



ДІДУХ

Яків Петрович — член-кореспондент НАН України, доктор біологічних наук, професор, завідувач відділу геоботаніки та екології Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного

СИНЕРГЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ СТРУКТУРИ, РОЗВИТКУ І СТІЙКОСТІ БІОТОПІВ ТА ПРОБЛЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЇХ ЗМІН

За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 29 жовтня 2014 року

Розв'язання складних екологічних проблем у контексті переходу на засади сталого розвитку вимагає застосування нових термодинамічних, синергетичних підходів, в основі яких лежить теорія нелінійності, використання якої потребує переведення якісних характеристик екосистем у кількісні одиниці. Розроблена автором методика синфітоіндикації дає змогу застосувати ряд сучасних математичних методів і оцінити характер залежності між зміною екофакторів та біотопів. На основі понять теорії фракталів і теорії катастроф розглянуто проблеми структуризації, розвитку (сукцесії, синеволюції), характер трансформації енергії степових і лісових екосистем, а також їх охорони. Розкрито проблеми інвазії видів та всихання ялиників Карпат у контексті кліматичних змін.

Ключові слова: термодинаміка, синергетика, енергія, теорія фракталів, теорія катастроф, екосистеми, біотопи, синфітоіндикація, сукцесія.

Вступ

Реалізація положень Конвенції про охорону біологічного різноманіття, Рамкової конвенції ООН про зміну клімату та Конвенції про боротьбу зі спустелюванням, прийнятих на всесвітньому саміті ООН у Ріо-де-Жанейро (1992), потребує створення відповідного плану дій згідно з національною стратегією переходу України на засади сталого розвитку. Хоча таку стратегію розробляли й обговорювали на різних рівнях, офіційно її так і не було прийнято. Проте підписання Україною угоди про асоціацію з ЄС неодмінно викличе необхідність її ухвалення.

Екологічна складова є одним із ключових питань стратегії сталого розвитку, якому, на жаль, у нас відводять другорядну

роль. Разом з тим, екологічні проблеми все більше загострюються як у глобальному масштабі, так і в окремих регіонах, і вирішувати їх стає дедалі важче. Екосистеми мають надто складну структуру, їх стан змінюється стрибкоподібно, причинно-наслідкові зв'язки є непрямыми, мають імовірнісний характер. Це потребує осмислення, пояснення, особливо сьогодні, у зв'язку з необхідністю прогнозування природних змін, у тому числі рослинності, під впливом клімату. При цьому постає багато питань, які не можна розв'язати в рамках класичних підходів, а за відсутності аргументованих відповідей виникає чимало спекуляцій. Отже, для вирішення всіх цих проблем потрібні інші підходи, ніж ті, що використовувалися раніше, інші методології і методи досліджень.

Термодинамічні та синергетичні підходи в екології

Осмислюючи численні факти, ми дійшли думки про необхідність використання в теорії організації та розвитку екосистем термодинамічних підходів і відповідних законів, основаних на характеристиках енергії, яку Ю. Одум влучно назвав «екологічною валютою» [1]. Енергія як мірило зміни організації характеризується тим, що:

1) є одиницею її вимірювання і обчислення, відомі співвідношення між показниками біомаси, вуглецю (гумусу), дихання, фотосинтезу тощо;

2) фізичні закони термодинаміки адаптовані до відкритих екосистем;

3) на основі енергетичних показників можна оцінити процеси кругообігу речовин, елементів, трофічних ланцюгів (живлення консументів, редуцентів), відомі закони перерозподілу її на різні рівні організації «піраміди енергії»;

4) енергетичні зміни відображують емергентні властивості екосистем, тому енергетична концепція лежить в основі функціонування, розвитку екосистем, їх самоорганізації.

Водночас було доведено, що деградація, втрата природних екосистем спричинює прискорене знищення тих енергетичних запасів,

які акумулює біота із сонячної енергії. Межу самовідновлення екосистем, що не повинна перевищувати втрату 1% чистої первинної продукції біоти, ми перетнули ще на початку ХХ ст., і нині ця величина становить близько 10%. Це порушило механізми біотичного регулювання, спричинило незворотність, вихід екосистем за межі природних функцій, наростання швидкості деградації процесів, якісних стрибків, негативних явищ турбулентності та наближення до катастрофічного стану. Окремі регіони зазнали деградації, і в них відбуваються такі глобальні, незворотні зміни, що зачіпають біосферу в цілому.

