

## Лекція 5

### Біоіндикація на різних рівнях організації живої матерії

#### План

Клітинний і субклітинний рівні.

Організмний рівень.

Біоіндикація забруднень наземних екосистем. Ссавці-біоіндикатори.

Морські екосистеми.

Біоіндикація на рівні біосфери.

Біоіндикація може здійснюватися на всіх рівнях організації живого: біологічних макромолекул, клітин, тканин і органів, організмів, популяцій (просторова угруповання особин одного виду), спільнот, екосистем і біосфери в цілому.

На нижчих рівнях біоіндикації можливі прямі і специфічні форми біоіндикації, на вищих - лише непрямі і неспецифічні. Однак саме останні дають комплексну оцінку впливу антропогенних впливів на природу в цілому.

#### Клітинний і субклітинний рівні

Біоіндикація на цих рівнях заснована на вузьких межах протікання біотичних і фізіологічних реакцій. Її переваги полягають у високій чутливості до порушень, що дозволяє дуже швидко виявити навіть незначні концентрації поллютантів. Саме на цих рівнях можливо найбільш раннє виявлення порушень середовища. До числа недоліків відноситься те, що біоіндикатори-клітини і молекули вимагають складної апаратури. Результати дії поллютантів наступні:

- порушення біомембран (особливо їх проникності);
- зміна концентрації та активності макромолекул (ферменти, білки, амінокислоти, жири, вуглеводи, АТФ);
- акумуляція шкідливих речовин;
- порушення фізіологічних процесів в клітині;
- зміна розмірів клітин.

Щоб розробити той чи інший спосіб біоіндикації на цьому рівні, необхідно з'ясувати механізми дії поллютантів.

#### Вплив поллютантів на біомембрани

Розглянемо вплив поллютантів на біомембрани на прикладі клітин рослин.

Сірчистий газ.  $\text{SO}_2$  проникає в лист через продихи, потрапляє у міжклітинний простір, розчиняється у воді з утворенням  $\text{SO}_3^{2-}/\text{HSO}_3^-$  іонів, що руйнують клітинну мембрану. У результаті знижується буферна ємність цитоплазми клітини, змінюються її кислотність і редокс-потенціал.

Озон та інші окисники, наприклад, пероксиацетилнітрат порушують проникність мембран. Цей ефект посилюється в присутності іонів важких металів.

У всіх випадках особливому впливу піддаються тилакоїдні мембрани хлоропластів. Їх руйнування — основна причина зниження фотосинтезу під впливом поллютантів. Процес фотосинтезу дуже чутливий і служить для біоіндикації забруднення середовища. При цьому оцінюють:

- 1) інтенсивність фотосинтезу,
- 2) флуоресценцію хлорофілу.

Як тест-організм часто використовують мох мніум.

Зміна концентрації та активності макромолекул (ферментів). Дія поллютантів на ферменти порушує процес нормального приєднання ферменту до субстрату (утворення субстрат-ферментного комплексу (С-Ф)). Це може відбуватися трьома різними способами:

1) До ферменту замість субстрату приєднується поллютантами-інгібітор з утворенням комплексу Ф-І (наприклад, отруєння CO);

2) Поллютант інгібує фермент, розщеплюючи його зв'язок з субстратом;

3) Приєднуючись до субстрату разом з ферментом, поллютантами інгібує його активність - утворюється стійкий комплекс С-Ф-І. У підсумку порушуються різні процеси, наприклад, асиміляція вуглекислого газу в процесі фотосинтезу.

SO<sub>2</sub> зв'язується з активним центром ключового ферменту фотосинтезу (рибулозодифосфаткарбоксилази) замість CO<sub>2</sub> і гальмує фіксацію CO<sub>2</sub> в циклі Кальвіна. Газообмін CO<sub>2</sub> гіпотетично є придатним для біоіндикації; взаємодія SO<sub>2</sub> з HS-групами білків, призводить до руйнування ферментів (доведено для малатдегідрогенази). Синтез захисних речовин в клітині.

