



УДК 049.3:574.4:581.526

Член-кореспондент НАН України Я. П. Дідух

Новий підхід до оцінки стійкості та ризиків втрати екосистем

В основу оцінки стійкості та ризиків втрати екосистем покладено ідею використання біотичного механізму їх регуляції, що ґрунтується на законах термодинаміки. Формування, зміна та стабілізація екосистем відображаються в сукцесіях біотопів. Виділено 12 ознак фітоценозів, за допомогою яких оцінюється масштабність та швидкість змін біотопів по відношенню до стійких їх станів. Кількісна оцінка цих ознак визначає показник ризику знищення, що є індикатором стану, зміни та охорони довкілля.

Ризики втрати, знищення екосистем тісно пов'язані з їх стійкістю. Стійкість екосистем розглядається як здатність зберігати свою структуру і характер функціонування в просторі та часі при зміні умов зовнішнього середовища [1]. Теоретичні основи стійкості викладені в роботах Пуанкаре, Ляпунова, Лагранже, Свіріжева та Логофета [2], які ґрунтуються на оцінках засвоєння і трансформації енергії та інформації, тобто на законах термодинаміки функціонування екосистем, синергетики, показниках ентропії, що застосовуються до відкритих систем [3–5]. Ці автори та їх послідовники довели, що екосистеми у своєму природному розвитку хоч і спрямовані до рівноважного стану, але у такому стані існувати не можуть, а потребують додаткової енергії, яка забезпечується за рахунок дисипативних процесів. Математично зміни поведінки екосистем описуються нелінійними рівняннями. Ці процеси відбуваються як флуктуаційні зміни, що викликають турбулентність і можуть призвести до катастрофи, тобто руйнування екосистеми. Такі зміни характеризуються послідовністю фаз конфлікту, кризи і власне катастрофи.

Однак механізми забезпечення, принципи та методи оцінки стійкості по відношенню до різних типів систем ще недостатньо розроблені.

Що стосується екосистем, то одним із ефективних та перспективних підходів у цьому відношенні є *теорія біотичної регуляції* [6]. Цінність цієї теорії, яка підкріплюється відповідними розрахунками, полягає у тому, що вони дозволили визначити кількісну оцінку меж та порогів стійкості біосфери. На основі аналізу різноманітних даних В. Г. Горшковим та А. М. Макаревою [6] було сформульовано ряд ключових висновків теорії біотичної регу-

© Я. П. Дідух, 2014

ляції. 1. Природне середовище для людини створено і підтримується в оптимальному стані природними угрупованнями живих організмів; природна біота здатна компенсувати ті порушення природного середовища, які не переходять поріг втрати самої біоти. 2. Біотична регуляція забезпечується шляхом функціонування всіх елементів екосистеми; механізмом такого функціонування є стабілізуючий природний відбір, що протидіє розпаду генетичної інформації і посиленню в ході еволюції її регуляторного потенціалу. 3. Освоєння природних екосистем у процесі господарської діяльності людини руйнує механізми біотичної регуляції в локальних масштабах і поступово послаблює його на глобальному рівні. Порушені та штучні екосистеми не здатні до підтримки стійкості оточуючого середовища, а, навпаки, вони діють як дестабілізатори і посилюють ефект порушення тощо.

Виходячи з цього, головне завдання людства полягає не стільки у скороченні антропогенних забруднювальних викидів, скільки у збереженні природи планети та забезпечення біотичних механізмів регулювання, використання та відтворення екосистем [7]. Для цього необхідна розробка підходів та методів кількісної оцінки стану екосистем, яка давала б змогу відображати показники їх порушення, стійкості, а відтак вийти на розрахунок ризиків втрат.

Наукові основи оцінки втрати стійкості та ризиків добре розроблені по відношенню до геосистем [8–10]. Однак, згідно з основами теорії біотичної регуляції навколишнього середовища, де головним компонентом екосистеми виступає біота, такий підхід вимагає певних корекцій, які випливають із основних властивостей живого, його організації, функціонування, розвитку, що відрізняє поняття екосистеми від геосистеми. Індикатором різноманітності, стану рівноваги та порушення екосистем є рослинність, а регуляторним механізмом її формування, відновлення від початкового до рівноважного стану, стабілізації виступають *сукцесії*, тому оцінка стану екосистем, їх потенціалу, стійкості повинна базуватися на порівняльній оцінці сукцесійних стадій (серій) угруповань від піонерного до стійкого клімаксового стану.