У зв'язку з цим можна сформулювати такий висновок: *під дією антропогенного фактора планета Земля втрачає енергетичні запаси швидше, ніж здатна їх відновлювати. Швидке скорочення цих запасів призвело до енергетичної кризи, що виявляється в екологічній, економічній, політичній сферах, і боротьба за енергетичні ресурси виходить на перший план.* Тому ключовим питанням є підтримка екологічної рівноваги та запровадження механізмів сповільнення деградації довкілля. З огляду на це, головне завдання людства полягає не лише у скороченні антропогенних забруднювальних викидів, а й у збереженні природи планети і забезпеченні біотичних механізмів регулювання, використання та відтворення екосистем, що відображено в теорії біотичної регуляції [2].

За результатами досліджень енергетичних процесів екосистем учені дійшли висновку, що розвиток екосистем спрямовано на вдосконалення механізмів накопичення (фіксації) енергії, зменшення ентропії через поліпшення адаптивних властивостей видів, тобто енергетичний потенціал є рушійною силою, що визначає вектор розвитку екосистем. Такий підхід дає можливість пов'язати вектор трансформації енергії з еволюційними процесами. Разом з тим, перехід від класичної еволюції видів до еволюції екосистем (синеволюції) дозволяє перейти від законів дарвінівської та синтетичної теорії еволюції видів як стохастичного процесу з невизначеною генерацією послідовності поколінь до уявлення про те, що саморозвиток

екосистем відбувається за певними схемами, стратегіями, як спрямований, векторизований процес [3]. Такий підхід вимагає не лише застосування в екології класичних законів термодинаміки до неврівноважених систем [4, 5], а й відкриває шлях до використання досягнень тих похідних дисциплін, напрямів, що сформувалися на основі цієї науки і проникають сьогодні у сферу не тільки природничих, а також і суспільних наук.

Так, у 70-х роках ХХ ст. на основі класичної термодинаміки, системного підходу, кібернетики, гештальтпсихології та ін. зародилася синергетика (*synergio* — співробітництво, співучасть) як наука про теорію самоорганізації систем, процеси їх змінення та розвитку [6, 7]. У математичному плані вона ґрунтується на нелінійних рівняннях, що хоча і набувають широкого застосування в різних сферах природничих, технічних, соціальних, економічних наук, однак часто ще далекі від свого практичного використання, оскільки біологи й екологи не мають відповідної професійної підготовки, а фахівці в галузі теорії синергетики, що розробляють відповідні методи, далекі від природних об'єктів. Отже, на нинішньому етапі розвитку екології йдеться не про застосування цих надскладних методів і теорій, а лише про використання синергетичних підходів, оперування відповідними поняттями, уявленнями.

Нелінійність розвитку екосистем та її оцінка

Сьогодні відбувається філософське осмислення і формування загальнонаукової теорії про нелінійність розвитку природи, що є універсальною і фундаментальною властивістю, основою буття, визначає розвиток природи, її еволюцію. З цими дослідженнями пов'язаний відповідний спосіб мислення та формування світогляду, що повністю відрізняється від лінійного сприйняття, і такий перехід визначає зміну парадигм. Інакше кажучи, сформувалася парадигма нелінійності [8]. Хоча нелінійність часто намагаються протиставити лінійності як щось протилежне, однак, на нашу думку, при

відкиданні останньої втрачається конструктивізм. Тому правильніше було б говорити, що ці поняття не виключають, а доповнюють одне одного. Якщо лінійність указує на тенденції, швидкість, певні закономірності змін, то нелінійність відображує різноманітність варіантів розвитку, можливі ситуації, якісні, стрибкоподібні зміни тощо.

Із законами нелінійності пов'язано багато понять, на основі яких розроблено низку нових методів дослідження та теорій, зокрема методіку нелінійної динаміки із застосуванням теорії ймовірностей, теорії дисипативних структур, концепції самоорганізації, теорії фракталів, теорії біфуркації, теорії флуктуації, теорії атракторів, теорії катастроф, теорії хаосу тощо. Усі ці теорії детально розроблені і використовуються в багатьох науках, однак проблема полягає в тому, як на основі цих теоретичних розробок оцінити структурованість, організацію, розвиток екосистем не лише на словах, а й у кількісних величинах, які можна вимірювати, зіставляти з іншими, будувати відповідні моделі чи прогнози. Такий підхід потребує застосування кількісних показників вимірювання екофакторів, що не завжди можливо. Для цього ми використали розроблену нами методіку синфітоіндикації, де якісні характеристики екофакторів було оцінено в кількісних (бальних) шкалах [9]. У результаті встановлено кореляцію між зміною мінеральних форм азоту в ґрунті та показниками вологості, кислотності, засолення ґрунтів, гідротермічними характеристиками клімату (рис. 1). Отже, термодинамічні підходи в комплексі з методикою синфітоіндикації дають змогу оцінити взаємозалежність між зовнішніми екофакторами та зміною екосистем у кількісних (цифрових) виразах, що відкриває можливість для застосування сучасних математичних методів і виводить екологічні дослідження на більш високий рівень.

