

ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 049.3:574.4:581.526

С.І. АЗАРОВ, В.Л. СИДОРЕНКО, О.С. ЗАДУНАЙ

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКОСИСТЕМ ДО ЧИННИКА АНТРОПОГЕННОГО ТИСКУ

***Анотація.** Розроблено методичні підходи до оцінки екологічної безпеки екосистем, які базуються на визначенні комплексного показника деградації компонентів природного середовища, що дозволить оцінювати ризики втрати, знищення екосистем під дією антропогенного впливу. Також розглянуто механізми забезпечення, принципи та методи оцінки надійності різних типів екосистем.*

***Ключові слова:** екосистема, безпека екосистем, стійкість, надійність, живучість, стабільність, антропогенні впливи.*

Вступ

В аспекті забезпечення переходу суспільства на засади сталого розвитку важливим завданням є оцінка ризиків втрати, знищення екосистем під дією антропогенного впливу, що тісно пов'язано з їхньою надійністю.

Антропогенний чинник, який викликає деградацію екосистеми, слід розглядати як флуктуацію, викликану популяційним вибухом, який за законами регулювання неминуче буде елімінований.

На сьогодні екосистема розглядається як здатність зберігати свою структуру і характер функціонування в просторі та часі за впливу змін умов зовнішнього середовища. Екосистеми здатні протистояти різним ушкоджувальним впливам і, в разі відновлення нормальних умов, повертатися в стан, близький до первісного. Щільність того чи іншого виду за несприятливих умов знижується, але в оптимальних умовах зростають плодючість, швидкість росту й розвитку, а щільність виду відновлюється. Однією з основних властивостей екосистем є їх надійність.

Важливою характеристикою надійності екосистеми є функціональне середовище. Надійність екосистем – це здатність екосистем зберігати свою структуру і характер функціонування в просторі та часі за впливу змін умов зовнішнього середовища, тобто їх здатність до реакції, пропорційної за

величиною силі негативного впливу. Це поняття визначається сукупністю законів, алгоритмів та параметрів стану екосистеми, відповідно до яких вона утворюється, існує, розвивається, а потім (рано чи пізно) гине.

Теоретичні основи надійності екосистеми знайшли обґрунтування в класичних працях Пуанкаре, Лагранже, Свіріжева, Логофета тощо, які ґрунтуються на оцінках засвоєння і трансформації енергії та інформації, тобто законах термодинаміки функціонування екосистем, синергетики, показниках ентропії, що застосовуються до відкритих екосистем [1–4]. Дослідниками надійності екосистем та їхніми послідовниками було доведено, що природний розвиток екосистем хоч і спрямований до рівноважного стану, але у такому стані вони існувати не можуть, а потребують додаткової енергії, що забезпечується за рахунок дисипативних процесів. У математичному відношенні 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 [5]. Однак механізми забезпечення, принципи та методи оцінки надійності відносно різних типів екосистем ще недостатньо розроблені.

Поняття надійності в екології трактується неоднозначно, а відтак її оцінка проводиться за різними ознаками, проявами [6]:

- 1) відмінністю екосистеми одного стану відносно іншого;
- 2) допустимою величиною відмінності від базового стану, тобто її мінливістю;
- 3) інтервалом часу, в межах якого відбуваються зміни чи оцінюється стійкість;
- 4) впливом зовнішнього фактора чи їх групи, відносно яких оцінюється стійкість.

Під надійністю екосистеми слід розуміти таку властивість, яка визначає ризик втрат її стійкості, стабільності й живучості (наведено на Рис.).

