

# **Вступ. Теоретичні основи біоіндикації**

**Біоіндикація** (грец. *bios* – життя, лат. *indico* – вказую) – це визначення біологічно значущих навантажень на основі реакцій на них живих організмів та їх угруповань. Повною мірою це стосується всіх видів антропогенних забруднень.



**Головна мета біоіндикації** – діагностика стану навколишнього середовища через встановлення здатності організмів до адаптації у відповідних умовах довкілля.

**Основні завдання біоіндикації** – виявлення організмів та груп організмів-біоіндикаторів, які найбільш чуттєві до змін у навколишньому середовищі, які виникли під дією природних і антропогенних факторів, і добір видів-індикаторів із високим порогом чутливості до антропогенних змін.



## **Біоіндикацію можна охарактеризувати таким чином:**

- як розділ екології, що оцінює екологічні фактори по біологічним ознакам;
- наука, що вивчає залежність між біотичними ознаками і станом екосистем та їх складників загалом;
- наука, що вивчає питання діагностики стану екосистем за показниками біотичних ознак та властивостей.



**Об'єктом біоіндикації** є екологічні характеристики та біотичні ознаки біологічних об'єктів.

Під *біологічними об'єктами* розуміють будь-які біологічні системи на різних рівнях організації живої матерії (молекули органічних речовин, клітини, тканини, органи та системи органів, організми загалом, популяції, види, угруповання організмів).

*Для біоіндикації використовуються* генетичні, біохімічні та фізіологічні порушення в біосистемах хромосом, біомембран, органел, обміну речовин (білків, вуглеводів, жирів), енергетичного та мінерального обміну, включно фотосинтез, активність гормонів та ферментів; морфологічні, анатомічні, біоритмічні, поведінкові відхилення; флористичні, фауністичні, популяційно-динамічні, біогеоценотичні та ландшафтні зміни.

**Предмет біоіндикації** – закономірність зв'язків між екологічними характеристиками та біотичними ознаками.

**Методи біоіндикації** як правило, достатньо прості у використанні й не потребують спеціального обладнання та великих витрат.

**Методи біоіндикації** ґрунтуються на положенні, що для функціонування, росту та розмноження організмів необхідне певне середовище. Угрупування організмів і деякі особини не тільки реагують на зміни в довкіллі, але й самі активно його формують, забезпечуючи у такий спосіб біологічне самоочищення. Тому, будь-яке порушення умов існування угруповання живих організмів призводить до зміни його структури. Причиною можуть бути не лише токсичні речовини, а й фізичні фактори.

## Переваги методів біоіндикації:

- ✓ мають інтегральний характер;
- ✓ підсумовують усі без винятку біологічно важливі параметри навколишнього середовища і відбивають його стан загалом;
- ✓ виявляють наявність у навколишньому природному середовищі комплексу забруднювачів;
- ✓ дають змогу оцінити ступінь шкідливості тих або інших речовин для живої природи й людини;
- ✓ дають можливість контролювати дію багатьох синтезованих людиною сполук;
- ✓ в умовах хронічного антропогенного навантаження біоіндикатори можуть реагувати на дуже слабкі впливи через акумуляцію дози;
- ✓ фіксують швидкість змін, що відбуваються в довкіллі;
- ✓ показують шляхи й місця скупчень різного роду забруднень в екологічних системах і можливі шляхи попадання цих речовин в організм людини;
- ✓ допомагають нормувати припустиме навантаження на різні за стійкістю до антропогенного впливу екосистеми, коли однаковий склад і обсяг забруднень може призвести до неоднакових реакцій природних систем у різних географічних зонах;
- ✓ роблять необов'язковим застосування дорогих трудомістких фізичних і хімічних методів для виміру біологічних параметрів;
- ✓ живі організми постійно присутні в навколишньому середовищі й реагують на короточасні й залпові викиди токсикантів, що може не зареєструвати автоматизована система контролю з періодичним добором проб на аналізи.

## Методи біоіндикації класифікуються в залежності:

- ✓ від рівня організації живих організмів, що досліджуються (напр.: біоіндикація на клітинному рівні, органному рівні, тканинному рівні...);
- ✓ від систематичних груп організмів, що досліджуються (напр.: ліхеноіндикація, дендроіндикація...);
- ✓ від середовища, у якому проводяться дослідження (напр.: методи біоіндикації води, атмосфери, ґрунту).







**Аутбіоіндикація** – дослідження стану навколишнього середовища, що ґрунтуються на спостереженні за змінами деяких організмів чи ознак.