Осмислення отриманої інформації навело нас на думку, що складні нелінійні процеси слід звести до простіших залежностей. Однак виявилось, що такі залежності характерні лише для певного просторово-часового проміжку і можуть розглядатися як лінійні, а за

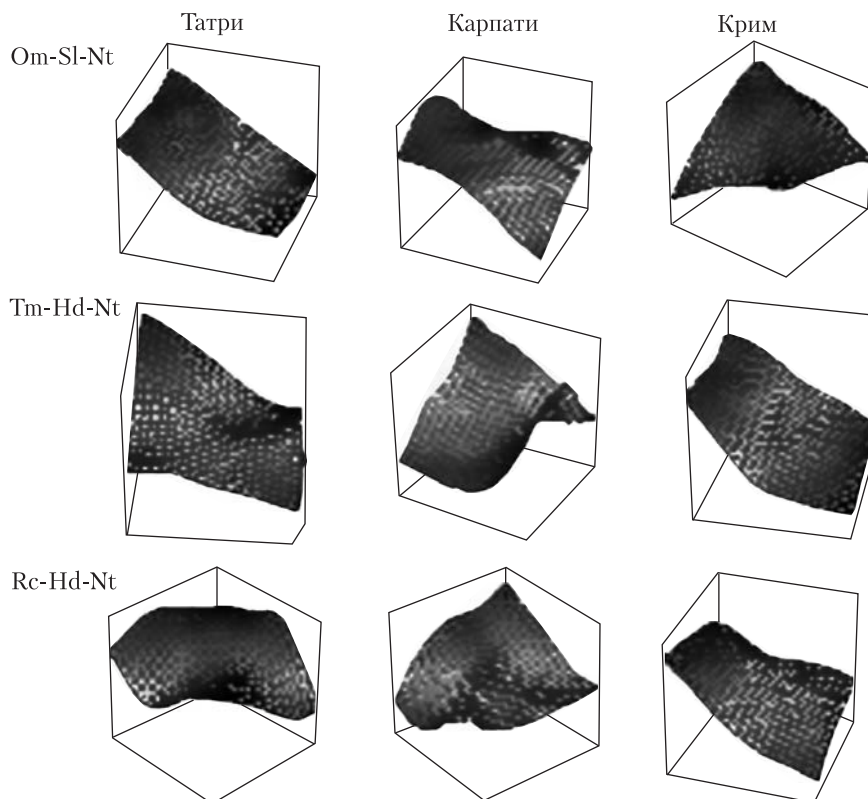


Рис. 1. Фрактальне зображення залежності між зміною показників трьох еко-факторів. Hd – вологість ґрунту; Nt – вміст мінеральних форм азоту в ґрунті; Rc – кислотність ґрунту; Om – омброрежим; Tm – терморежим

його межами ця лінійність втрачається. Отже, в кінцевому результаті ми все одно приходимо до висновку щодо нелінійних змін природних процесів, що потребують оцінки форм такої нелінійності. З уявленням про нелінійність тісно пов'язані теорія фрактальності, теорія катастроф тощо.

Теорія фракталів, теорія катастроф

Сутність теорії фракталів (*fractus* – дроблений, поламаний, розбитий), розробленої Б. Мандельбротом на початку ХХ ст., полягає у способі оцінювання різних геометричних фігур, частини яких нагадують ціле. Йдеться про опис складності конфігурацій, характеру зморшкуватості, звивистості форм природних об'єктів. З одного боку, такі властивості притаманні різноманітним реально існуючим природним

