

# **Біоіндикація забруднення атмосфери**

## План

1. Використання тварин, грибів та рослин у якості біоіндикаторів повітря.
2. Ліхеноіндикація.
3. Методика складання ліхенологічних карт.
4. Визначення стану трансформованих ландшафтів за допомогою лишайників.
5. Бріоіндикація стану забруднення повітря.
6. Флуктуюча асиметрія.

**Оскільки рослини в цілому володіють відносно високою чутливістю до дії деяких забруднюючих речовин, їх можна використовувати в якості індикаторів для виявлення забруднення і визначення його рівня, а також при здійсненні моніторингу стану забруднення атмосфери.**

**Якщо рослини здатні накопичувати забруднюючі речовини без зміни їх хімічного складу за рахунок метаболічних процесів і якщо акумульовані речовини можуть бути легко ідентифіковані в зразках рослини, то такі види рослин можна використовувати як накопичувачі забруднення.**

## **Для такого моніторингу надзвичайно важливо дотримуватися наступних умов:**

1. Вплив повинен призводити до помітної реакції рослини на забруднення повітря.
2. Ефекти впливу повинні добре відтворюватися при використанні рослин генетично подібних популяцій, що гарантує репрезентативність результатів.
3. Ефекти впливу повинні характеризуватися специфічними симптомами, властивими впливу індивідуальних забруднюючих речовин.
4. Рослини повинні бути дуже чутливими навіть до надзвичайно низьких концентрацій забруднюючих повітря речовин.
5. Рослини повинні добре рости і бути стійкими до захворювань, впливу комах.

В теперішній час відомо декілька видів (типів) ефектів впливу забруднення повітря на рослини, котрі можна умовно розділити на **ефекти гострої дії** високих концентрацій за короткий проміжок часу і **хронічної дії** низьких концентрацій цих речовин за тривалий період.

Прикладами ефектів гострого впливу є чітко помітний хлороз або некроз тканин листя, опадання листя, плодів, пелюсток квіток, скручування листків, викривлення їх стебел



До ефектів хронічної дії відноситься сповільнення або зупинка нормального росту і розвитку рослин (що обумовлюють, зокрема, зменшення об'єму біомаси, зниження врожаю сільськогосподарських культур); хлороз і некроз верхівок листя; повільне в'янення рослини або її органів. Іноді прояви хронічної або гострої дії можуть бути специфічними для окремих забруднюючих речовин або їх поєднання.





Доволі багато різних видів рослин можна використовувати в якості індикаторів або накопичувачів забруднення повітря через їх здатність до прояву ефектів впливу.



Наприклад, для цих цілей можуть бути використані епіфітні види лишайників, мохи, папороті, вищі форми рослин, що мають судинну систему



Для біологічного моніторингу ефектів забруднення повітря придатні як **дикорослі**, так і **культурні види рослин**. Проте різниця в складі ґрунтів, ґрунтових вод та інші фактори (включаючи кліматичні) можуть вплинути на ефекти впливу забруднення повітря, що спостерігаються в різних районах. Через це доцільно вибирати такі індикаторні або **акумулючі види рослин**, умови зростання яких найбільш близькі (до них відносяться стан ґрунту, ґрунтових вод та інші)

Рослинний покрив як важлива складова біосфери відображає її загальний стан і перебіг майже усіх процесів, що відбуваються на планеті. Життя на Землі було б неможливе без *безперервного процесу фотосинтезу*, що відбувається в зелених частинах рослин, які є основним стабілізатором вуглекисло-кисневого балансу повітряного басейну. Рослини як важливий компонент *біогеоценозу помітно впливають на інші його елементи, сприяють формуванню ґрунтового покриву, впливають на хімізм ґрунту і його родючість, а також на життя усіх тварин і живих організмів, одночасно реагуючи на всі зовнішні фактори.*

Рослини чутливо реагують на зовнішні умови. За достатньо високих концентрацій забруднювачів у багатьох з них ушкоджується листя, а зі зростанням кількості забруднюючого фактору протягом короткого проміжку часу можливе значне **ураження рослини**.