**Синбіоіндикація** – дослідження стану навколишнього середовища, що ґрунтуються на спостереженні за угрупованнями організмів (популяції, види і т. ін.).

**Альгоіндикація** – це оцінювання стану навколишнього середовища за допомогою водоростей.

**Ліхеноіндикація** (від грец. *λειχήν* – лишай, лишайник і лат. *indico* – вказую, визначаю) – це оцінювання стану довкілля з використанням лишайників. Серед ліхеноіндикаційних показників найінформативнішими є картування поширення лишайникових угруповань, розрахунок синтетичних показників – індексів (чистоти повітря, полеотолерантності тощо), а також картування поширення індикаторних видів.

**Бріоіндикація** – (від грец. *bryon* – мох і лат. *indico* – вказую, визначаю) застосування мохоподібних у якості біоіндикаторів.

**Фітоіндикація** – (від грец. *φυτόν* – росина та лат. *indicatio* – вказую, визначаю) застосування у якості біоіндикаторів рослин.

**Дендроіндикація** – (від грец. *dendron* – дерево та лат. *indicatio* – вказую, визначаю). Використання деревних рослин для оцінки стану та змін навколишнього середовища під впливом екологічних факторів.

**Зооіндикація** – (від грец. *ζῷον* – тварина, та лат. *indicatio* – вказую, визначаю) використання тварин у якості індикаторних організмів.

**Біоіндикація** – метод виявлення й оцінки дії абіотичних і біотичних факторів за допомогою біологічних систем. Є два основних методи біоіндикації: пасивний і активний.

**Пасивна біоіндикація** – дослідження у вільно живучих організмів видимих або непомітних ушкоджень і відхилення від норми, що є ознаками несприятливого впливу.

**Активна індикація, або, біотестування** – дослідження тих же впливів у стандартних умовах на найбільш чутливих до цього фактору істотах – тест-організмах.

Живі індикатори не мають бути занадто чутливими й занадто стійкими до забруднення. Необхідно, щоб у них був досить тривалий життєвий цикл. Важливо, щоби такі організми були широко поширені на планеті, причому кожен вид має бути присвячений до визначеного місцеперебування

**Ю. Одум наводить низку суттєвих зауважень, які треба брати до уваги під час використання біоіндикації.**

**1. Стенотопні види**, як правило, є кращими індикаторами, ніж евривиди. Наприклад, копитняк – виражений мезофіт; він трапляється в діброві, де репрезентує багаті умови зростання.

**2. Крупні види** є кращими індикаторами, ніж дрібні, оскільки на даному потоці енергії може підтримуватися більша біомаса або «врожай на корені», і ця біомаса розподіляється між крупними організмами. Наприклад, анемона дібровна – вид дібровних умов зростання, який рясно представлений у буковому лісі лише в час цвітіння (весняний аспект). Однак уже в червні годі знайти його сліди. У той час як бук – індикатор родючих бучин – завжди буде представлений і відіграватиме в будь-який час роль індикатора.

**3. Числове співвідношення** різних видів, популяцій і цілих угруповань часто служить кращим індикатором, ніж чисельність одного виду, оскільки ціле краще, ніж частина, відбиває загальну суму умов. Наприклад, чисті угруповання сосни високих бонітетів є індикаторами свіжих борових та суборових пісків. Коли говоримо про діброви, то беремо до уваги багаті ґрунти і благодатний клімат. Зарості кропиви дводомної індикують багаті на азот землі.

**В біоіндикації варто враховувати чотири основних принципи:**

**1.** Відносна швидкість проведення досліджень. Біоіндикаційні дослідження мають охоплювати одну фенологічну фазу з порівняно однорідними метеорологічними умовами. Біоіндикаційні дослідження для вивчення закономірностей міграції хімічної речовини за харчовими ланцюгами рекомендується проводити в період максимальної біологічної продуктивності угруповань.

**2.** Одержання достатньо точних і відтворених результатів.

**3.** Велика кількість об'єктів біоіндикації з однорідними властивостями. Добір індикаторів із високою зустрічальністю. Біоіндикатори мають бути добре вивчені й мати на всій території досліджень однорідні властивості.

**4.** Діапазон похибок у порівнянні з іншими методами тестування має складати не більш 20%.

У біоіндикації розглядається не оцінка присутності, концентрації або інтенсивності того чи іншого параметра, а реакцію біологічних систем, тобто біологічний вплив фактору. Антропогенні впливи являють собою, з одного боку, нові параметри середовища, з іншого боку – зумовлюють антропогенну модифікацію вже наявних природних факторів і тим самим зміна властивостей біологічних систем. Якщо ці нові параметри значно відхиляються від відповідних вихідних величин, то можлива біоіндикація.

