

## Лекція 4

### Фітоіндикація та її роль в оцінці довкілля

#### План

Поняття «фітоіндикація».

Історія розвитку фітоіндикації.

Фітоіндикація антропогенних впливів за морфологічними змінами рослин.

Оцінювання реакції рослин на забруднення.

Адаптація рослин до умов техногенно забрудненого середовища.

#### Поняття «фітоіндикація»

**Фітоіндикація** – складова частина розділу дисципліни біоіндикації, яка є прикладним напрямком екології і розробляється для оцінки факторів середовища за біологічною складовою, насамперед рослинністю. Це визначення умов середовища за характером і станом рослинності.

Методи фітоіндикації широко використовують в системі моніторингу. Вони суттєво відрізняються від інших методів дешевизною і можливістю одночасно охопити великі території, що підлягають індикації, а також відносно простотою інтерпритації. Вони дозволяють використати інформацію і оцінити режими тих дій, які під час спостереження мають нульову активність.

Фітоіндикацію проводять на різних рівнях організації рослин: клітинному, анатомо-морфологічному, рівні організму, популяційному, фітоценотичному та ландшафтному.

Кожний вид рослин, крім історії розвитку, розповсюдження, структури популяції характеризується специфікою екології, що визначає поведінку його в природі по відношенню до інших видів. Індивідуальність поведінки видів визначає той важливий момент, що сумісне їх зростання в ценозі призводить не тільки до конкуренції, але й до такого доповнення, яке сприяє оптимальнішому використанню екологічних ресурсів.

У зв'язку з цим, перед фітоекологами, з одного боку, постала важлива наукова проблема оцінки потенційних кліматичних, едафічних ресурсів, а з іншого - визначення ступеня відповідності реально існуючої екосистеми цим можливостям за допомогою фітоіндикації, тобто через аналіз поведінки видів рослин.

Фітоіндикація це науковий напрямок, основою якого є оцінка екологічних факторів, або екосистем за допомогою флористичних ознак, тобто ознак видів, угруповань, їх сукупності та взаємовідносин.

Процес фітоіндикації складається з наступних операцій:

- вибір індикату (фактору), що зумовлює мету індикації;
- вибір способу і масштабу вимірювань його величини або зміни;
- пошук індикатора на основі логічних доказів його зв'язків з даним фактором;
- розроблення шкали вимірювання індикаційних ознак;
- визначення ступеня кореляції між зміною фактора і індикатора, а також засобу його відображення.

При фітоіндикації зміни біологічної системи завжди залежать як від антропогенних так і від природних факторів середовища. Ця система реагує на дію середовища в цілому у відповідності зі своєю схильністю, тобто такими внутрішніми факторами, як умови харчування, вік, генетично контрольована стійкість та вже присутні порушення. Якщо індикатор реагує значним відхиленням життєвих проявів від норми, то він є чутливим фітоіндикатором. Акумулятивні фітоіндикатори, навпаки, накопичують антропогенні впливи більшою частиною без швидкого виявлення порушень. Функції індикатора виконує той вид, який має вузьку амплітуду екологічної толерантності по відношенню до якого-небудь фактора. В більшості випадків це рослини - організми, які не здатні до активного переміщення.

Індикація екологічних умов проводиться на основі оцінки зміни як видового розмаїття організмів тієї чи іншої місцевості, так і їх хімічного складу, який відображає їх здатність накопичувати елементи та сполуки, які надходять з оточуючого середовища. Наприклад, оцінка стану оточуючого середовища по зміні кількості видів пов'язана з тим, що найбільш чутливі до тих чи інших забруднюючих речовин види рослин зникають з біоценозу (лишайники в промислових центрах) або, навпаки, збільшують свою чисельність (синьо-зелені водорості при надходженні у водойми забруднюючих речовин з сільськогосподарських угідь) [14].

Отже, фітоіндикація є складовою частиною екологічного моніторингу - системи нагляду за станом оточуючого середовища на певній території (від ділянки суші або водної поверхні до цілого континенту) з метою раціонального використання природних ресурсів та охорони природи. Біологічний моніторинг включає нагляд за станом оточуючого середовища та факторами дії, а також прогнозування зміни оточуючого середовища та оцінку його майбутнього стану. Його об'єктами виступають рослини та їх угруповання.