**Основні забруднюючі речовини, на які реагують рослини:** озон (O<sub>3</sub>), оксиди азоту, діоксид сірки, фториди.

**Другорядними забруднюючими речовинами, які діють на рослини є** аміак, бор, хлор, етилен, пропилен, хлористий водень, соляна кислота

**Озон (O<sub>3</sub>)** - газоподібна забруднююча речовина, яка утворюється внаслідок складної реакції між окислами азоту за участю сонячного світла. Озон потрапляє в рослину через листя внаслідок звичайного газообміну між рослиною і навколишнім середовищем. Найбільш чутливе до дії озону листя, яке формується, але найпомітніше він уражає старі листки рослини. Загальною ознакою ураження рослин озоном є плямистість, яка вказує на його гостру дію. Ознаки ушкоджень рослин озоном різні й залежать від виду та сорту рослини, концентрації озону, часу експозиції (дії світла), а також від багатьох інших факторів. Специфічна ознака гострої дії озону на рослину - поява цяточок, які з часом зливаються й утворюють плями на поверхні листка. Цяточки можуть бути білими, чорними, червоними або червонувато-пурпуровими. За низьких концентрацій O<sub>3</sub> листя набуває червоно-бурого або бронзового кольору що, як правило, призводить до хлорозу, старіння та опадання листя. Хлороз може бути єдиною ознакою хронічного впливу озону протягом тривалого часу



- ✓ Тютюн (*Nicotiana tabacum* cv. Bel W 3)
- ✓ Шпинат (*Spinacia oleracea* cv. Subito, Dynamo)
- ✓ Соя (*Glycine max*)



1. Некротичні плями сріблястого кольору на верхньому боці листка
2. Некроз верхньої частини листя



**Оксиди азоту (NO<sub>x</sub>)** – газоподібні забруднюючі токсичні сполуки NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O. У забрудненому повітрі вміст оксидів азоту зумовлює утворення озону. Однак у багатьох випадках концентрація оксидів азоту надто мала, щоб помітно ушкодити рослину. Низькі концентрації NO<sub>2</sub> стимулюють ріст рослин, листя набуває темного кольору. Проте у деяких випадках виникає неспецифічний хлороз із наступним ушкодженням та опаданням листя. Англійські вчені виявили, що оксиди азоту є основною речовиною, яка забруднює повітря в теплицях, які обігрівають вуглеводневим паливом. Гостра дія NO<sub>2</sub> може бути схожа з гострою дією на рослини SO<sub>2</sub>.





1. Шпинат (*Spinacia oleracea* cv. Subito, Dynamo)
2. Махорка (*Nicotiana rustica*) Сельдерей (*Apium graveolens*)
3. Щури (*Rattus rattus*)



1. Некрози між жилками листків
2. Пероксидація ліпідів легеневої тканини

**Діоксид сірки ( $\text{SO}_2$ )** – забруднююча речовина, яку викидають у повітря теплові електростанції (особливо ті, що працюють на вугіллі) і деякі промислові підприємства. Її концентрація в повітрі висока поблизу джерел викидів і поступово знижується із збільшенням відстані від нього. За природних умов можливе поєднання гострої та хронічної дії  $\text{SO}_2$ .  $\text{SO}_2$  потрапляючи на листя, окислюється до високотоксичної сполуки  $\text{SO}_3$ , а потім повільно перетворюється на сульфат  $\text{SO}_4$ , менш токсичний. При низьких концентраціях  $\text{SO}_2$  у повітрі практично повністю окислюється до сульфату, і рослини не страждають. За високої концентрації  $\text{SO}_3$  відбувається гостре ушкодження листя широколистяних рослин, між жилками (з'являється бурий або білий колір) або на краях деяких листків спостерігається ефект «ялинки». Ознакою хронічної дії  $\text{SO}_2$  є хлороз, або знебарвлення листя із зміною їх кольору до червоно-бурого; у хвойних рослин - почервоніння голок зверху вниз. Рослини страждають за наявності концентрації  $\text{SO}_2$  в повітрі 0,05-0,50 % при дії протягом 8 годин.