Для кількісної оцінки значущості відхилень необхідні *абсолютні або відносні стандарти*. При біоіндикації антропогенних факторів використовують такі стандарти:

**Абсолютні стандарти порівняння:**

- а) порівняння з показниками біологічної системи, вільної від впливу антропогенного фактору;
- б) експериментальне виключення антропогенних факторів;
- в) порівняння з біологічними системами, які в минулому піддавалися впливу, або слабо чи зовсім не підданих дії антропогенних факторів.

**Відносні стандарти порівняння:**

- а) кореляція зі змінами антропогенних факторів;
- б) встановлення еталонних об'єктів, що випробують незначний або відомий антропогенний вплив.

*Біоіндикація проводиться на всіх рівнях організації живого: макромолекул, клітин, організмів, популяцій, угруповань і екосистеми.*

У відповідності з організаційними рівнями біологічних систем можна встановити різні **рівні біоіндикації**:

1-й рівень: біохімічні і фізіологічні реакції;

2-й рівень: анатомічні, морфологічні, біоритмічні й поведінкові відхилення;

3-й рівень: флористичні і фауністичні зміни;

4-й рівень: ценотичні зміни;

5-й рівень: біогеоценотичні зміни;

6-й рівень: зміна ландшафтів.

Зазвичай з підвищенням рівня організації біологічних систем зростає і складність будови, й одночасно ускладнюються їхні зв'язки з навколишнім середовищем. При цьому біоіндикація на нижчих рівнях є складовою біоіндикації на вищих рівнях. У той час як на нижчих рівнях організації біологічних систем переважають прямі, специфічні види індикації, зв'язані з впливом будь-якого визначеного стресора, на вищих рівнях здійснюється непряма біоіндикація.

Механізми, що лежать в основі пошкодження деяких клітин, організмів, популяцій, або угруповань живих організмів за впливом того самого фактору, що ушкоджує, будуть відрізнятися, тому що кожен із рівнів структури живого описується визначеним набором показників, що належать тільки до цього рівня.

Добір цих показників для біоіндикації проводиться виходячи з визначених критеріїв, що утворюють три групи.



**Перша група складається з критеріїв, що характеризують фундаментальність біологічного впливу, це:**

- 1) існування зв'язку між обраною змінною й такими показниками, як ріст, відтворення, виживаність особин, популяцій, угруповань і екосистеми загалом;
- 2) характер зв'язку між змінною, що спостерігається й реакціями на нижчих і вищих рівнях організації;
- 3) специфічність реакції змінної на фактор, що його спричиняє;
- 4) можливість повернення змінної до свого первісного значення після припинення дії фактору;
- 5) специфічність дії фактору для визначеної групи організмів.

**Друга група включає критерії, що оцінюють ефективність біологічних вимірів, це:**

- 1) характер зв'язку реакції змінної з діючим забрудненням;
- 2) інтенсивність діючого фактору, що спричиняє реакцію змінної, що спостерігається
- 3). межі зміни величини діючого фактору, що викликає ефект, що спостерігається;
- 4) величина проміжку часу, упродовж якого формується реакція (години, дні, роки);
- 5) легкість виявлення перевищення реакції над природним фоном;
- 6) точність виміру реакції змінної, що спостерігається.

**Третю групу утворюють критерії, що характеризують практичну цінність змінних, обраних для біоіндикації, це:**

- 1) оцінка вартості виміру реакції змінної, котра включає вартість капітального устаткування, навчання персоналу і штатів;
- 2) оцінка діапазону використання реакції змінної.

Організми або угруповання організмів, життєві функції яких тісно корелюють із визначеними факторами середовища й можуть застосовуватися для їхньої оцінки, називаються біоіндикаторами.

Біотичний компонент геосистем, що є під впливом літосфери й атмосфери й має велику чутливість до умов середовища існування, можна розглядати як індикатор.

*За допомогою біоіндикаторів принципово* можливо:

- виявляти місця скупчень в екологічних системах різного роду забруднень;
- простежити швидкість змін, що відбуваються в навколишньому середовищі;
- тільки за біоіндикаторами можна судити про ступінь шкідливості тих або інших речовин для живої природи;
- спрогнозувати подальший розвиток екосистеми.

**Залежно від часу розвитку біоіндикаційних реакцій можна виділити шість різних типів чутливості.**

**I тип:** біоіндикатор дає через певний час, упродовж якого він ніяк не відповідав на дію (відсутність ефективного рівня), одноразову сильну реакцію і втрачає чутливість (вище верхнього ефективного рівня).