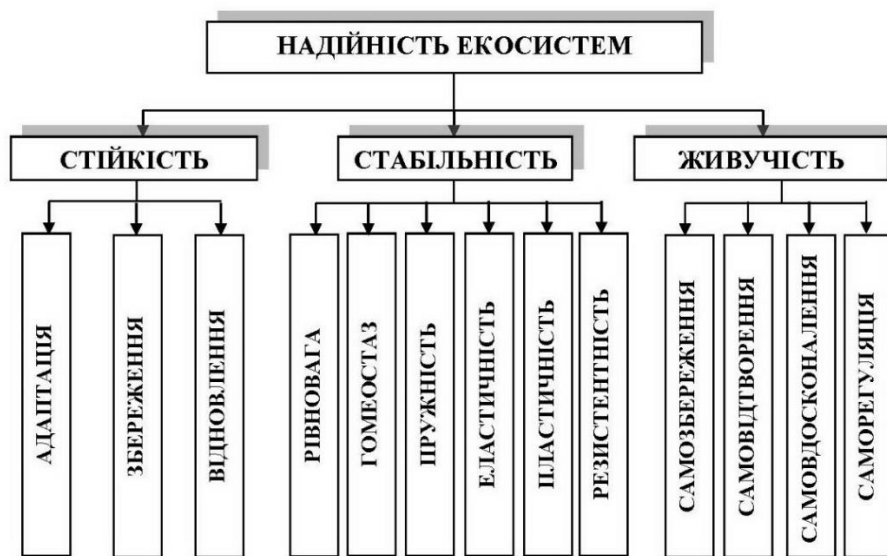


Рис. – Схема взаємозв'язків надійності екосистем

Стійкість екосистеми – це властивість, яка характеризує здатність екосистеми витримувати зміни, що виникають під впливом зовнішніх негативних факторів, чинити опір антропогенним чинникам та відновлюватися після їх впливу.

З іншого боку, стійкість екосистеми – це здатність адаптуватися до умов, що змінюються, не знижувати деякий життєво важливий допустимий екологічний рівень, протистояти зовнішнім антропогенним впливам або підтримувати існуючий режим функціонування під дією негативних ефектів.

Під стійкістю екосистем мається на увазі [7]:

- 1) опірність змінам параметрів навколишнього середовища;
- 2) здатність функціонувати у випадково варіюючих умовах середовища та в часі;
- 3) здатність до адаптації, виживання, збереження та відновлення основних функцій у мінливих умовах зовнішнього і внутрішнього середовища;
- 4) властивість екосистеми зберігати стан гомеостазу;
- 5) здатність екосистеми виконувати фізіологічну та біохімічну функції, що забезпечують її нормальну життєдіяльність протягом онтогенезу в певних екологічних умовах;
- 6) властивість зберігати свою функцію за різних умов середовища та різних внутрішніх станів протягом життя.

Адаптація екосистеми – це довготривале пристосування, яке виникає і змінюється протягом еволюції виду. На відміну від регулювання, адаптація екосистеми має незворотний характер.

Відновлення – здатність екосистеми повертатись за певний час до області станів після виходу з неї під впливом певного фактора.

Здатність екосистеми повернутися в колишню область стійкої рівноваги після тимчасового негативного впливу характеризує її стабільність.

На відміну від стійкості, стабільність – це здатність екосистеми повернутися в колишню область стійкої рівноваги після тимчасового впливу антропогенного чинника. Один з найбільш загальних механізмів збереження екосистемою стабільності пов'язаний з так званим принципом Ле Шательє Брауна [3], відповідно до якого будь-який зовнішній вплив зумовлює відповідну реакцію самоорганізації, спрямовану на ослаблення його ефекту. Знаходження екосистем у стабільному стані проявляється у відносній незмінності їх узагальненої структури та інтегральних показників.

Зміна або втрата певних станів екосистеми зазвичай супроводжується структурною перебудовою, яка відбувається стрибкоподібно, іноді пов'язана із заподіянням їй деякого збитку. Це викликано тим, що компенсаційні механізми екосистеми вже не здатні утримати її в колишньому стані, і вона втрачає свою стабільність через радикальну перебудову структури і стрибкоподібну зміну відповідних інтегральних показників.

Запропонуємо таку класифікацію видів стабільності екосистем [7]:

1. Рівновага – ситуація, за якої впливаючі на екосистему різноспрямовані сили взаємно гасяться і властивості екосистеми залишаються незмінними.
2. Гомеостаз – стійкий стан рівноваги відкритої екосистеми.
3. Стаціонарний режим – циклічне повторення однієї і тієї ж послідовності.
4. Резистентність – перехід з однієї області стійкої рівноваги в іншу зі збереженням внутрішніх зв'язків екосистеми.

5. Пластичність (мобільність) – здатність екосистеми після припинення дії антропогенного фактора протягом часу повертатися до вихідного стійкого положення.

Рівновага – це властивість екосистеми зберігати стабільність у певних межах під час антропогенних змін. Рівновага підрозділяється на статичну й динамічну, а також на стійку та нестійку.