1. Люцерна (*Medicago sativa* cv. Du Purts)
2. Гречка (*Fagopyrum esculentum* )
3. Подорожник великий (*Plantago major* )
4. Горох (*Pisum sativum* )
5. Конюшина інкарнатна (*Trifolium incarnatum* )
6. Попелиця (*Aphis sambuci* )
7. Личинки синьої мухи червоноголової (*Calliphora erythrocephala*)



1. Некрози і хлорози між жилками листків
2. Порушення енергетичного балансу, зменшення АТФ, збільшення АМФ Зниження активності ферменту малатдегідрогенази
3. Збільшення смертності личинок

**Фториди** перебувають у атмосфері у вигляді газу, твердої домішки або газоподібного фториду, адсорбованого іншою твердою речовиною. *Фтористий водень (HF)* у вигляді газу токсичний, ніж у твердому стані. Він присутній у викидах стаціонарних джерел забруднення - плавильних заводів і заводів, які використовують алюміній. Рослинність поблизу джерел викидів страждає найбільше. Хронічна дія HF викликає у рослин хлороз уздовж прожилок листя, гостра дія HF – некроз країв листя, який починається з верхньої частини листка і поширюється до його основи, внаслідок чого листя може деформуватися або скручуватися. Однодольною рослиною, яку використовують як індикатор є гладіолус. У них колір листя змінюється від білого до бурого, починаючи з верхівки листка до основи. Чітка темно-бура смуга відокремлює мертву тканину рослини від живої. У хвойних рослин з'являються голки з «обпаленими» краями або «обпалені» повністю. Особливістю фториду є його здатність накопичуватись в листі, особливо на краях і верхівках. Для оцінки ступеня ушкодження рослин HF застосовують аналіз тканини листка.





1. Гладіолус (*Gladiolus gandavensis* cv., Snow Princess, Flowersong),
2. Тюльпан (*Tulipa gesneriana* cv. Blue Parrot, Preludium),
3. Касатик (*Iris germanica*)
4. Петрушка курчава (*Petroselinum crispum* var *vulgare*)
5. Бджола медоносна (*Apis mellifera*)



1. Некрози верхівок і країв листків
2. Накопичення фтору в сухій речовині
3. Захворювання і загибель



**Аміак ( $\text{NH}_3$ )** надходить в атмосферу в результаті аварій на виробництві. Він особливо вражає рослини поблизу місця аварії. Як і у разі дії  $\text{NO}_x$  рослини ушкоджуються тільки за високої концентрації амоніаку. Найчутливішим до дії  $\text{NH}_3$  є листя середнього віку, яке може змінити колір із тьмяно-зеленого до бурого або чорного. Дія низьких концентрацій  $\text{NH}_3$  зумовлює появу на нижній стороні листка глянцевої або сріблястості





**Бор (В)** - речовина сірувато-чорного кольору. Її дія на рослини, які ростуть поблизу джерел викидів, зумовлює некроз на краях листя та між жилками, а також плямистість. Листя набуває чашоподібної форми, деформується, особливо старе. Гострі ушкодження можливі на відстані до 200 м від джерела. **Найбільш чутливими до дії бору є горіх сірий, клен, шовковиця, дикий виноград, а стійкі - в'яз, бузок, груша і більшість трав'янистої рослинності.**



**Хлор (Cl)** застосовують як окиснювач. У зоні розливу хлору, внаслідок аварій при транспортуванні, рослини особливо ушкоджуються. На краях листка з'являються плями від темно-зеленого до чорного кольору, які потім знебарвлюються до білого або стають бурими. Ознаки ушкодження листя між жилками подібні до ознак спричинених дією  $SO_2$ . Можлива також поява цяточок, що нагадує результат впливу озону. У хвойних, як і при дії озону, може виникати некроз кінчиків голок і плямистість. Чутливі до дії хлору гірчиця і соняшник





1. Личинки синьої мухи червоноголової (*Calliphora erythrocephala*)
2. Шпинат (*Spinacia oleracea*) Квасоля (*Phaseolus vulgaris*)
3. Салат (*Lactuca sativa*)



1. Підвищена смертність личинок
2. Збліднення листя
3. Деформація хлоропластів



**Етилен ( $C_2H_4$ )** – природний рослинний гормон, який утворюється при ушкодженні рослин різними забруднювачами повітря. Він позначається на процесах цвітіння, дозрівання плодів, старіння та опадання. Етилен також присутній у вихлопних газах автотранспорту і є забруднюючою речовиною. До ознак ушкоджень рослин етиленом належать погіршення їх росту, передчасне старіння та опадання листя, погіршення цвітіння, передчасне розкриття бруньок, повільне розпускання листків, їх скручування