(у тому числі біологічним) об'єктам (окремі крони дерев, кущів, трав, структура популяцій, обриси, контури рослинних угруповань тощо), а з іншого – фрактальність властива сучасним способам моделювання, відображення різних форм структурованості біотичних категорій, закономірностей організації складних систем, взаємозв'язків між елементами (наприклад, побудови дендрограм, структуру яких можна оцінювати з позицій «каскаду подвоєнь», графів, сукцесійних ланок, що будуються за принципом марківських ланцюгів). Інтерпретація цієї структурованості знаходить відображення у відповідних теоріях, як-от теорія графів, теорія марківських ланцюгів тощо, а також у встановлених математичних співвідношеннях, якими описуються численні природні процеси та явища (наприклад, золотий перетин, ряд Фібоначчі, золотий кут, який забезпечує

спіральність розвитку і характеризується рухом з прискоренням). Зокрема, йдеться і про використання алометричних законів, формул, які відображують відношення різних характеристик у процесі їх змінювання і описуються формулою $y = a^x$. Такими є співвідношення між висотою дерев та їх біомасою, об'ємом і площею біотичних об'єктів.

Так, розглядаючи різні форми крон, їх можна звести до кількох геометричних фігур: куля (або її частина), сегмент, циліндр, конус, площина. Якщо оцінювати ці фігури з енергетичних позицій, де запаси енергії пропорційні об'єму фігури, а площа відкритої поверхні — енергообміну, то відомо, що найефективнішою є куля, яка має найменше співвідношення між об'ємом та поверхнею (0,33R), що характеризує таку систему як найстабільнішу (100%). Тому ідеальна форма крон в умовах відсутності конкуренції та «зрілого віку» близька до кулі. Проте найефективнішою формою з позицій розподілу енергії, що характеризує максимальний ріст, є конус, енергетичний потенціал якого найнижчий (33,3%). Це можна простежити на формах крон рослин, які заселяють нові сприятливі біотопи. Зокрема, це чітко спостерігається в процесі заселення деревними видами степових біотопів (рис. 2).

На законах термодинаміки, синергетики ґрунтуються **теорія катастроф** і **теорія зсувів**, що відображують поведінку невірноважених складних систем, до яких належать і екосистеми [10]. Зокрема, розвиток екосистем можна розглядати з позицій рівняння Гельмгольца: $U = F + T$, де U — внутрішня енергія; F — вільна енергія; T — зв'язана енергія. Ключовою в розвитку невірноважених систем є точка біфуркації, що визначає такий критичний стан системи, за якого остання виходить з рівноваги. Це означає якісну перебудову, перехід від одного типу атракторів до іншого і відбувається тоді, коли система не може сприймати зовнішню енергію, тобто формувати внутрішню енергію (U), а зв'язана енергія (T) перевищує внутрішню ($T > U$), що спричинює наростання турбулентних процесів, «внутрішнього хаосу», за якого система не забезпечує



Рис. 2. Ефект конуса при заростанні степів чагарниками і характер перерозподілу енергії (10^6 Дж/м²)

формування зворотних зв'язків, а інформація щодо організації її минулого втрачається. Головний постулат теорії катастроф полягає в тому, що система не може існувати в урівноваженому, стійкому стані, тому вона має віддавати енергію або розпадатися, переходити в якісно інший стан [11]. Зміна екосистеми, зумовлена невідповідністю її стану зовнішньому середовищу, визначає спрямованість і темпи подальшого розвитку, що можна розглядати в аспекті теорії зсувів. Напрямок і швидкість, тобто вектор розвитку системи, визначається характером атрактора, що має енергетичну та інформаційну природу.

Закономірності розвитку екосистем

Розглянувши основні поняття теорій фракталів і теорії катастроф, проаналізуємо, як можна застосувати їх для оцінювання розвитку екосистем, зокрема sukcesій наших степів і лісів.

Степові фітосистеми є високоадаптованими до екстремальних, аридних умов, відзначаються відносно лабільною, нестійкою структурою, орієнтованою на постійний розвиток відповідно до змін зовнішнього середовища. Специфіка їх функціонування полягає у високій активності, значному відчуженні наземної біомаси і акумуляції енергії в підземній частині, яка перевищує надземну в 2–10 разів (рис. 3). Тобто *енергетичний потенціал, що визначає специфіку організації, функціонування і розви-*