Під гомеостазом екосистем маються на увазі певні визначення:

- прагнення організму підтримати в досить вузькому діапазоні коливань фізіолого-біохімічні константи, які визначають цілісність і функціональну дієздатність;
- процес підтримки стійкого стану організованих екосистем, включаючи живі організми;
- збереження сталості внутрішнього середовища організму (параметрів в процесі зміни внутрішніх і зовнішніх умов);
- відносна стабільність екосистеми в межах деякого діапазону мінливих умов середовища;
- підтримуване регуляторним відновленням екосистеми основних її компонентів і елементів під час постійної саморегуляції в усіх її ланках;
- здатність екосистеми та її окремих частин протистояти змінам та зберігати динамічну рівновагу (гомеостаз);
- здатність екосистеми протистояти зовнішнім і внутрішнім збуренням, включаючи будь-які антропогенні впливи;
- незмінність у часі будь-яких характеристик екосистем;
- сталість параметрів екосистеми протягом невизначено тривалого часу;
- здатність екосистеми підтримувати певну характеристику екосистеми в незмінному стані.

Резистентність (пружність, інертність) – це здатність екосистеми під впливом дії антропогенного фактора протягом часу не виходити за певні межі стабільності.

Резистентна стабільність – екосистема тримається до певної межі (певних значень) впливу негативного фактора, але коли ці значення перевищать певну межу – виходить зі стану рівноваги, до якого вже може не повернутися навіть після повного припинення збурюючого впливу.

Пружна стабільність – екосистема у відповідь на збурюючий вплив виходить зі стану рівноваги, але повертається до вихідного стану з припиненням дії цього чинника.

Отже, стабільність можна розглядати, з одного боку, як здатність екосистеми протидіяти впливу зовнішніх факторів, зберігати свою сутність і якісні характеристики у стані (бути резистентною, інертною), а з другого – відновлювати свої властивості, тобто бути пластичною. Тому резистентна і пластична стабільність – це зовсім різні властивості екосистем. Саме ці властивості необхідно враховувати під час визначення кількісних показників антропогенного впливу на екосистеми.

Живучість екосистеми – це властивість, що характеризує захисні сили екосистеми та виявляється у здатності біогеоценозів до самовідновлення.

Винятково важливим у житті екосистем, як будь-яких біологічних систем, є їх прагнення до самозбереження, яке неможливе без самовідновлення, саморегуляції, самовідтворення і самовдосконалення. Тому ці універсальні

характеристики всіх систем, що самоорганізуються, використовуються як ключові ознаки при визначенні живучості екосистем.

Самовідновлення екосистеми – це самостійне повернення екосистеми до стану динамічної рівноваги, з якого вона була виведена під впливом негативних чинників.

Саморегуляція екосистеми – це її здатність до самостійного відновлення балансу внутрішніх властивостей після негативного впливу за допомогою принципу зворотного зв'язку між її компонентами, тобто екосистема здатна зберігати свою структуру та функціонування в певному діапазоні зовнішніх умов.

Для кількісної оцінки безпеки екосистеми виділяють зв'язок діючих вражаючих чинників, що містять тип, інтенсивність, тривалість і кількість збурень, а також зв'язок екосистеми з визначенням основних параметрів, що відповідають за її стійкість, і областей (зон) стійкого стану, яких може бути від однієї до декількох.

Будемо виділяти такі стани екосистем [7]:

1) нестійка екосистема – малі збурення різко змінюють режим функціонування;

2) асимптотична, стійка екосистема – збурення гасяться екосистемою;

3) глобально стійка екосистема – властивість стійкості виконується для всіх траєкторій;

4) локально стійка екосистема – властивість стійкості виконується для траєкторій поблизу рівноважної.

Запропонуємо низку критеріїв надійності екосистем:

1) критичні значення негативного впливу, що викликають руйнування екосистеми або переведення її в необоротно нестійкий або інший стійкий стан;

2) параметри екосистеми (інваріант), що залишаються незмінними в процесі різних збурень екосистеми протягом значного часу;

3) параметри динаміки основних характеристик екосистеми;

4) критерії стійкості за Ляпуновим (орбітальної, асимптотичної та структурної стійкості) на основі математичних моделей досліджуваних екосистем;

5) критерії, засновані на відборі найчутливіших характеристик елементів екосистеми до даного виду негативного впливу;

б) критерії, засновані на відносній зміні будь-якої властивості або характеристики екосистеми.

Схильність екосистеми до деградації буде визначатися її буферною ємністю до впливу небезпечного фактора, фазою розвитку екосистеми та швидкістю процесів, що протікають.