### Історія розвитку фітоіндикації

Фітоіндикаційні дослідження мають історію, яка своїми коренями сягає в глибину століть, коли пошук та вирощування якої-небудь рослини людина пов'язувала з певними екологічними умовами. Письмові згадки про оцінку земельних угідь за допомогою рослин є у стародавніх учених Китаю, Індії, Греції, Риму. В Росії одним з перших хто писав про зв'язок між рослинами та якістю сільськогосподарських угідь був О.М. Радіщев в праці "Опис моїх угідь".

Наукового рівня фітоіндикація почала набувати з розвитком геології, географії, ґрунтознавства, ботаніки. Початок ведеться з робіт О. Гумбольта (1805, 1807, 1814), який зумів побачити суттєві закономірності, які зв'язують рослинний покрив та найважливіші екологічні фактори. Ідеї О. Гумбольта були продовжені в роботах Л. Поста (1862) та А. Грідехаха (1880), які пропонуючи класифікацію рослинних угруповань, показали тісний взаємозв'язок між останніми та екологічним середовищем. О. Варлінгом (1896) виділялись класи угруповань гідрофітів, мезофітів, галофітів, ксерофітів а також екологічні групи видів. Класифікації рослинності на екологічній основі розроблялись А. Шимпером (1898), А. Дільсом (1908, 1910), А. Каядером (1913). В Росії завдяки розмаїттю природних умов, велись широкі дослідження зміни рослинного покриву в залежності від факторів середовища. Важливим етапом на цьому шляху стали роботи з оцінки та картування ґрунтів, створені В.В. Докучаєвим (1885, 1897, 1899). Їх продовженням були дослідження Переселенського управління та його дослідних станцій. В цей період опубліковані роботи Н.А. Дімо та Б.О. Беллера (1907), П.А. Костічева (1908), С.К. Чаянова (1908), Г.М. Висоцького (1914).

З ім'ям Ж. Браун-Бланке (1913) пов'язана класифікація рослинності, яка відображала екологічну специфіку рослинних угруповань (симфітоіндикація). Засновником теорії про симфітоіндикацію слід вважати Л.Г. Раменського (1929), який не тільки відстоював положення про екологічну обумовленість рослинних угруповань, але й запропонував методи оцінки екологічних режимів за факторами вологості ґрунтів та їх змінних багатств, засоленості, пасовищної дегресії. Раменський запропонував ряд нових методик - екологічних рядів, екологічної оцінки ценозів, побудову синекологічних діаграм.

В 60-х роках ХХ століття відбувається виділення фітоіндикації як самостійного наукового напрямку та подальша її диференціація, узагальнення матеріалів, розробка різних екологічних шкал, нових методів дослідження й оцінка екологічних факторів та їх динаміки, що дозволяє ідентифікувати більш складні закономірності не тільки локального, але й ландшафтного, регіонального і навіть глобального рівня. Узагальнення деяких біоіндикаційних досліджень цього періоду втілено в монографіях та оглядах Алахвердійова, Вікторова, Ремезова, Корчагіна, Виноградова, Мяло, Горянінова, Миркини та інших.

Особливістю цього етапу є розвиток дистанційної (аеро- та космічної) фітоіндикації, а також модернізація математичного апарату.

Значну роль у формуванні методології фітоіндикації на сучасному рівні відіграє системний підхід. Розробка нових методик тісно пов'язана з впровадженням персональної комп'ютерної техніки, без якої досягти сучасного наукового рівня було б неможливо.

Спостерігається подальша диференціація напрямків фітоіндикації залежно від специфіки індикаторів і умов, або факторів, які індикуються (індикатів). Зокрема, для оцінки умов середовища можуть використовуватися дані біохімічних аналізів, ботанічні, гідробіологічні, мікробіологічні чи зоологічні показники.