1. Петунія (*Petunia nectaginiflora* cv. White Joy)
2. Салат (*Lactuca sativa*), Томат (*Lycopersicon esculentum*)



1. Відмирання квіткових бруньок, дрібні квітки
2. Закручування країв листя, підвищення піроксідазної активності



**Пропилен** ( $C_3H_6$ ) – ненасичений ациклічний вуглеводень, безбарвний газ. Вплив пропилену на рослину подібний до дії етилену, але його спричиняють вищі концентрації. Пропилен пригнічує цвітіння у хризантем, уповільнює вертикальний ріст, але стимулює появу листя. Рослини, уражені пропиленом, мають менше за розміром, але товстіше листя.





**Хлористий водень (HCl, безколірний димучий в повітрі газ з різким запахом) та соляна кислота (розчин хлористого водню у воді, безбарвна "паруюча" в повітрі рідина) надходять в атмосферу з локальних джерел. Типовою реакцією на дію хлористого водню є міжжилковий та краєвий хлороз, після чого настає некроз, який проявляється в зміні кольору від жовтого, бурого, червоного до чорного. Межі некротичних ділянок можуть бути від білого до кремового кольору. Ознаками ушкодження рослин аерозолем соляної кислоти вважають появу цяточок від червоно-коричневого до чорного кольору, а соляною кислотою - листкову плямистість, причому плями облямовуються смугою білого або кремового кольору.**



**Тверді частинки (пил) та важкі метали.** Вони проникають крізь листя або пошкоджені клітини епідермісу. Дрібні частинки можуть осідати на листках, знижуючи світло-поглинання і відповідно фотосинтез, негативно впливати на запилення квітки, розміри і стан листя. Важкі метали з атмосфери, осідаючи на рослину або земну поверхню, мають тенденцію накопичуватися, особливо у верхніх шарах ґрунту, звідки можуть потрапити у рослину. Концентрація важких металів у ґрунті залежить від вмісту в ньому глини та органічної речовини



Найпоширенішим металом, що може потрапляти у рослину і ґрунт, є **свинець**. Він накопичується в ґрунті, але чітких доказів відносно того, що він уражає рослину немає. Вміст його в рослинах незначний, приблизно 0,001-0,002% від ваги золи. **Цинк, кадмій, мідь**, у середині літа спричиняють міжжилковий хлороз із наступним почервонінням листя дерев, які ростуть поблизу джерела.

**Ртуть** – єдиний важкий метал, який перебуває в рідкому стані за нормальної температури. Вона вражає майже всі рослини. Особливо чутливою до ртуті є троянда, на листі якої з'являються бурі плями, воно жовкне, а потім опадає. Молоді бутони буріють і опадають.





1. Райграс багатоквітковий (*Lolium multiflorum* cv. Optima) Полевиця повзуча и полевиця тонка (*Agrostis stolonifera*, *A. tenuis*)
2. Миша (*Mus musculus*)
3. Бджола медоносна (*Apis mellifera*)
4. Гірчиця біла (*Sinapis alba*) Листова капуста (*Brassica oleracea* var. *acephala*) Кінський каштан (*Aesculus hippocastanum*) Мохи (*Sphagnum* sp., *Hypnum cupressiforme*, *Pohlia nutans*, *Pleurozium schreberi*)



1. Накопичення в сухій речовині
2. Зміна в співвідношенні Т- і Влімфоцитів, зменшення В-лімфоцитарної реакції
3. Накопичення в меді
4. Накопичення в сухій речовині

За особливостями реакції на вплив забруднювачів рослини поділяють на **рослини-індикатори** й **рослини-монітори**.



**Рослина-індикатор** – рослина, у якої ознаки ушкодження виявляються при впливі фітотоксичної концентрації забруднюючих речовин або їх суміші.