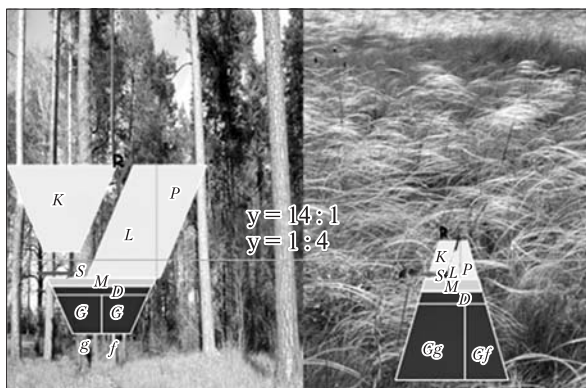


Рис. 3. Порівняльна оцінка енергетичних показників різних компонентів лісових і степових екосистем: *K* – енергія відчуження біомаси консументами; *L* – валова енергія біомаси; *P* – енергія приросту; *R* – енергія опадів; *D* – енергія детриту; *M* – енергія дихання; *Gg* – енергія гумінових кислот у ґрунті; *Gf* – енергія фульвокислот у ґрунті; *S* – енергія синтезу; *Y* – ступінь стійкості екосистем

тку степових систем, знаходиться в підземній сфері (ґрунт + коренева система).

Швидка трансформація енергії забезпечується тим, що в степах домінують злаковники, які, з одного боку, мають розгалужену мичкувату кореневу систему, а з іншого – інтеркалярний ріст і при викошуванні чи випасанні добре відрастають, відновлюючи фітомасу так, що цей приріст у сумі перевищує надземну фітомасу неушкоджених рослин. Фітомаса у степах наростає, відмирає і швидко розкладається, що забезпечує інтенсивний кругообіг. В умовах дефіциту опадів, високого рН ґрунту (>7) підстилка розкладається протягом 9–11 місяців, тому коефіцієнт рециркуляції досить високий ($1:0,83 = 1,2$), у 2,5–8,5 рази перевищує такий у лісах і свідчить про високу потужність трансформації енергії ($\tau = 0,4 \text{ Вт/м}^2$). Фітомаса оновлюється кожні 2–3 роки, тобто в 9 разів швидше, ніж у цілому на суші, і в 14–16 разів швидше, ніж у лісах [12]. Значною мірою це визначає спрямованість розвитку, сукцесії степових екосистем, які істотно залежать від впливу зовнішніх факторів, зокрема едафічних. В умовах абсолютної заповідності накопичення енергії в педосфері досягає певної критич-

ної межі, насичення. Енергія, що надходить, не може засвоюватися. Це порушує баланс, тому екосистема має відповідно реагувати: 1) зменшувати запаси енергії через відчуження біомаси (випасання, сінокосіння, випалювання підстилки); 2) переводити надлишки енергії в надземний біотичний блок; 3) забезпечувати відкачування енергії у ґрунт через зміну дернових процесів на опідзолення. У першому випадку трав'янисті екосистеми зберігають свою структуру, у другому й третьому – формуються чагарникові та деревні ценози. Таке заселення відбувається двома шляхами: появою окремих дерев *Pyrus communis*, *Malus praecox*, *Crataegus sp.*, *Rosa sp.*, розташованих далеко одне від одного (типу савани), і експансією заростей низькорослих чагарників (*Prunus spinosa*, *Cerasus fruticosa*, *Amygdalus nana*, *Caragana frutex*), які розширюють свої позиції. Так, ще з кінця 50-х років ХХ ст. на східній окраїні заповідної Михайлівської цілини зростало кілька дрібних куртин *Prunus spinosa*, з яких розпочалася його інтенсивна експансія. Уже в 1974 р. В.С. Ткаченко зафіксував три невеликі осередки терену в різних частинах абсолютно заповідного степу. Під час геоботанічного картування 1981 р. було виявлено більш як десяток окремих куртин цього чагарнику діаметром від 5 до 23 м. У 2001 р. площа під терняками сягала вже 2,02 га, а кількість окремих кущів і дифузно розсіяних окремих екземплярів збільшилася до 32 [13].

Дослідження показали, що за рік радіус куртини збільшується на 0,6–1,0 м залежно від агрометеорологічних умов. Розрахунки на основі величини діаметра (80 м) куртини, яка утворилася впродовж 35 років, показують, що середній приріст діаметра становить 2,22 м на рік.