### **Фітоіндикація антропогенних впливів за морфологічними змінами рослин**

Динамічна рівновага та стабільність біологічних систем тісно пов'язані з фітоіндикацією морфо-генетичних змін рослин у відповідь на антропогенні впливи. На рівні організмів та екосистем впливи стресорів відрізняють тільки завдяки появі зовнішніх симптомів ушкоджень (некрози, хлорози) після того як порушена границя адаптаційної здатності і системи стають нестабільними. Для деяких стресових факторів вже випробувані та іноді спеціально підібрані різноманітні морфологічні індикатори, за допомогою яких можлива коротко або довгострокова індикація як при низьких, так і при високих дозах їх впливів.

Макроскопічні зміни пов'язані зі змінами забарвлення листя, які являють у більшості випадків неспецифічну реакцію на різноманітні стресори.

**Хлороз** - бліде забарвлення листя між жилками. Так (у рослин на відвалах, які залишаються після видобутку важких металів); пожовтіння країв або певних ділянок листя (у листяних дерев під впливом хлоридів); почервоніння (накопичення антоціанів у вигляді плям на листях смородини та гортензії під дією  $SO_2$ ); побуріння або побронзовіння (у листяних дерев - часто початкова стадія важких некротичних ушкоджень, у ялини та сосни - служить для подальшої розвідки димових ушкоджень). Зміна забарвлення при яких характер ураження листя схожий з морозними ураженнями - часто перші стадії некрозів.

**Некрози** - відмирання обмежених ділянок тканин - важливі симптоми ушкоджень при індикації, іноді специфічні. Розрізняють такі види некрозів:

1) крапельні та плямисті некрози - це відмирання тканин листової пластинки у вигляді крапок або плям, дуже характерні сріблясті плями після впливу озону у тютюну сорту Bel W3;

2) міжжилкові некрози - відмирання листової пластинки між бічними жилками першого порядку, часто при дії  $SO_2$ ;

3) крайові некрози - характерні, чітко відмежовані форми, з'являються у лип, які ушкоджені кам'яною сіллю, яку застосовують для танення льоду. Поєднання міжжилкових та крайових некрозів приводить до появи візерунку типу "риб'ячого скелету";

4) верхівкові некрози (в особливості у однодольних та хвойних), характерні темно-бурі, різко відмежовані некрози кінців хвої у сосни та ялиці після дії  $SO_2$ , або білі знебарвлені некрози верхівок листя;

5) некрози навколоплоднику, які утворюються після впливу  $SO_2$  на насінні плоди, особливо біля квіток. При розвитку некрозів спочатку спостерігається зміна в забарвленні (при дії  $SO_2$  найчастіше утворюються брудно-зелені; пероксиацетилнітрату - просочені водою;  $O_3$  - плями з металічним блиском; хлоридів - хлорози). Після загибелі клітини вражені ділянки осідають, висихають і можуть за рахунок виділення дубильних речовин забарвлюватись у бурий колір (часто у дерев), або через декілька днів вицвітають до білуватого забарвлення.

Передчасне в'янення відбувається під дією етилену в теплицях: квіти гвоздики при цьому не розкриваються, а пелюстки орхідей в'януть.

Опадання листя (дефоліація) у більшості випадків спостерігається після некрозів або хлорозів. Прикладом служать зменшення тривалості життя хвої, її осипання у ялин, скидання двоголкових укорочених пагонів у сосни, передчасне опадання листя у лип та кінських каштанів під впливом солі, яку застосовують для танення льоду, або у агрусу та смородини під дією  $SO_2$ .

Зміна форми, кількості та положення органів. Аномальна конфігурація листя відмічена у листяних дерев після впливу радіоактивного випромінювання. В результаті локальних некрозів виникає потворна деформація, перетягування, здуття або викривлення пагонів, зрощення або розщеплення окремих органів, збільшення або зменшення в числі частин квітки, зміна статі та інші аномалії розвитку під дією гормональних гербіцидів або радіоактивного випромінювання.