**Рослина-індикатор** є хімічним сенсором, який може виявити в повітрі присутність забруднюючої речовини, але спостереження за нею не дають змоги отримати дані про її кількість





**Лишайники і мохи** відомі як накопичувачі забруднюючих речовин, переважно важких металів, які ці рослини можуть акумулювати в кількостях, що значно перевищують їх концентрацію в навколишньому середовищі. Отже, поява у рослин типової ознаки ушкодження вказує на наявність у повітрі забруднюючої речовини або її суміші.



**Рослина-монітор** — рослина, за ознаками ушкодження на якій можна отримати інформацію про кількість забруднюючих речовин або їх суміші у довкіллі.



**При виборі рослини для використання її в ролі біомонітора необхідно дотримуватися таких умов: ·**

- ❖ наявність у рослини вираженої реакції на вплив забруднюючої речовини, тобто помітних ознак ушкодження, змін швидкості росту, морфологічних змін, порушень цвітіння, змін продуктивності або врожайності
- ❖ відбір рослин, невибагливих до умов вирощування і догляду
- ❖ відбір рослин, які мало піддаються впливу шкідників та хвороб

Отримання усереднених зразків матеріалів рослинного походження (сформованих з 5 - 6 разових проб) є складним завданням, що потребує правильного обрання місця, способу і часу. Рослинні зразки слід збирати на достатньо великій відстані від будівель, доріг і джерел забруднюючих речовин. Досліджувану ділянку умовно розділяють на кілька квадратів, з кожного рівномірно відбирають рослинний матеріал (листя, стебла, кору) в необхідній кількості.

**Метод біоіндикації** базується на адекватному відбитті живим організмом умов середовища, в яких він розвивається і на зміну яких він відповідним чином реагує. Біоіндикацію широко використовують у лісовій типології, фітоценології, а також для визначення забруднення атмосферного повітря за допомогою **лишайників** (ліхеноіндикація), **мохів** (бріоіндикація) та **грибів** (мікоіндикація). Для біоіндикації середовища застосовують і вищі рослини, а також тварин та мікроорганізми

Рослини-індикатори повинні бути чутливими і не досить стійкими до забруднення. Необхідно, щоб у них був достатньо довгий життєвий цикл. Важливо, щоб такі рослини були широко розповсюджені по земній кулі, причому кожен вид повинен бути пристосований до певного місцезростання. Цим вимогам повністю відповідають **лишайники**.

На думку багатьох дослідників **лишайники** – ідеальний об'єкт для контролю забруднення навколишнього середовища і цю властивість необхідно широко використовувати при плануванні екологічного моніторингу. Відомо, що вимірювання фізичних і хімічних параметрів забруднення природного середовища більш трудомістке в порівнянні з методами біоіндикації.



**Лишайники** - це своєрідна група нижчих спорових рослин, слань яких має дуалістичну (двоїсту) природу. До складу вегетативного тіла (слані) лишайників входять автотрофний водоростевий (фікобіонт = ліхенізовані водорості) і гетеротрофний грибний (мікобіонт = ліхенізовані гриби) компоненти. Самостійність лишайників підтверджується ознаками, не притаманними ані для грибів, ані для водоростей у вільноіснуючому стані: особливі морфологічні форми, внутрішня будова слані, особливий тип метаболізму, специфіка біохімічного складу, способи розмноження, особливості екології та інші.





Слань лишайників може бути забарвлена у сірий, білий, рожевий, жовтогарячий, червоний, оливковий, коричневий, чорний кольори. Під дією  $SO_2$  слань лишайників змінює колір. Крім того, спостерігається деструкція, і організм врешті-решт відмирає. За зовнішньою (морфологічною) будовою слані лишайники поділяють на три основні групи: **накипні лишайники, листуваті, кущисті.**

Слань **накипних лишайників** має вигляд тонкої, гладкої або зернистої, горбуватої, порошистої корочки, яка щільно зростається з субстратом (грунтом, камінням, корою дерев). Відокремити таку слань без пошкодження неможливо. Зразки таких лишайників збирають разом зі шматочками субстрату. Досить часто присутність такої слані проявляється лише плямистим забарвленням субстрату



Слань **листуватих лишайників** має вигляд дрібних лусочок або частіше розеткоподібних пластинок, горизонтально розпростертих на субстраті; краї пластинок часто розсічені на лопасті різного розміру і форми. Звичайно така слань прикріплюється до субстрату численними пучками грибних гіф (ризиками) і досить легко відокремлюється від субстрату без значного пошкодження.