Проведені нами дослідження в Ямському степу (Росія) свідчать, що цей процес паралельно супроводжується зміною структури ценозу, який на периферії характеризується низькими (0,5–0,8 м) заростями степових видів *Cerasus fruticosa*, *Amygdalus nana*, далі вищими (1,5–3,0 м) заростями *Prunus spinosa*, *Sambucus nigra*, *Thelycrania sanguine* і, нарешті, у центрі куртини панують дерева *Pyrus communis*, *Malus*

praecox, *Salix caprea*, *Ulmus scabra* висотою понад 5 м. Отже, формується «піраміда» з відповідним збагаченням запасів біомаси і енергії від периферії до центра куртини. Паралельно відбувається зміна енергетичного потенціалу ґрунту (рис. 2).

Аналіз показав, що в типовому чорноземі під куртиною терену вміст гумусу і запаси енергії порівняно з такими показниками трав'яного ценозу з часом інтенсивно зменшуються. Звідси можна зробити висновок, що формування терняків супроводжується перерозподілом енергетичних запасів, а отже, формуванням зовсім іншого енергетичного потенціалу між компонентами екосистеми. З позицій синергетики це можна розглядати як процес, коли степова екосистема у своєму розвитку досягає точки біфуркації, поза якою вона існувати не може, і тому якісно змінюється, переходить в інший стан, набуває цілком іншої структури, а подальший розвиток визначається іншим типом атракторів. Для збереження попереднього стану необхідне «відкачування енергії», тобто відчуження біомаси, що в природі виконують консументи — пасовищні ссавці, а в умовах експерименту — режим викошування. Регульовальну ефективність викошування можна оцінити за різницею енергетичних затрат між викошуваними та невикосуваними степами, яка показує, що ця ефективність у лучних степах є недостатньою [13].

Одним із найприродніших і найефективніших факторів впливу на степові фітосистеми є випасання худоби, оскільки існування великих консументів (коней, бізонів, зубрів, оленів, косуль та ін.) було важливим коеволюційним фактором у формуванні степового біому. Експерименти в Австрії (національний парк «Віденський ліс») показали, що в разі випасання овець, якого ми так боялися і уникали, вдається зберігати ковилову стадію навіть у гумідних умовах Центральної Європи, тоді як уведений у нас абсолютно заповідний режим та сінокошіння, яке зараз фактично не ведеться, призводить до швидкої втрати степової компоненти. Цьому сприяють і відповідні кліматичні зміни. Сьогодні багато говорять про потепління і

спустелювання, однак за останні 100 років на тлі підвищення середньорічної температури на 0,7 °С спостерігається збільшення кількості опадів у степовій зоні на 100 мм [14], а це означає зниження континентальності та підвищення гумідності клімату. Отже, в майбутньому ми можемо очікувати істотного скорочення степового типу біотопів, їх різноманіття. Це положення є дуже важливим для природоохоронної діяльності, але його ігнорує сучасне законодавство щодо функціонування заповідників, у яких запровадження абсолютно заповідного режиму призвело до зникнення певного типу стацій, оселищ.

Розвиток лісових екосистем відбувається шляхом накопичення енергетичних запасів у біомасі, тобто спрямований на підвищення енергетичного потенціалу. У системі фітоценоз — ґрунт ми спостерігаємо закономірність: чим нижча здатність ґрунту концентрувати гумус (енергію), тим більше запасується її в біомасі, що забезпечує стійкість екосистеми в цілому. Розрахунки показують, що для підтримки структур лісу потрібно майже в 13,7 раза менше енергії, ніж для степу (рис. 3).

Хоча ліси є високоенергетичними, врівноваженими, досить стабільними екосистемами, в яких максимум енергії акумулюється в деревині за менших запасів її у ґрунті, тут також відбуваються сукцесії, навіть у тих угрупованнях, які розглядалися як кінцеві клімаксові стадії. Так, класичні вікові дубові ліси заповідної ділянки «Лес на Ворскле» (Росія), де В.М. Сукачов проводив комплексні біогеоценотичні дослідження, характеризуються відмиранням віковичних дубів та інвазією більш тіневитривалих порід, зокрема клена.

У помірній зоні формуються ліси, де спостерігається невідповідність між домінантами деревного ярусу та підросту. На Поліссі у дубово-соснових лісах є сходи дуба (*Quercus robur*), але немає сосни. В угрупованнях старих дубових лісів, де деревостан формує дуб в обхваті до 3 м, підріст дуба відсутній, однак багато граба. У грабових лісах, де зімкнутість деревостану цього виду сягає 0,9, густий підріст і сходи формує клен гостролистий (*Acer platanifolium*).

tanoides) за фактичної відсутності в підрості граба. Тобто в підрості трапляються види не нинішньої, а наступної сукцесійної стадії, що, врешті-решт, і забезпечує сукцесію. Отже, розвиток будь-якого фітоценозу спрямований не на відтворення подібного собі, а іншого, що забезпечує синеволоцію. Щоб зберегти певний тип фітоценозу, потрібно знайти механізми, за допомогою яких можна повертати його розвиток на попередню стадію.