Поняття стійкості в екології трактується неоднозначно, а відтак її оцінка проводиться за різними ознаками, проявами: 1) відмінністю системи одного стану по відношенню до іншого ($Z_2 - Z_1 = \Delta Z$); 2) допустимої величини відмінності від базового стану, тобто її мінливості ($Z_0 - Z_1 < \Delta Z$); 3) інтервалу часу, в межах якого відбуваються зміни або оцінюється стійкість (Δt); 4) впливу зовнішнього фактора (F) чи їх групи, по відношенню до яких оцінюється стійкість. Відповідно до співвідношення цих проявів М. Д. Гродзинський (1995) виділив три форми стійкості (інертність, відновлювальність, пластичність), які, коли мова йде про біотопи або угруповання фактично, можна звести до двох — інертності та пластичності [11]. Резистентність (пружність, інертність) — здатність екосистеми (E_1) під впливом дії фактора (F_1) протягом часу (Δt_1) не виходити за певні межі (стійкості) (Z_1); $F_1/\Delta t_1 \leftarrow Z_1$. Пластичність (мобільність) — здатність екосистеми (E_2) після припинення дії фактора (F_2) протягом часу (Δt_2) повертатися у вихідне стійке положення (Z_2); $F_2/\Delta t_2 \rightarrow Z_2$.

Отже, стійкість можна розглядати, з одного боку, як здатність екосистеми протидіяти впливу зовнішніх факторів, зберігати свою сутність і якісні характеристики у стані Z_1 (бути резистентною — стійкість за Ляпуновим), а з іншого, — відновлювати свої властивості, тобто бути пластичною (Z_2). Тому резистентна і пластична стійкість — це зовсім різні властивості екосистем. Чим більший опір чинить екосистема впливові зовнішніх факторів, тим важче її порушити, але якщо вона порушилася, тоді її важко повернути у вихідний стан. Тобто, чим вища пластична, тим нижча резистентна стійкість екосистем.

Висока пластичність, відновлювальність і втрата резистентності означає зниження ризику, а низька пластичність і висока резистентність — його підвищення. Тому для оцінки ризику, порушеності стійкості головною ознакою є ступінь резистентності, а не пластичності.

Інерційність (стійкість) — поняття відносне [2]. Не можна говорити, що екосистема стійка або не стійка. Можна говорити, що одна екосистема (E_1) стійкіша, ніж інша (E_2) по відношенню до дії певного фактора чи їх групи (F_1), або стан екосистеми Z_1 стійкіший, ніж стан екосистеми Z_2 в певних умовах. Таким чином, стійкість екосистеми визначається двома перемінними: з одного боку, силою дії певного фактора (F), а з іншого — специфікою, положенням, віддаленістю екосистеми E_1 відносно E_0 . Тобто, результат може бути відображений як вектор, що характеризується спрямованістю та величиною, різницею між показниками екосистем. Оцінка показників цього вектора залежить від того, що береться за основу порівняння. Для цього потрібно обрати екосистему як еталон (E_0) або змоделювати таку систему, яка має найстійкіший стан у даних умовах (Z_0). Разом з тим, на основі законів термодинаміки для відкритих неврівноважених систем [4] в такому стані останні існувати не можуть, вони розпадаються, тому мають найвищий ризик втрати. Отже, чим ближче знаходиться система (E_1) до стійкого, рівноважного, клімаксового стану (Z_0), тим вищий ризик її втрати, а якщо система знаходиться на піонерних стадіях розвитку (E_2), далеко від рівноважного стану (Z_0), то ризик втрати її низький