Слань **кущистих лишайників** має вигляд тонких ниток або більш товстих розгалужених циліндричних стебелець, що формують кущик; іноді слань може мати вигляд розгалужених, досить м'яких, сплюснених або жолобчасто згорнутих стрічок. Слань таких лишайників прикріплюється до субстрату лише в одному місці своєю основою за допомогою особливої ніжки (гомфа) і росте вертикально до гори від субстрату, вбік від нього або звисає донизу.

евернія (дубовий мох)



рамаліна



кладонія



бородач



В екологічному відношенні лишайники можуть заселяти різноманітні субстрати, в тому числі і **штучного походження**: скло, шкіру, гуму, тканини, шифер, цеглу, залізо. При цьому основною умовою заселення є тривала нерухомість субстрату, що обумовлено дуже повільним ростом лишайників від 1мм (накипні) до 3 см (кущисті) на рік. В природних умовах лишайники характеризуються вибірково по відношенню до субстрату і утворюють наступні **основні екологічні групи**:

- ✓ епіліти - на поверхні гірських порід
- ✓ епігеї - на ґрунті
- ✓ епіфіти - на корі дерев і чагарників
- ✓ епідіксилів - на гниючій деревині
- ✓ епіфілів - на хвої і листах вічнозелених рослин
- ✓ епібріофілів - на дернинках мохів.



У практичній діяльності людини лишайники використовуються для визначення віку субстратів, що заселяють (метод ліхенометрії) та як індикатори стану атмосферного повітря (метод ліхеноіндикації)



**Метод ліхенометрії** заснований на тому, що в межах певної кліматичної області річний приріст слані лишайників є постійним; за розміром слані можна визначити як вік самої слані, так і субстрату, на якому вона розвивається. **Метод ліхеноіндикації** заснований на особливостях водного живлення лишайників: процес поглинання вологи сланню лишайника з повітря є пасивним; при цьому волога доступна у будь-якому вигляді - снігу, дощу, роси, туману і поглинається сланню починаючи від 50% вологості повітря. Зрозуміло, що при пасивному поглинанні вологи до слані потрапляють усі забруднюючі речовини, які містяться в атмосферному повітрі

**ЛІХЕНОІНДИКАЦІЯ** (від грец. λειχήν – лишай, лишайник і лат. indicō – вказую, визначаю) – розділ екології, присвячений оцінюванню стану довкілля за допомогою лишайників. Серед ліхеноіндикаційних показників найінформативнішими є картування поширення лишайникових угруповань, розрахунок синтетичних показників – індексів (чистоти повітря, полеотолерантності тощо), а також картування поширення індикаторних видів.



**По відношенню до забруднення повітря лишайники поділяють на три категорії:**

- ❖ найбільш чутливі, які зникають при перших симптомах забруднення;
- ❖ середньочутливі, які приходять на зміну загиблим чутливим видам, з якими вони не могла конкурувати на умовах чистого повітря;
- ❖ найбільш витривалі, толерантні до забруднення.



Уперше зникнення лишайників задокументував А. Ньюландер 1866 у Парижі. Це дало йому підстави назвати їх гігієнометрами. В Україні зміни лишайникового покриву зареєстрував Г. Шпек 1870 в околицях Харкова.

У 1920-х рр. Р. Сернандер уперше виділив ліхеноіндикаційні зони в місті, зокрема так звану зону пустелі, зону боротьби та зону слабого впливу.

1968 у Великій Британії створено біоіндикаційну шкалу, за якою на основі даних про лишайник. угруповання можна визначити рівні забруднення повітря  $SO_2$  (від 30 до 170 мг/м<sup>3</sup>).

У 1960-і рр. запропоновано декілька індексів. **Індекс чистоти повітря (ІЧП)** – синтетич. показник, який розраховують на основі вивчення угруповань епіфітних лишайників (зростають на корі дерев) у населених пунктах та індустріальних регіонах для порівняльного оцінювання стану атмосферного повітря. Його розробили канад. дослідники **Де Слугер та Ле Блан** 1967.



