav0550. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aav0550> (дата звернення: 31.03.2022).
4. Soil Animals and Pedogenesis / L. Cunha et al. *Soil Science*. 2016. Vol. 181, No. 3/4. P. 110–125. URL: <https://doi.org/10.1097/ss.000000000000144> (дата звернення: 31.03.2022).

5. A global atlas of the dominant bacteria found in soil / M. Delgado-Baquerizo et al. *Science*. 2018. Vol. 359, No. 6373. P. 320–325. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aap9516> (дата звернення: 31.03.2022).

6. Gibbs H.K., Salmon J.M. Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*. 2015. Vol. 57. P. 12–21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.024> (дата звернення: 31.03.2022).

7. Guarino B. Anthrax sickens 13 in Western Siberia, and a thawed-out reindeer corpse may be to blame. *Washington Post*, July, 28, 2016.

8. Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter / J.W. Harden et al. *Global Change Biology*. 2017. Vol. 24, No. 2. P. e705–e718. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.13896> (дата звернення: 31.03.2022).

9. Bongaarts J. IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Population and Development Review*. 2019. Vol. 45, No. 3. P. 680–681. URL: <https://doi.org/10.1111/padr.12283> (дата звернення: 31.03.2022).

10. The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls / R.B. Jackson et al. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2017. Vol. 48, No. 1. P. 419–445. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234> (дата звернення: 31.03.2022).

REFERENCES:

1. Bar-On Y.M., Phillips R., & Milo R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(25), 6506–6511.

2. Cameron E.K., Martins I.S., Lavelle P., Mathieu J., Tedersoo L., Bahram M., ... & Eisenhauer N. (2019). Global mismatches in aboveground and belowground biodiversity. *Conservation Biology*, 33(5), 1187–1192.

3. Crowther T.W., Van den Hoogen J., Wan J., Mayes M.A., Keiser A.D., Mo L., ... & Maynard D.S. (2019).

The global soil community and its influence on biogeochemistry. *Science*, 365(6455), eaav0550.

4. Cunha L., Brown G.G., Stanton D.W.G., Da Silva E., Hansel, F.A., Jorge G., McKey D., Vidal-Torrado P., Macedo R.S., Velasquez E., James S.W., Lavelle P., & Kille P. (2016). Soil Animals and Pedogenesis. *Soil Science*, 181(3/4), 110–125. DOI: <https://doi.org/10.1097/ss.0000000000000144>.

5. Delgado-Baquerizo M., Oliverio A.M., Brewer T.E., Benavent-González A., Eldridge D.J., Bardgett R.D., Maestre F.T., Singh B.K., & Fierer N. (2018). A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science*, 359(6373), 320–325. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aap9516>.

6. Gibbs H.K., & Salmon J.M. (2015). Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*, 57, 12–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.024>.

7. Guarino B. (2016). Anthrax sickens 13 in Western Siberia, and a thawed-out reindeer corpse may be to blame. *Washington Post*, July, 28, 2016.

8. Harden J.W., Hugelius G., Ahlström A., Blankinship J.C., Bond-Lamberty B., Lawrence C.R., Loisel J., Malhotra A., Jackson R.B., Ogle S., Phillips C., Ryals R., Todd-Brown K., Vargas R., Vergara S. E., Cotrufo M.F., Keiluweit M., Heckman K.A., Crow S.E., ... Nave L.E. (2017). Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter. *Global Change Biology*, 24(2), Article e705–e718. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13896>.

9. Bongaarts J. (2019). IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Population and Development Review*, 45(3), 680–681. DOI: <https://doi.org/10.1111/padr.12283>.

10. Jackson R.B., Lajtha K., Crow S.E., Hugelius G., Kramer M.G., & Piñeiro G. (2017). The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48(1), 419–445. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234>.