У клітинах рослин під дією різних порушень накопичуються певні захисні речовини. Біоіндикація пов'язана з **визначенням концентрації цих речовин у рослинах:**

- *Пролін* — амінокислота, яка вважається індикатором стресу. Її концентрація зростала в листях тису поблизу доріг з інтенсивним рухом транспорту, в листі каштана внаслідок засолення ґрунту;

- *Аланін* — амінокислота, накопичувалася в клітинах водорості требоуксії, сосни та кукурудзи при забрудненні;

- *Пероксидаза і супероксиддисмутаза*. Під впливом стресових агентів утворюються токсичні пероксиди, які знешкоджуються пероксидазою. Наприклад, SO<sub>2</sub> викликає збільшення активності пероксидази і поява ізоферментів супероксиддисмутази Ці зміни можна виявити за допомогою гель-електрофорезу.

- *Пігменти*. При забрудненні в клітинах рослин відбуваються такі зміни пігментів: зменшується вміст хлорофілу, який послідовно руйнується (до феофетину, феофорбиду, розпадається пірольне кільце); знижується відношення хлорофіл а/хлорофіл в. Відзначається, що, зокрема, у ялини внаслідок хронічного задимлення SO<sub>2</sub>; сповільнюється флуоресценція хлорофілу. При біоіндикації всі ці зміни фіксують за допомогою приладів: хроматографа, спектрофотометра і флуориметра.

- *Аденозинтрифосфорная кислота*. Значення АТФ — універсального джерела енергії в клітині — важливий показник її життєздатності. Для його кількісної оцінки запропонований показник «енергетичного заряду». АДФ і АМФ — менш насичені енергією молекули аденозиндифосфорної та аденозинмонофосфорної кислот. Показано, що з ростом концентрації SO<sub>2</sub> в повітрі енергетичний заряд клітин рослин (сосна, водорість требоуксія) знижується.

- *Білки*. При забрудненні в клітинах зменшується концентрація розчинних білків.

- *Вуглеводи*. З метою біоіндикації може бути використано спостереження зміни вмісту глюкози і фруктози в листі гороху за дії автомобільних викидів.

- *Ліпіди*. Газові викиди ведуть до зменшення вмісту міристинової, пальмітинової і лауринової кислот та до збільшення лінолевої і ліноленової кислот у складі ліпідів.

### **Акумуляція шкідливих речовин**

Показником забруднення середовища може служити підвищена концентрація поллютантів в клітинах живих організмів. Так, виявлена кореляція між вмістом свинцю в листках тису і інтенсивністю автомобільного руху в містах. Накопичення ртуті в пір'ї птахів дозволило за допомогою опудал простежити динаміку забруднень ртуттю. Виявлено, що з

початку 40-х років XX століття вміст ртуті в пір'ї фазана, куріпок, сапсана та інших збільшилася в 10-20 разів, у порівнянні з 1840—1940 рр.

### **Зміна розмірів клітин.**

Показано, що за газодимового забруднення:

- збільшуються клітини смоляних ходів у хвойних дерев;
- зменшуються клітини епідермісу листя.

### **Порушення фізіологічних процесів в клітині. Плазмоліз.**

У клітинах рослин під дією кислот і  $SO_2$  цитоплазма відшаровується від клітинної стінки.

## **Організмний рівень**

Ще в давнину деякі види рослин використовували для пошуку руд та інших корисних копалин. Пошкодження рослин димом були відзначені в середині XIX століття навколо содових фабрик Англії та Бельгії.

Переваги біоіндикації на цьому рівні — це невеликі витрати праці і відносна дешевизна, оскільки не потрібні спеціальні лабораторії і висока кваліфікація персоналу.