$$E_1 \rightarrow Z_0 \quad (\max); \quad E_1 \leftarrow Z_0 \quad (\min).$$

З цього випливає, що ключове місце в оцінці ризику займає дослідження сукцесійного розвитку екосистем. Сукцесія розглядається як такий процес розвитку, що відбувається завдяки реалізації біоти потенційних можливостей перебудови структури екосистем по відношенню до зміни оточуючого середовища. Іншими словами, розвиток екосистем описується векторним полем у фазовому просторі [12]. Одночасно такий розвиток супроводжується зміною зовнішніх (кліматичних, гідрологічних, едафічних характеристик), які на виході можуть істотно відрізнятися від фонових. Переходи екосистеми через послідовну зміну стійких станів розглядаються як аттрактори стійкості. Хоча це самоорганізований та самопідтримуючий процес, однак він спрямований у бік удосконалення механізмів акумуляції енергії через адаптаційні властивості видів, зниження енергетичних витрат, а відтак — зниження показників ентропії, що означає наближення до стійкого і водночас термінального стану [13]. Як вважає Р. Уїткер (1980), в ході сукцесії підвищується продуктивність екосистеми, її біорізноманітність і зростає стійкість [14]. Сукцесія — це не лінійний, не строго детермінований, а стохастичний, ймовірнісний процес. Це означає, що кожен елемент угруповання (ценопопуляція) може бути заміщений іншим, краще адаптованим до існуючих умов або преадаптованим для наступних можливих змін, і таке заміщення відбувається на всіх етапах процесу, у кожній із ланок сукцесії. Отже, показник біотичного різноманіття тих елементів, які можуть взаємозаміщуватися у ході сукцесії, має ключове значення.

Таким чином, завдання полягає у тому, щоб оцінити положення даної екосистеми у сукцесійному ряду і у цьому відношенні в геоботаніці є фундаментальні напрацювання, зокрема, щодо оцінки швидкості, етапів розвитку ценозів (сингенез, ендоекогенез, філценогенез), уявлення про різні форми клімаксу, сукцесійні ряди, серії тощо. Виходячи з цих розробок, ми повинні запропонувати такі індикаторні ознаки або характеристики, за якими будемо оцінювати як кількісні показники їх зміни, тобто швидкість сукцесій, так і масштабність

Таблиця 1. Ознаки та характеристики для оцінки стану біотопів

N	Ознака	Категорія			
		4	3	2	1
1	Дія впливу антропогенних факторів	Знищується повністю і відновлюється від піонерних стадій	Змінюється структура домінуючих видів	Змінюється видовий склад біотопів	Зміни не помітні або біотопи формуються під безпосереднім впливом антропогенного фактора
2	Відновлювальність	Дуже слабка (понад 100 років)	Слабка (десять років)	Задовільна (до 15 років)	Добра (кілька років)
3	Положення у сукцесійному ряду (по відношенню до антропогенних сукцесій)	Кінцеві стійкі клімаксові та субклімаксові стадії	Стадії ендоекогенезу, що впливають на зміну мікроклімату та ґрунту	Серійні сингенетичні стадії, що не впливають на зміну характеристик ґрунту та мікроклімату	Піонерні, короткочасові стадії
4	Регіональна репрезентативність	Поширений у межах одного або кількох округів	Трапляється у межах провінції	Трапляється у межах геоботанічної області або фізико-географічної зони	Охоплює кілька геоботанічних областей або фізико-географічних зон
5	Характер поширення	Відомі окремі локалітети невеликого розміру	Має диз'юнктивне поширення	На межі суцільного ареалу характеризується спорадичним поширенням	Трапляється звичайно в оптимальних умовах
6	Екологічна амплітуда	Має вузьку (<5%) амплітуду по відношенню до шкал кількох едафічних факторів	Має вузьку (<5%) амплітуду по відношенню до шкали одного фактора та <10% — більшості едафічних факторів	Має звужену (<10%) амплітуду по відношенню до шкал понад як одного едафічного фактора	Амплітуди >10% по відношенню до шкал різних едафічних факторів
7	Екологічні умови поширення	У специфічних, екстремальних екологічних умовах	Вузьке поширення через рідкісність біотопу	Спорадичне поширення в оптимальних умовах	Трапляється звичайно в оптимальних умовах
8	Наявність інвазійних видів	Відсутні інвазійні види	Наявні інвазійні види	Наявні інвазійні види як діагностичні з високим ступенем постійності	Інвазійні види відіграють роль домінанта
9	Ступінь гемеробності (ha, %)	a-, олігогемеробні (ha < 25)	Мезогемеробні (ha = 25–50)	Еугемеробні (ha = 50–75)	Полі-, метагемеробні (ha > 75)
10	Співвідношення між типами стратегії (S-патієнти чи стрес-телеранти/R-експлеренти чи рудерали)	>1,7	1,2–1,7	0,7–1,2	<0,7
11	Созологічна значущість	Значна кількість видів занесено до "Червоної книги України" (ЧКУ) та інших списків	Домінуючий вид занесено до ЧКУ	Наявні види, занесені до ЧКУ	Відсутні рідкісні види
12	Синфітосозологічний статус	Занесені до міжнародних та державних списків	Занесені до "Зеленої книги України"	Занесені до списку EUNIS, CORINE або Natura 2000	Не внесені до жодних списків, оскільки не потребують охорони