Для встановлення сучасного рівня забруднення атмосфери цих територій розраховували індекс чистоти повітря Шле Блана та Де Слувера (І.Ч.П. або І.А.Р. – від англ. «index of air purity») за формулою :

$$\text{І.Ч.П.} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \cdot f_i}{10} \quad (1)$$

де  $n$  – кількість видів лишайників на досліджуваній ділянці,  $Q_i$  – екологічний індекс певного  $i$ -того виду (або індекс асоційованості чи токсикофобності), а  $f_i$  – комбінований показник покриття-трапляння (проективне покриття  $i$ -того виду в балах).

**Показник Qi** – середня кількість видів лишайників, виявлених поряд з таким видом на всіх досліджених ділянках у гомогенній за ступенем забруднення території. Чим більший цей показник, тим більше токсикофобний такий вид.

**Комбінований показник покриття-трапляння (fi) 10-бальний, визначався за шкалою:**

- 1 – проєктивне покриття 1–3%;
- 2 – проєктивне покриття 3–5%;
- 3 – проєктивне покриття 6–10%;
- 4 – проєктивне покриття 11–20%;
- 5 – проєктивне покриття 21–30%;
- 6 – проєктивне покриття 31–40%;
- 7 – проєктивне покриття 41–50%;
- 8 – проєктивне покриття 51–60%;
- 9 – проєктивне покриття 61–80%;
- 10 – проєктивне покриття 81–100%.

Таким чином, чим більше проєктивне покриття лишайників і чим більше видів мешкає на цій ділянці місцевості, тим вищий показник І.Ч.П. і, відповідно, тим чистіше повітря місця перебування. На основі розрахованих індексів (І.Ч.П.) було виділено ізотоксичні ліхеноіндикаційні зони: 0–0,9 – лишайникова пустеля; 1–4,9 – сильно забруднена зона; 5,0–9,9 – середньо забруднена зона; 10,0–14,9 – слабо забруднена зона; 15 та більше – не забруднена зона.

Одним з напрямів дослідження ступеня забруднення атмосфери є **бріоіндикація**, тобто застосування мохоподібних у якості біоіндикаторів.



Найчастіше використовується методика бріоіндикації, *описана Л. Ю. Прудніковою* – як найбільш ефективний метод діагностики стану міського середовища за допомогою мохів, що широко застосовується за кордоном. В умовах великих міст, він має ряд кращих можливостей, порівняно з традиційним методом ліхеноіндикації. Мохи є не менш цінними тест-об'єктами, ніж лишайники. Порівняно з останніми вони мають такі позитивні риси:

- в умовах сильного забруднення
- лишайники будуть досить пригніченими і зустрічатимуться зрідка, а ряд мохів-урбанофілів гарно почувують себе в таких умовах.
- робота з мохами ґрунтується на простішій методиці, що не потребує досить високої кваліфікації і дозволяє використання мінімального часу на мікроскопічні дослідження
- бріофлора міста відображає урбанізацію як комплексне явище



**Флуктуюча асиметрія** – незначні ненаправлені відхилення (розходження) між правою й лівою (R-L) сторонами різних морфологічних структур від строгої білатеральної симетрії. З різних форм асиметрії білатеральних ознак живих організмів особливо виділяється флуктуюча асиметрія (ФА), що дозволяє оцінити нестабільність розвитку цілого організму або його частини.



При **флуктуючій асиметрії** розходження між сторонами не є строго генетично детермінованими. Такі розходження, зазвичай, є результатом помилок в ході розвитку організму. **Флуктуюча асиметрія** (на відміну від інших типів асиметрії) не має самостійного адаптивного значення, а є вираженням незначних ненаправлених порушень симетрії, які перебувають у межах певного люфту. Це допускається природним доббором і не впливає на життєздатність. Значні розходження між сторонами можуть мати місце в природі лише в тому випадку, якщо вони носять пристосувальний характер. При нормальних умовах їхній рівень мінімальний, а зростає тільки при будь-якому стресовому впливі, що і призводить до збільшення асиметрії.

Біомоніторинг і біоіндикація стану повітряного  
середовища <https://kegt.rshu.edu.ua/images/dustan/INDL6.pdf>