**II тип:** як і в першому випадку, реакція миттєва й сильна, але продовжується деякий час після чого різко зникає.

**III тип:** біоіндикатор реагує з моменту виявлення порушеної дії з однаковою інтенсивністю упродовж довгого проміжку часу.

**IV тип:** після миттєвої сильної реакції спостерігається її припинення, спочатку швидко, потім більш повільніше.

**V тип:** при появі порушеної дії починається реакція, яка стає все більш інтенсивною, поки не досягне максимуму, а потім поступово припиняється.

**VI тип:** реакція V-го типу багаторазово повторюється; виникає осциляція біоіндикаторних параметрів

## *Біоіндикатори розподілені за шести групами:*

**1.Мікробіологія.** Мікроорганізми швидко реагують на забруднення води і ґрунту. Деякі мікроорганізми особливо чуттєві до визначених речовин, інші беруть участь у розпаді забруднень. Зміни в угрупованнях мікроорганізмів, зменшення видового складу може бути спричинено присутністю в середовищі специфічних токсичних агентів.

**2.Ботаніка.** Для виявлення специфічних забруднень повітряного басейну і для відстежування його динаміки можливе застосування чуттєвих видів. До їхнього числа належать нижчі рослини, лишайники, гриби, велика кількість вищих рослин. Відповідний добір організмів дає змогу знайти як тривалі, так і короточасні впливи забруднення. Толерантні або індикаторні види використовуються для визначення меж поширення певних ґрунтових умов. Вони вказують на рН ґрунту, його родючість, концентрацію важких металів і можуть бути використані для картографування ґрунтів.

**3.Зоологія.** Вивчення певних видів, а також цілих угруповань може стати джерелом інформації, що стосується нагромадження хімічних речовин у тілі тварин.

## *Біоіндикатори розподілені за шести групами:*

**4. Клітинна біологія і генетика.** Чуттєвими біоіндикаторами є клітинні й субклітинні (в т.ч. хромосоми) компоненти організму, адаптовані до визначених умов природного середовища. Зараз є чисельні тест-системи *in vitro* і *in vivo* для коротко- і довгострокового спостереження за змінами навколишнього середовища.

**5. Порівняльна фізіологія.** Багато тварин, з появою нових агентів у навколишньому середовищі, змінюють свою поведінку. Забруднювач, потрапивши на покриви тіла або в органи дихання може бути видалений рефлекторним шляхом. Деякі забруднювачі так змінюють поверхню зіткнення, що порушуються життєво важливі обмінні процеси. Забруднення, що потрапило в організм з їжею – виводиться травним трактом, або проникає в організм, де впливає на функціонування ендокринної, нервової, м'язової, серцево-судинної і видільної систем, функціональні зміни можуть бути досліджені на морфологічному, біохімічному і фізіологічному рівнях і вказують на присутність у навколишньому середовищі небезпечних речовин.

**6. Гідробіологія.** Зони розподілу або спектр видів, чуттєвих до якості води, відображають стан водного басейну. Необхідно тільки обрати відповідний вид-індикатор для конкретних токсикантів.

Біоіндикатори можуть бути **прямими й непрямими**. Якщо реакція живого організму спричинена безпосередньо впливом зовнішнього фактору, то мова йде **про пряму індикацію**. У **непрямих індикаторів** реакція виникає через систему опосередкованих взаємозалежних реакцій і прямо не зв'язана зі стресовим впливом.

Біоіндикатори бувають **позитивними й негативними**. **Позитивні** біоіндикатори характеризуються збільшенням реакції (кількісних характеристик) зі збільшенням стресового фактору.

Залежно від реакції біоіндикатора на певний стресовий фактор виділяють **специфічний і неспецифічний** характер біоіндикації. У випадку **специфічної** біоіндикації реакція організму є характерною для якого-небудь стресора. Є такі види, у яких можуть з'являтися явні симптоми впливу, що свідчать про присутність у навколишньому середовищі одного або декількох забруднюючих речовин. Вони можуть також виявляти і специфічні симптоми, що дає змогу проводити й кількісні виміри рівня забруднення. Однак часто в біоіндикаторів, особливо рослин, та сама реакція спричинена різними стресорами або їх сукупністю.

Здатність організмів однаково реагувати на зміну факторів середовища ускладнює виявлення справжніх причин прояву реакції. У такому випадку говорять про **неспецифічну індикацію**. Ця властивість біоти ускладнює процес одержання інформації з принципу «вплив – реакція». Для виявлення причин порушень необхідні вивчення хімічного складу абіотичних компонентів екосистеми й порівняльна оцінка нагромадження полютантів у рослинах із фоновими характеристиками.