Прогресивний або регресивний розвиток біогеоценозу визначається трансформацією і міграцією небезпечних речовин, енергії та інформації. Прогресивний розвиток характеризується накопиченням екосистемою внутрішньої енергії, збільшенням довговічності та надійності. Це супроводжується збільшенням адаптаційних можливостей екосистеми або ступенем її еластичності.

Зі збільшенням ступеня регресивного розвитку екосистем послідовно протікають такі стадії:

– порушення координації процесів, їх розбалансування, порушення біоритмів, зниження адекватності реакцій на стресові ситуації;

- порушення енергетичних балансів, зменшення використання сонячного світла та будь-яких джерел енергії;
- порушення складу речовин екосистем;
- порушення генетичного апарату живих компонентів екосистеми та процесів саморозвитку в екосистемах загалом.

Надійність екосистем до деградації залежить від таких параметрів:

- а) стійкості до дії кожного компонента екосистеми;
- б) виду негативного впливу;
- в) інтервалів негативного впливу;
- г) тривалості негативного впливу;
- д) уже досягнутої фази деградації екосистеми і кожного її компонента;
- е) поєднання стресових впливів і дії на екосистему інших фізичних полів;
- з) прояву процесів гістерезису (фізична величина, що характеризує стан тіла, неоднозначно залежить від фізичної величини, що характеризує зовнішні умови) і пам'яті.

Оцінюючи небезпечні чинники, що впливають на деградацію екосистеми, необхідно враховувати не тільки їх інтенсивність, але й тривалість впливу, градієнт і закономірну зміну в часі та в просторі.

У разі негативного впливу на екосистему декількох факторів відзначається їх взаємовплив, зумовлений не тільки ефектами адитивності, синергізму та антагонізму, але й більш складними взаємодіями. Інтегральну дію на екосистему сукупності небезпечних чинників ускладнено явищами багатодомінантності та провокаційності їх спільної дії. Багатодомінантність виникає, якщо один з небезпечних факторів, перебуваючи або в мінімумі, або в максимумі, утворює настільки сильний негативний вплив, що пригнічує вплив усіх інших небезпечних факторів. Провокативність характерна для поєднання стимулюючих впливів з летальними і полягає в тому, що негативні ефекти посилюються.

Виділимо такі групи механізмів надійності екосистем [7]:

- механізми стабілізації стану (інерція, обмеження обміну з навколишнім середовищем, проточність; негативні, позитивні і конкурентні зворотні зв'язки);
- механізми збереження структури (механізм включення резервних програм, тимчасового переходу в закритий стан, накопичення резервів, симбіоз, адаптаційна еволюція);
- механізми збереження траєкторії руху;
- механізми збереження типу функціонування (пружність, еластичність, розподілення по екологічних нішах).

За міру стабільності екосистем часто приймають їх видове різноманіття. Найстійкіші складні екосистеми, оскільки в них формуються розгалужені трофічні зв'язки. Екосистеми зі спрощеною структурою вкрай нестійкі, бо в них відбуваються різкі коливання чисельності окремих популяцій.

Методи математичного моделювання надійності екосистем можна класифікувати наступним чином [7, 8]:

- 1) теорія стійкості і бифуркацій диференціальних рівнянь → приблизні схеми перехресної регуляції → топологічні методи теорії катастроф;
- 2) термодинамічний підхід → імовірнісні критерії диференціальних рівнянь → теорія дисипативних структур;

- 3) теорія автоматів → механічні та графічні ігрові аналоги;
- 4) формальна символічна логіка → теорія паралельних алгоритмів;
- 5) застосування принципів оптимальності екології.

Використання лінійного аналізу надійності екосистем обмежено областю особливих точок, за межами яких можливі якісно нові режими функціонування, автоколивання, дисипативні структури. Математична теорія надійності, що вивчає поведінку екосистеми в межах і за межами особливих точок, в екології використовується вкрай рідко, хоча є чимало подібних досліджень у біофізиці та біології.

З позицій екологічної безпеки завдання дослідження надійності екосистем полягає в тому, щоб побачити, яким чином її складові елементи функціонують у взаємодії з іншими частинами і з яких причин можуть статися зворотні або незворотні зміни, що загрожують негативними наслідками для навколишнього природного середовища.

Вибір напрямку зміни станів екосистем здійснюється з урахуванням обмеженої кількості альтернатив, задля збереження стійкості й стабільності. Найчастіше необхідність вибору альтернативного стану виникає під час виходу екосистеми на так званий режим функціонування «із загостренням», який може завершуватися виникненням природних аварій, криз і катастроф.