Зміна напрямку, форми росту і галуження. Зміну напрямку росту коренів відмічено у кульбаби при зміні рівня ґрунтових вод; у *Dyscranium polysetum* - утворення сланких пагонів та галуження; у лип при стійкому забрудненні атмосфери HCl або SO<sub>2</sub> спостерігається кушовидна та подушкова форми росту; у вражених димом хвойних порід зрідження крони та зміна бонітету стовбура.

Зміна приросту в більшості неспецифічна, але широко застосовується при індикації, так як є більш чутливим параметром, чим некрози і дозволяє безпосередньо визначити зниження продуктивності вирощуваних людиною рослин. Вимірюють головним чином зміни радіального приросту стовбура, приросту пагонів та листя в довжину, довжину коренів.

Зміна плодовитості спостерігається у багатьох рослин, це може бути, наприклад, зменшення утворень плодових тіл у лишайників.

В зоні забруднення повітря сірчистим газом рослини інтенсивно накопичують у своїх тканинах сірку. Звичайно чим більший склад цього елемента в рослинах, тим сильніше виявляється пошкоджене листя. Спочатку на них виникають опіки, потім листові пластинки зморщуються, відмирають та опадають. В рослинах, які піддавались впливу двоокису сірки, різко падає вміст хлорофілу, суттєво порушується структура хлоропластів. Все це відбивається на інтенсивності фотосинтезу, він різко ослаблюється, що в свою чергу гальмує ріст рослин, знижує врожайність, послаблює стійкість рослин до збудників хвороб. Рослини, у яких реакція на сірчистий газ проявляється різко та чітко, можна використовувати як індикатори цього токсиканта. Таким індикатором можуть бути епіфітні лишайники, які потребують дуже чистого повітря і найменше забруднення атмосфери, яке не впливає на більшість вищих рослин, викликає їх масову гибель. Хвойні породи теж страждають від сірчистого газу, під дією якого хвоя сосни в зонах сильного забруднення набуває темно-червоного кольору, який розповсюджується від основи голок, до їх гострого кінця, а потім голки відмирають і опадають. Дуже високою чутливістю до сірчистого газу володіє злак тонконіг однорічний (*Poa annua* L.).

Фтор також дуже шкідливий для рослин. Рослинні клітини реагують на нього відразу ж після його проникнення у тканини. Перш за все на рослинах з'являється хлороз, який супроводжується відмиранням листя (цитрусові, хвойні, рис, коліус, яблуня, груша). При індикації забрудненості атмосфери фтором використовують особливо чутливі до фтору рослини: цибулю, гладіолуси, ялину, кvasолю, сосну. Ці рослини страждають вже при концентрації фтористого водню порядку 0,5 мкг/м<sup>3</sup>, найбільш характерний признак пошкодження хвойних порід - побіління, а потім потемніння кінців голок.

Більш ніж 40 хімічних елементів таблиці Менделєєва відносяться до важких металів. З точки зору забруднення оточуючого середовища, в основному ґрунтів, здатності накопичуватись в харчових продуктах та токсичності найбільше значення мають Hg, Pb, Cd, Sn, Va, Zn, Sb, Cu, Ni, Mo, As і Co. Для індикації забрудненості атмосфери важкими металами використовуються нижчі рослини, сфагнові мохи, лишайники. Під впливом надлишку деяких елементів в природному середовищі змінюється забарвлення листя, квітів, плодів та інших органів вищих рослин.

Найбільш часто при надлишку того чи іншого елемента виникає явище хлорозу - втрата зеленого забарвлення, яке супроводжується пожовтіння, а іноді навіть побілінням листя. До виникнення таких хлорозів призводить надлишок в ґрунті сполук алюмінію, марганцю, міді. Надлишок рухливого цирконію приводить до омертвіння тканин листка, при цьому між омертвілими ділянками можуть зберігатися зелені зони. Розповсюдження хлорозу від верхівки листка до основи викликано переенасиченням ґрунту цинком.

В результаті насичення тим чи іншим хімічним елементом змінюється також забарвлення квітів. Під дією йоду починають переважати жовто-червоні відтінки. У випадку збільшення у ґрунті марганцю квіти ряду рослин набувають невластиву їм жовто-червону гаму, а гвоздики та айстри - темно-пурпурової. Пелюстки троянд під дією міді із рожевих та жовтих перетворюються в голубі або навіть червоні. Присутність у ґрунті високих доз нікелю приводить до того, що у сон-трави оцвітина змінює колір з фіолетового на білий.