змін (просторовий та часовий їх стани). При цьому можуть бути використані як безпосередні, так і опосередковані характеристики. З цією метою нами пропонується використання 12 ознак біотопів [15]. Усі ці характеристики дозволяють з різних боків оцінювати ступінь стійкості та трансформації ценозів (біотопів) (табл. 1).

“Вартість” кожної ознаки пропонується оцінювати в балах від 1 до 4. Отже, мінімальна кількість балів, яку може отримати біотоп при характеристиці всіх його ознак (в), — 12, максимальна (В) — 48, а різниця між ними становить 36 балів. На основі цієї різниці розраховується ступінь ризику втрати кожного балу: 1 бал = $100 : v = 2,78\%$. При цьому кількість проаналізованих ознак може бути знижена. Відповідно, ступінь стійкості $K = \left(\left(\sum_{n=12}^{48} x_n \right) - n \right) 12/n$, де x_n — присвоєний показник категорії кожної ознаки, а n — кількість проаналізованих ознак.

Тоді ступінь ризику $R = 2,78 * K(\%)$. Беручи це до уваги, при оцінці всіх ознак ми отримуємо бальні показники, які розділяємо на п'ять класів, що мають різницю 7 балів ($R = 20\%$):

I клас (48–42 бали) — дуже рідкісні, що мають “вужьке” поширення, погане відтворення, дуже високий ($R > 83\%$) показник ризику знищення, дуже чутливі до зміни екологічних факторів і потребують особливих комплексних заходів охорони;

II клас (41–35 балів) — рідкісні, що мають обмежене поширення, слабе відтворення, високий ($R = 63–83\%$) показник ризику знищення, чутливі до впливу антропогенного фактора і потребують певних цільових заходів щодо їх охорони;

III клас (34–28 балів) — спорадично поширені, під впливом дії антропогенних факторів мають тенденції до скорочення, характеризуються недостатнім, повільним відновленням, мають середній ($R = 43–63\%$) показник ризику знищення і потребують часткової охорони;

IV клас (27–21 бал) — звичайно поширені, типові угруповання, нормально відновлюються в даних умовах, мають низький ($R = 23–43\%$) показник ризику знищення, стійкі до антропогенного впливу, хоча і не потребують заходів з охорони, але можуть бути знищені при надмірній антропогенній діяльності;

V клас (19–12 балів) — досить поширені або вторинні біотопи, достатньо адаптовані до дії антропогенних факторів або формуються під їх дією, мають дуже низький ($R < 23\%$) показник ризику знищення і не потребують охорони.

Оцінка розподілу екосистем за класами стійкості свідчить про градієнт зміни стійкості і можливу швидкість та ризик її втрати, а врахування площі, яку займає той чи інший клас екосистеми, дає можливість оцінити масштабність цих процесів. Наростання показників ризику свідчить про можливість катастрофи. Отже, чим вища швидкість втрати стійкості, наростання ризику за короткий час, тим ближче знаходиться екосистема до катастрофічного стану $K \leftarrow (Z_1 - Z_0)/\Delta t$. Іншими словами, чим більша швидкість сукцесії, тим більша ймовірність досягнення екосистемою критичного стану, втрати її структури і можливості катастрофічних змін.