Кризу в екосистемах слід розглядати як явище, яке свідчить про необхідність адаптації екосистеми до зовнішніх або внутрішніх умов, що помітно змінилися. Криза характеризується збереженням найважливіших характеристик екосистем і незначним збитком. Однак появу криз слід розцінювати як свідчення необхідності певного оновлення екосистеми.

На відміну від кризи, виникнення катастрофи в екосистемі зазвичай супроводжується значною і досить різкою зміною інтегральних показників екосистеми внаслідок перетворення й докорінної перебудови її морфології та структури.

Радикальніші зміни зазвичай призводять до руйнування екосистем, спостерігаються під час катаклізмів. Їх прояв рівносильний краху, тобто більшість екосистем припиняють існування.

Зміну станів екосистем можна розглядати на прикладі наслідків природних катаклізмів. Їх функціонування зазвичай характеризується такими показниками, як: гомеостаз або гомеокінезіс, що являють собою динамічну рівновагу; різного виду збурені стани, викликані появою несприятливих, небезпечних, критичних або катастрофічних станів.

Будь-якій екологічній системі притаманний стійкий стан, гомеостаз, що характеризується динамічною рівновагою між народжуваністю і смертністю, споживанням і розщепленням речовини й енергії.

Водночас будь-яка екосистема входить у ієрархію систем і тому підпадає під зовнішні впливи, що прагнуть вивести її з рівноваги. Якщо цей вплив не надто сильний, то порушені зв'язки замінюються іншими, а процес передачі речовини та енергії продовжується. Таке явище можна називати екологічним дублюванням.

Екологічне дублювання – процес заміни зниклого з будь-яких причин виду іншим видом, який займає його екологічну нішу. Так екосистеми чинять опір впливам, що порушують їх стабільність.

Екосистема тим безпечніша, чим більше видове різноманіття вона має. Це забезпечує широкі можливості для екологічного дублювання. Під впливом

зовнішніх і внутрішніх чинників в екосистемах можуть відбуватися постійні зміни. Деякі види екосистем, відчуваючи негативні впливи, знижують свою чисельність, а іноді зовсім зникають. Інші види можуть від цього виграти, і їх чисельність зростатиме, тобто відбуватиметься витіснення одних видів іншими. Процеси послідовних змін стану екосистем у просторі або в часі, що супроводжуються зміною станів і властивостей всіх її компонентів, називають сукцесією.

Здатність екосистеми до повного самовідновлення і саморегулювання протягом сукцесійного або еволюційного часу її існування називають екологічною надійністю. Найпростішим механізмом підтримки екологічної надійності екосистеми є заміна виду, який зник з будь-яких причин, іншим екологічно близьким. При глибшому порушенні заміни відбуватимуться на рівні угруповань різного рівня аж до біогеоценозів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Молчанов А.М. Об устойчивости экосистем / А.М. Молчанов // Всесторонний анализ окружающей природной среды. – Л.: Гидрометеониздат, 1976. – С. 212–229.
2. Ракита С.А. Устойчивость геосистем: подходы к практически реализуемой оценке / С.А. Ракита // География и природные ресурсы. – 1980. – № 1. – С. 136–142.
3. Оценка состояния и устойчивости экосистем. – М. Институт охраны природы и заповедного дела, 1992. – 125 с.
4. Заика В.Е. Устойчивость экосистем / В.Е. Заика // Морський екологічний журнал. – 2007. – Т. 6, № 3. – С. 27–32.
5. Экосистемы в критических состояниях / Под ред. Ю.Г. Пузаченко. – М.: Наука, 1989. – 214 с.
6. Гродзинський М.Д. Стійкість геосистем до антропогенних навантажень / М.Д. Гродзинський. – К.: Лікей, 1995. – 233 с.
7. Матвеева І.В. Стійкість екосистем до радіаційних навантажень / І.В. Матвеева, С.І. Азаров, Ю.О. Кутлахмедов, О.В. Харламова. – К.: НАУ, 2016. – 396 с.
8. Светлосанов В.А. Экосистемы: устойчивость, риск, хаос / В.А. Светлосанов, В.Н. Кудин, А.Н. Куликов // Изменение природной среды на рубеже тысячелетий : тр. Международной электронной конференции. – Тбилиси–Москва, 2006. – С. 161–164.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2017