Морфологічні зміни рослин, які використовуються в біоіндикації:

*Зміна кольору листя* (неспецифічна, рідше специфічна, реакція на різні полютантів):

- Хлороз — бліде забарвлення листя між жилками. Виявляється за надлишку в ґрунті важких металів і за газодимового забруднення повітря.
- Пожовтіння ділянок листя. Характерно для листяних дерев при засоленні ґрунту хлоридами.
- Почервоніння, пов'язане з накопиченням антоціану. Виникає під дією сірчистого газу.
- Побуріння або побронзовіння. Часто означає початкову стадію некротичних ушкоджень.
- Листя немов просякнуті водою (як при морозних пошкодженнях). Виникає під дією ряду окислювачів, наприклад, пероксиацетилнітрату.
- Сріблясте забарвлення листя. Виникає під дією озону на листі тютюну.

*Некрози* — відмирання ділянок тканини листка, їх форма іноді специфічна. Міжжилковий некроз — це некроз тканин між бічними жилками 1-го порядку. Часто відзначаються при впливі сірчистого газу. Крайові некрози часто зустрічаються на листі липи під впливом солі (хлориду натрію), якою взимку посипають міські вулиці для танення льоду. «Риб'ячий скелет» — поєднання міжжилкових і крайових некрозів. Верхівкові некрози найчастіше зустрічаються у однодольних покритонасінних і хвойних рослин. Наприклад, хвоїнки ялиці і сосни після дії сірчистого газу стають на вершині бурими, верхівки листя гладіолусів після обкурювання фтористим воднем стають білими..

*Передчасне в'янення.* Під дією етилену в теплицях не розкриваються квітки у гвоздики, в'януть пелюстки орхідей. Сірчистий газ викликає оборотне в'янення листя малини.

*Дефоліація* — опадання листя. Зазвичай спостерігається після некрозів і хлорозів. Наприклад, осипання хвої у ялини і сосни при газодимових забрудненні повітря, листя лип та кінських каштанів — від солі для танення льоду, агрусу та смородини — під дією сірчистого газу.

*Зміни розмірів органів, зазвичай неспецифічні.* Наприклад, хвоя сосни поблизу заводів добрив подовжується від нітратів і коротшає від сірчистого газу. У ягідних кущів дим викликає зменшення розмірів листків.

*Зміни форми, кількості та положення органів.* Аномальну форму листя відзначали після радіоактивного опромінення. В результаті локальних некрозів виникає роздування або

викривлення листя, зрощення або розщеплення окремих органів, збільшення або зменшення частин квітки.

*Зміна життєвої форми рослини.* Кущувата або подушкоподібна форма зростання властива деревам, особливо липі, за сильного стійкого забруднення повітря (HCl, SO<sub>2</sub>).

*Зміна життєвості.* У присутності багатьох поллютантів бонітет дерев знижується від 1-2 класу до 4-5. Зазвичай це супроводжується «іржавінням» крони і зменшенням приросту. Зміни приросту неспецифічні, але широко застосовуються. Вимірюють радіальний приріст стовбурів, приріст у довжину пагонів і листя, коріння, діаметр таллома лишайника.

*Зміна плодючості.* Виявлено у багатьох рослин. Наприклад, за дії поллютантів зменшується утворення плодкових тіл у грибів, знижується продуктивність у чорниці та ялини. Деякі види лишайників не утворюють плодкових тіл в сильно забрудненому повітрі, але здатні розмножуватися вегетативно.

### Біоіндикація забруднень наземних екосистем. Ссавці-біоіндикатори

Зараз для біоіндикації забруднення наземних екосистем запропоновано використовувати ряд ссавців, які значною мірою відповідають вищенаведеним вимогам. Використання природних популяцій ссавців як індикаторів видів є виправданим ще і тому, що в медичній токсикології накопичено чимало даних, які стосуються впливу різних ксенобіотиків на лабораторних і домашніх тварин. Це суттєво спрощує вирішення багатьох методологічних проблем саме на ссавцях.

З-поміж уже визнаних і потенційних індикаторних видів є мешканці ґрунту і підстилки, що його вкриває, травоїдні від гризунів до крупних копитних і, нарешті, хижаки. У табл. 1 згадані деякі з цих видів. З-поміж них можна знайти як консументів вищих порядків, так і масові домінуючі види консументів нижчих порядків із порівняно коротким життєвим циклом і стійкою динамікою чисельності популяцій.