Разом з тим, встановлено, що на розвиток лісових екосистем впливають і кліматичні зміни, чому сьогодні приділяють велику увагу. За останні 100 років в Україні відзначено підвищення середньорічної температури на 0,7 °С передусім завдяки середньозимовим температурам: середня температура січня зросла на 1,5–2,5 °С, лютого – на 1–2 °С [15]. Унаслідок цього подовжується період додатних температур і, відповідно, вегетаційний період. За підвищеної температури і достатньої кількості вологи інтенсифікуються життєдіяльність мікроорганізмів, розкладання підстилки, вивільняються мінеральні форми азоту, в результаті в ценозах збільшується участь видів-нітрофілів, що характеризує відповідний напрям сукцесії. Разом з тим, інтенсивне розкладання органічних форм азоту до мінеральних означає зниження енергетичного потенціалу екосистем [15].

На основі проведених нами досліджень було отримано важливі результати щодо впливу змін клімату на динаміку видів та рослинних угруповань, які чутливо реагують на такі зміни і використовуються як індикатори. Однак слід зазначити, що хоча кліматичні характеристики і є причиною таких змін, їхня дія є непрямю. Саме опосередкований вплив має найбільше значення в динаміці екосистем, але вичленити кліматичну складову практично неможливо.

Так, з використанням наявних моделей зміни клімату було доведено, що при підвищенні температури найбільше потерпають екосистеми арктичних широт. Очевидно, саме цим можна пояснити і те, що з усіх екосистем наших широт найбільш вразливими є найхолодніші гідрофільні екосистеми, а найстійкішими –

сухі літофільні. Однак гідрофільні екосистеми найбільшою мірою трансформовані через меліорацію, створення водосховищ, евтрофікацію, тому виокремити кліматичну складову тут важко. Проте зазначимо, що у водоймах Сіверського Дінця сформувалася стійка популяція тропічного виду *Pistia stratiotes*, а рідкісний для Західної Європи водяний горіх (*Trapa natans*) на прогрітих мілинах Дніпровського водосховища формує величезні зарості.

Інтенсивне розселення інвазивних видів спостерігається в річкових долинах. Наприклад, як нові типи біотопів можна розглядати зарості аморфи чагарникової (*Amorpha fruticosa*), айстри верболистої (*Aster salignus*), ехіноциста шипуватого (*Echinocystis lobata*) в басейні р. Латориця. Здавалося б, це не так страшно, але серед них є злісні карантинні види: амброзія полинолиста (*Ambrosia artemisifolia*), борщівник Сосновського (*Heracleum sosnovskyi*), гринделія розчепірена (*Grindelia squarrosa*), що спричинюють алергію, сильні опіки тощо. Проблема інвазивних видів полягає і в тому, що, формуючи їх штучні насадження в лісах, ми втрачаємо біорізноманіття трав'янистих, зокрема рідкісних, видів. Так, під насадженнями американського дуба північного (*Quercus boreale*) видове різноманіття у 3 рази бідніше порівняно з нашими природними дубовими лісами.

Очевидно, з кліматичними змінами опосередковано пов'язані проблеми інтенсивного всихання ялиників, яке ще наприкінці ХХ ст. було зафіксовано по всій Європі, а тепер і в наших Карпатах. Учені називають кілька причин: кліматичні зміни; природне випадання, оскільки їх було штучно насаджено у невластивих екотопах; хвороби (опеньок, гниль, комахи, нематоди). На наш погляд, ці чинники не виключають, а доповнюють один одного. Головною ж причиною є зміна гідротермічного режиму, внаслідок чого поверхнева коренева система ялини не може забезпечувати життєві процеси і стає чутливою до хвороб. Осередками, з яких розселяються шкідливі для ялини гриби, комахи, інші збудники, є залишки мертвої деревини, які сягають 20 % і зумовлені безгоспо-

дарним веденням рубок та вітровалами. Разом з тим, верхня межа ялиників піднімається на 200 м над рівнем моря, а це означає, що піднімається межа субальпійської та альпійської зон. Оскільки остання існує в наших Карпатах у вигляді окремих локалітетів, то в результаті глобального потепління може зникнути ціла низка рідкісних високогірних видів.