Якщо в біоіндикаційних дослідженнях використовується один параметр, то говорять про **частковий біоіндикатор**. У тому випадку, коли застосовується система біоіндикаційних ознак, говорять про **комплексний біоіндикатор**.

Біоіндикація може проводитися при наземних польових дослідженнях і при дешифруванні аерокосмічних матеріалів. За ступенем дешифрування **індикатори** діляться на **аерофотогенічні** (добре помітні на матеріалах дистанційних зйомок) й **ультрадеципієнтні** (помітні при детальних наземних дослідженнях).

За ступенем географічної стійкості зв'язку з об'єктом індикації виділяють індикатори: **панареальні** – що зберігають однаковий зв'язок з об'єктом індикації на всій території, у межах якої вони зустрічаються, тобто в межах усього ареалу; **регіональні** – що зберігають своє значення лише в межах однієї чи декількох областей із подібними фізико-географічними умовами; **локальні** – що здатні утворювати стійкий зв'язок з об'єктом індикації тільки на визначеній території.

**За ступенем вірогідності виділяють такі індикатори:**

**Виняткові** – поширені тільки на об'єкті індикації й не зустрічаються на інших. Спряженість 95-100 %.

**Постійні** – поширені майже на всіх об'єктах індикації і практично не зустрічаються на інших. Спряженість 80-95 %.

**Змінні** – поширені здебільшого на об'єктах індикації, але зустрічаються й на інших. Спряженість 60-80 %.

**Відносні** – поширені на об'єктах індикації в тій же кількості, що й на всіх інших об'єктах. Спряженість 40-60 %.

**Індиферентні** – не мають переваги в поширенні на об'єкті індикації й зустрічаються рівнозначно на інших об'єктах. Спряженість 40-10 %.

**Негативні** – поширені на об'єктах фону й не зустрічаються зовсім або дуже рідко на об'єкті індикації. Спряженість 0-10 %.



Для оцінки індикаторної значимості визначають частоту зустрічальності індикатора у відсотках, по величині якої **Б. В. Віноградов** (1964) запропонував **виділяти такі індикатори:**

**Фонові** – зустрічаються на 80-100 % майданчиків об'єкта індикації.

**Рясні** – зустрічаються на 60-80 % майданчиків об'єкта індикації.

**Спорадичні** – зустрічаються на 40-60 % майданчиків об'єкта індикації.

**Рідкісні** – зустрічаються на 20-40 % майданчиків об'єкта індикації.

**Одиничні** – зустрічаються на 5-20 % майданчиків на об'єкта індикації.

Індикатори можуть мати різні спряженість і зустрічальність. З огляду на співвідношення **спряженості й зустрічальності**, виділяються такі біоіндикатори:

**Абсолютні** – мають найбільше індикаторне значення. Вони характеризуються високою спряженістю і високої зустрічальністю.

**Унікальні** – мають високу спряженість і знижену зустрічальність на об'єкті індикації.

**Вульгарні** – мають низьку спряженість, але високу зустрічальність на об'єкті індикації.

Біологічні методи допомагають діагностувати негативні зміни в природному середовищі за низькими концентраціями забруднюючих речовин. При цьому види, що використовуються – **біоіндикатори** мають задовольняти **таким вимогам:**

- індикаторами мають бути види, які характерні для природної зони, де розташовується об'єкт індикації;
- організми-індикатори мають бути поширені на всій території, що досліджується;
- індикатори мають мати чітко виражену кількісну і якісну реакцію на відхилення властивостей середовища існування від екологічної норми;
- біологія видів-індикаторів має бути добре вивчена.

**Біоіндикаційні дослідження** – важливий розділ екологічного моніторингу. Інструментальні методи вимірювання забруднення навколишнього середовища не можуть замінити біоіндикації, значення якої полягає не у вимірюванні параметрів середовища, а у вивченні відповіді живих організмів на його вплив.

Залежно від реакції організму на фактори середовища можна виділити різні форми біоіндикації: **неспецифічну та специфічну**.

Для **неспецифічної біоіндикації** характерна реакція організму на комплекс факторів, тоді як у **специфічної біоіндикації** мова йде тільки про реакцію на один фактор середовища. У природі часто буває невідомим, на який із факторів середовища реагують популяції та угруповання тварин. Разом із тим, цінним є виявлення комплексної біологічної відповіді на вплив навколишнього середовища, який неможливо отримати за допомогою інструментальних методів дослідження.