Із комахоїдних великий інтерес становлять кроти. Вони широко поширені на всій території лісної зони, є євритопними, осілими і антисинантропними. Кроти є вищою ланкою трофічного ланцюжка по відношенню до ґрунтової мезофауни.

Таблиця 1. - Ссавці-біоіндикатори забруднення наземних екосистем

| Індикаторний вид   | Середина життя   | Харчова спеціалізація           |
|--|------------------|---------------------------------|
| Крот ( <i>Talpa europaea</i> L. і <i>T. altaica</i> Nikolsky)  | Ґрунт            | Комахоїдні, ґрунтова мезофауна  |
| Землерийка-бурозубка ( <i>Sorex araneus</i> L)   | Лісова підстилка | Комахоїдні, мезофауна підстилки |
| Європейська руда полівка ( <i>Clethrionomus glareolus</i> Schreber)<br>і сибірська червона полівка ( <i>Cl. rutilus</i> Pall.) | Лісова підстилка | Зеленоїдні                      |
| Ондатра ( <i>Ondatra zibethica</i> )   | Прибережна зона  | Зеленоїдні                      |

|  |                     |                                  |
|--|---------------------|----------------------------------|
| Косуля ( <i>Capreolus capreolus</i> )                            | Лісова зона         | Зеленоїдні                       |
| Куниця ( <i>Martes lupus</i> ) і соболь ( <i>M. r. bellina</i> ) | Лісова зона         | Хижаки, лісові гризуни           |
| Лисиця ( <i>Vulpes vulpes</i> )                                  | Лісова зона         | Хижаки, лісові і польові гризуни |
| Песець ( <i>Alopex lagopus</i> )                                 | Тундра і лісотундра | Хижаки, дрібні гризуни           |
| Бурий ведмідь ( <i>Ursus arctos</i> )                            | Лісова зона         | Всеїдний                         |

У підстилці, яка утворена травами, що загинули, і листям, яке опало, живе багато видів комах. Забруднюючі атмосферу компоненти осаджуються насамперед на підстилці. Тому комахи, які харчуються рослинними залишками, і різноманітні зоофаги утворюють харчовий ланцюжок, у якому відбувається швидка біомагніфікація. Вищим хижакам цього компонента екосистем є землерийки роду *Sorex*. Найбільш крупна з них, до того ж із широким ареалом поширення – бурозубка звичайна (*S. Araneus* L.).

З-поміж дрібних гризунів найбільший інтерес як біоіндикатори становлять хом'якоподібні – європейська рижа і сибірська червона полівки, які мають схожі риси екології та охоплюють усю лісову зону Євразії і в цьому сенсі доповнюють один одного, а також широко поширені тварини, які мешкають біля води, – полівка-економка й ондатра. Полівки мають високу і достатньо стійку чисельність, тому використання їх в процесі біоіндикації забезпечує безперервність спостережень.

У більшості європейських країн визнання як біоіндикатор отримала косуля. Очевидно, парним (таким, що доповнює і взаємозамінює) для неї індикаторним видом може слугувати лось, ареал якого останнім часом поширився.

Промислові хижаки, що харчуються дрібними гризунами, – куниця і соболь – є схожими за екологією. Ареал їхнього поширення перебиває всю лісну зону Євразії. Проте для того, щоб використовувати ці види як парні індикатори, необхідно вивчити особливості накопичення ними екоотоксикантів у районах спільного життя.

Об'єктами промислу слугують також лисиця і peseць. Характерною особливістю лисиці є те, що значна частина харчового раціону добувається нею на сільськогосподарських угіддях. Тому вона може слугувати індикатором забруднення полів отрутохімікатами сільськогосподарського призначення (різноманітними пестицидами) і важкими мінералами, що містяться в мінеральних добривах.

### Морські екосистеми

Екоотоксиканти, що потрапляють до морів та океанів, розподіляються в них нерівномірно. Максимально забрудненими виявляються прибережні води, причому у вмісті токсикантів звичайно спостерігаються мозаїчність і зональність. Багато з них переважно локалізуються на межах розділу фаз (вода – повітря, вода – донні відкладення), де відбуваються складні і різноманітні фізико-хімічні і біологічні процеси.