Специфічний вплив підкислення ґрунтів на рослини (кислотні дощі) позначається на кислоточутливих видах; забруднення ґрунту пилюкою, яка містить важкі метали - на рослинах з високою чутливістю до підвищеного вмісту цих елементів; шкода, яка наноситься дією сольового стресу позначається на фізіолого-біохімічних реакціях як солечутливих глікофітів, так і більш або менш солестійких галофітів.

Отже, проблема захисту природного середовища в нинішній час носить глобальний характер. Важливим етапом на шляху оздоровлення природного середовища стає розробка методів моніторингу, які направлені на виявлення, ідентифікацію та визначення концентрації токсичних речовин. Дуже важливий елемент при цьому - рослини, які дуже чутливо реагують на стан атмосфери та гідросфери. Після порушення адаптаційної здатності у рослин з'являються зовнішні симптоми ушкоджень за якими можна робити індикацію тих чи інших стресових факторів на рослину .

### **Оцінювання реакції рослин на забруднення**

У польових умовах необхідний ретельний відбір рослин для встановлення залежності **“доза – відповідна реакція”**. Якщо рослина реагує на вплив ушкодженням листків, зміною темпів росту, врожайності, слід експериментально з'ясувати, як вона реагує на різні дози однієї й тієї самої речовини або суміші.

Пошкодження листя можна аналізувати за допомогою серії фотознімків методом прямих порівнянь знімків ураженого листя з контрольними знімками листя рослин, які зазнали впливу відомих концентрацій забруднюючих речовин у лабораторних умовах. Поділ досліджуваної ділянки з великою кількістю рослин на квадрати дає змогу кількісно виразити: дані про пошкодження листя, з'ясувавши кількість ушкоджень; ступінь пошкодження; чисельність ушкоджень на одиницю поверхні. За допомогою лінійних графіків можна відобразити залежності пошкодження листя від періоду дії та дози забруднюючої речовини. Ці криві можна порівняти з кривими **“доза - відповідна реакція”**, отриманими в лабораторних умовах. У такий спосіб можна визначити якісний склад повітря протягом певного періоду і встановити вид забруднюючої речовини або склад суміші.

Певний метод кількісної оцінки обирають залежно від рослинного матеріалу, забруднюючої речовини та вимірюваних параметрів, які потребують дослідження. Ступінь пошкодження листя трав'янистих рослин з'ясовують візуально, визначаючи площу (у відсотках) ушкодженої поверхні листя. У разі спостереження за хвойними рослинами оцінюють довжину голок, їх колір і форму, вік хвої, кількість ушкоджених голок на гілці (у відсотках).

Для використання в ролі біомонітора необхідно відбирати такі рослини:

- із вираженою реакцією на вплив забруднюючої речовини, тобто помітними ознаками ушкодження, змін швидкості росту, морфологічних змін, порушень цвітіння, змін продуктивності або врожайності;
- невибагливі до умов вирощування й догляду;
- які мало піддаються впливу шкідників та хвороб.

### **Адаптація рослин до умов техногенно забрудненого середовища**

Здатність рослин пристосовуватись до зміни умов середовища Д.М. Гродзинський розглядав як прояв форм надійності, а А.А. Жиренко – як реалізацію їх адаптивного потенціалу. Приуроченість рослин до певного місцезростання привела в ході еволюції до створення різних

видів вищих рослин, які відрізняються хімізмом обміну речовин. Ці біохімічні відмінності, біологічні особливості росту та розвитку, а також анатомо-морфологічні відмінності в будові асимілятивних органів рослин і визначають, на погляд Л.П. Красинського, видові відмінності в газостійкості, яка в першу чергу визначається їх фізіолого-біохімічними особливостями.