Запропонований новий підхід дає можливість отримати кількісні показники стійкості та ризиків втрати природних екосистем, що можуть бути використані як індикатори стану довкілля, а відтак — оцінки екологічної складової, важливої для забезпечення переходу регіонів на засади сталого розвитку. На основі таких показників можливий розрахунок тих порогових величин, поза якими відбуваються негативні явища, прогнозування та моделювання ситуацій, картування джерел ризиків, моніторинг змін, а це, в свою чергу, дозволить

виявити причини цих змін або встановити фактори, що сповільнюють або стримують наближення екосистем до критичного стану, тобто розробити превентивні заходи для запобігання катастрофам.

1. *Бигон М., Харпер Дж., Таусенд К.* Экология: особи, популяции и сообщества. Т. 2. – Москва: Мир, 1989. – 477 с.
2. *Свирижнев Ю. М., Логофет Д. О.* Устойчивость биологических сообществ. – Москва: Гл. ред. физ.-мат. лит, 1978. – 352 с.
3. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – Москва: Мир, 1973. – 280 с.
4. *Пригожин И.* От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках. – Москва: Наука, 1985. – 328 с.
5. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. Введение. – Москва: Мир, 1990. – 358 с.
6. *Makar'eva A. M., Gorshkov V. G.* The Forest Biotic Pump of River Basins // Russian Journal of Ecology. – 2008. – **39**, No 7. – P. 537–540.
7. *Li B.-L., Gorshkov V. G., Makarieva A. M.* Allometric scaling as an indicator of ecosystem state: a new approach // I. Petrosillo et al. (eds.) Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security. – Berlin: Springer, 2008. – P. 107–117.
8. *Сочава В. Б.* Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск: Наука, 1978. – 319 с.
9. *Арманд А. Д.* Саморегуляция и саморегулирование географических систем. – Москва: Наука, 1988. – 261 с.
10. *Гродзинський М. Д.* Стійкість геосистем до антропогенних навантажень. – Київ: Лікей, 1995. – 233 с.
11. *Krebs C. J.* Ecology. The Experimental Analysis of Distribution and Abundance. – New York: Harper and Row, 1978. – 678 p.
12. *Свирижнев Ю. М.* Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. – Москва: Наука, 1987. – 368 с.
13. *Дідух Я. П.* Теоретичні проблеми еволюції рослинного покриву // Етюди фітоєкології. – Київ: Арістей, 2008. – С. 152–177.
14. *Уиттекер Р.* Сообщества и экосистемы. – Москва: Прогресс, 1980. – 237 с.
15. *Дідух Я. П.* Оцінка соціологічної значимості біотопів // Біотопи (оселища) України: наукові засади їх дослідження та практичні результати інвентаризації. – Київ; Львів, 2012. – С. 142–150.

*Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного
НАН України, Київ*

Надійшло до редакції 22.04.2014

Член-корреспондент НАН України **Я. П. Дідух**

Новый подход к оценке устойчивости и рисков потерь экосистем

В основу оценки устойчивости и рисков потерь экосистем положена идея использования биотического механизма регуляции экосистем на основе законов термодинамики. Формирование, изменение и стабилизация экосистем отражаются в сукцессиях биотопов. Выделено 12 признаков фитоценозов, при помощи которых оцениваются масштабность и скорость изменения биотопов по отношению к устойчивому их состоянию. Количественная оценка этих признаков определяет показатель риска потерь, который служит индикатором состояния, изменения и охраны природной среды.

A novel approach to the assessment of the stability and the risks of losses in ecosystems

The concept of using the biotic mechanism of ecosystem regulation, which is founded on the laws of thermodynamics, is the base for the assessment. Ecosystem's formation, changing, and stabilizing are reflected in the biotopes succession. 12 characteristic features of phytocoenoses, which play an important role in evaluating the scope and the time rate of biotopes in regard to their stable condition, are distinguished. Quantitative assessment of these features reflects the index of the risk of destruction, which acts as the indicator of the condition, changing, and environment protection.