Підсумовуючи сказане, можна стверджувати, що застосування синергетичних підходів в екології дає обнадійливі результати в галузі прогнозування та моделювання змін екосистем і потребує ширшого використання. Ми припускаємо, що в перспективі розроблення таких підходів і впровадження відповідних методів може сформувати парадигму майбутньої екології.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Одум Ю.* Основы экологии. — М.: Мир, 1975. — 240 с.
2. *Горшков В.Г.* Физические и биологические основы устойчивости жизни. — М.: ВИНТИ, 1995. — 470 с.
3. *Богатых Б.А.* Фрактальная природа живого: системное исследование биологической эволюции и природы сознания. — М.: URSS, 2012. — 256 с.
4. *Николис Т., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. — М.: Мир, 1979. — 512 с.
5. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. — М.: Прогресс, 1986. — 431 с.
6. *Хакен Г.* Синергетика. — М.: Мир, 1985. — 404 с.
7. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика как новое мировидение: диалог с И. Пригожиным // Вопросы философии. — 1992. — № 12. — С. 3–20.
8. *Черногор Л.Ф.* О нелинейности в природе и науке. — Х.: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2008. — 528 с.
9. *Дідух Я.П.* Основи біоіндикації. — К.: Наук. думка, 2012. — 343 с.
10. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. — М.: Наука, 1990. — 128 с.
11. *Дідух Я.П., Лисенко Г.М.* Проблеми термодинамічного оцінювання структури та організації екосистем // Вісн. НАН України. — 2010. — № 5. — С. 16–27.
12. *Дідух Я.П.* Енергетичні проблеми екосистем і забезпечення сталого розвитку України // Вісн. НАН України. — 2007. — № 4. — С. 3–12.
13. *Ткаченко В.С.* Фітоценологічний моніторинг резерватних сукцесій в Українському степовому природному заповіднику. — К.: Фітосоціоцентр, 2004. — 184 с.
14. Друге національне повідомлення України з питань зміни клімату. — К.: Інтерпрес ЛТД, 2006. — 80 с.
15. *Дідух Я.П.* Етюди фітоєкології. — К.: Арістей, 2008. — 264 с.

Я.П. Дідух

Институт ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины
ул. Терещенковская, 2, Киев, 01601, Украина

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СТРУКТУРЫ И РАЗВИТИЯ БИОТОПОВ И ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Решение сложных экологических проблем в контексте перехода на позиции устойчивого развития предполагает использование новых термодинамических, синергетических подходов, в основе которых лежит теория нелинейности, что требует перевода качественных характеристик экосистем в количественные показатели. Применение разработанной автором методики синфитоиндикации позволяет использовать ряд современных математических методов и оценить характер зависимости между изменением экофакторов и биотопов. На основании понятий теории фракталов и теории катастроф рассмотрены проблемы структуризации, развития (сукцессии, синэволюции), характер трансформации энергии степных и лесных экосистем, а также их охраны. Подняты проблемы инвазии видов и усыхания ельников Карпат в контексте климатических изменений.

Ключевые слова: термодинамика, синергетика, энергия, теория фракталов, теория катастроф, экосистема, биотоп, синфитоиндикация, сукцессия.

Ya.P. Didukh

Kholodny Institute of Botany of NAS Ukraine
2 Tereshchenkivska St., Kyiv, 01601, Ukraine

SYNERGETIC APPROACHES TO THE ESTIMATION OF STRUCTURE
AND DEVELOPMENT OF BIOTOPES AND THE ISSUES OF ITS CHANGE FORECASTING

Solution of complicated ecological problems in the context of change-over to sustainable development requires the appliance of thermodynamic, synergetic approaches based on the theory of non-linearity, which needs conversion of qualitative characteristics of ecological factors to quantitative variables. Application of methodology of synphytoindication developed by the author enables the usage of a large variety of contemporary mathematical methods and the estimation the type of dependence between the change of ecosystems and biotopes. The issues of structuring and development (succession, synevolution) of steppe and forest ecosystems concerning their protection, the character of energy transformation are considered on the basis of notions of fractals and catastrophes. The issues of species invasion and spruce forest drying in the Carpathians as result of climate change are raised.

Keywords: thermodynamics, synenergetics, energy, fractal theory, catastrophe theory, ecosystems, biotopes, synphytoindication, succession.