В світлі положень надійності біологічних систем, сформульованої Д.М. Гродзинським, в стійкості рослин до дії викидів промислових підприємств першорядне значення повинні мати механізми, які забезпечують автономний захист кожного органу та окремої його клітини від несподівано або швидко поступаючих, різноманітних за хімічним складом синтетичних речовин.

У відповідь на дію екстремальних факторів природного середовища в клітинах рослин синтезуються не тільки специфічні адаптогени та стрес протектори, але й при досягненні певного рівня напруги фактору і токсичні речовини.

Техногенне забруднення навколишнього середовища різними хімічними речовинами є для рослин не стільки якісно новим, скільки кількісно вагомим фактором, тобто суттєво перевищує можливості механізмів стійкості. Надходження в надземні органи рослин токсичних синтетичних речовин як за об'ємом, так і за часом дії значно перевищує поглинання рослинами непотрібних речовин природного походження.

Інгредієнти техногенного забруднення середовища відносяться до не ресурсних факторів, дія яких на рослини може істотно лімітувати ефективність використання природних ресурсів, необхідних їй для нормального росту та розвитку. Зменшення біомаси, скорочення тривалості життя дерев'янистих рослин Ю.З. Кулагін розглядав як “вимушену плату” за адаптацію до умов техногенних екотопів. Фенотипічні модифікації рослин в екстремальних умовах техногенних екотопів можуть мати двоякі властивості: пов'язані з підвищенням функціональної значимості захисних механізмів цілої рослини та окремих її органів або з посиленням ефективності використання ресурсних факторів середовища.

Натурні дослідження в різних промислових регіонах показують, що трав'яні рослини більш пристосовані до росту в умовах забрудненого середовища. На відміну від деревних порід, повний індивідуальний розвиток деяких евритопних видів можливий в найбільш несприятливих умовах техногенних екотопів, наприклад, на територіях промислових виробництв, біля основних джерел емісій та токсичних відвалів гірничих кар'єрів.

Для деревних рослин адаптивні зміни пов'язані з формуванням малооб'ємних щільно зімкнутих слабопродувних кулястих або зонтичних крон. Формування щільнозімкнутих слабопродувних крон знижує вірогідність тотального пошкодження мутагенами асиміляційних органів та новоутворень як у вегетативній, так і в генеративній сферах. В екстремальних умовах природного та техногенно забрудненого середовища спостерігається мінімізація розмірів основного органа рослин - пагона. Формування вкорочених меживузль, зміна ауксибластів (видовжені пагони) в брахіопласти (вкорочені пагони) – результат скорочення періоду активності росту рослин та прискорення елементарних етапів морфогенезу. Зниження темпів росту деревних рослин, які піддаються дії емісії промислових підприємств, пов'язано з перерозподілом речовино-енергетичних ресурсів між вегетативними та генеративними частинами рослин. Із-за постійної надмірної витрати ресурсів пластичних речовин на створення необхідних морфоструктур, повільне накопичення фітомаси в життєвій стратегії рослин техногенних екотопів значно скорочуються або повністю виключають репродуктивні фази розвитку.

Як реалізацію принципу „уникнення” критичних періодів, або ритмологічної поліваріантності, слід розглядати і скорочення строків вегетації у багатьох видів рослин в екстремальних умовах техногенних екотопів. Цей зсув у фенологічному стані рослин досягається за рахунок передчасного опадання листя. Скорочення строків вегетації і, відповідно, збільшення біль безпечного у відношенні впливу полютантів періоду органічного та

вимушеного спокою Ю.З. Кулагін розглядив як прояв „анаболітичної форми зимостійкості” в адаптивній стратегії виду.

Порівнюючи способи захисту цілісності онтогенезу рослин в екстремальних умовах природного та техногенного забрудненого середовища Ю.З. Кулагін відмічав високу ступінь їх ідентичності у фенологічному прояві, що може свідчити про генетичну предвизначеність загальних реакцій рослин на пошкоджуючий вплив полютантів та стресову дію природних факторів, в межах видової адаптивної норми. Звісно, що платою за виживання рослин в найбільш жорстких умовах техногенних екоотопів є значне зниження цінності їх господарських та декоративних якостей.