Поверхня розділу "вода – атмосфера" слугує середовищем життя для сукупності організмів, що утворюють нейстон і плейстон. Нейстонні організми живуть біля поверхневої

плівки, тому вони більшою мірою зазнають впливу нафтопродуктів і добре розчинних у них поліхлорованих сполук – пестицидів і поліхлорбіфенілів.

Значна частина забруднюючих компонентів, проходячи крізь товщу води у складі суспензій, осаджуються на дно. Тому вміст багатьох токсикантів у придонних і порових водах, а також у донних відкладах є набагато більшим, ніж у водній товщі. Заховані в донних відкладах органічні речовини і сполуки важких металів можуть знову потрапити до води. Таке "вторинне" забруднення зумовлено скаламучуванням осадків донними організмами (молюски, ракоподібні, деякі риби), але особливо інтенсивно воно відбувається при хвильовому і повітряному впливі, а також у процесі апвелінгу.

Унаслідок накопичення екоотоксикантів у придонних водах і осадках найбільш уразливими виявляються малорухомі або прикріплені бентосні організми, які живуть у прибережних зонах. Сидячий спосіб життя і локалізація на невеликих глибинах сприяє використанню їх як біоіндикаторів.

Як індикаторні організми перевірялося широке коло видів водоростей, тварин і мікроорганізмів. Зараз визнається, що для з'ясування рівня забрудненості морських екосистем важкими металами найбільше підходять бурі водорості-макрофіти і молюски.

Бурі водорості (*Phaeophyta*) – фукуси, ламінарії, цитозіри, саргаси – накопичують важкі метали в менших кількостях, ніж це характерно для багатьох видів морських зелених і червоних водоростей-макрофітів і фітопланктону. Проте, на відміну від останніх, поглинання бурими водоростями іонів металів лінійно пов'язане з їхніми концентраціями в навколишньому середовищі. Окрім того, вони більш міцно утримують метали в своїх тканинах.

Здатність накопичувати значні кількості токсичних металів і при цьому виживати пов'язують з високим вмістом специфічних для відділу *Phaeophyta* полісахаридів – полімерів *L*-гулууронової і *D*-мануронової кислот, що називаються альгіновими кислотами. Їхні солі, альгінати, містяться переважно в клітинних стінках сланей, складаючи до 40 % маси сухих водоростей. Альгінові кислоти характеризуються високою спорідненістю із двовалентними іонами. Зв'язування ними іонів важких металів з утворенням нерозчинних альгінатів відбувається за механізмом іонного обміну. Тому виділені з бурих водоростей альгінати застосовують для виведення радіоактивного стронцію з організмів людини і домашніх тварин.

Очевидно, альгінові кислоти виконують не тільки структурні функції (подібно лігніну і целюлозі наземних рослин): ці полісахариди перешкоджають проникненню до клітин водоростей іонів токсичних важких металів. Міцність альгінатів, що утворюються, визначає виключно великий період напіввиведення зв'язаних металів. В експериментах з ізотопами заліза  $^{59}\text{Fe}$  було з'ясовано, що час напіввиведення його для фуксової водорості *Fucus vesiculosus* складає близько 180 діб.

Найбільшу увагу як біоіндикатори привертають бурі водорості порядку *Fucales*, які утворюють три родини: фукусові (*Fucaceae*), саргасові (*Sargassaceae*) і цистозейрові (*Cystoseiraceae*). Це, зокрема, пояснюється їхнім широким поширенням – вони ростуть по всіх морях, окрім Каспійського й Аральського, причому самі стають об'єктом промислу (для отримання альгінатів, виробництва кормової муки і добрива). Деякі види фукусового добрива живляють у їжу.

У прибережних холодних морях західної і східної півкуль широко поширені фукуси (*Fucus vesiculosus*, *F. evanescens*), костарії (*Costaria costata*) і сцитосифон (*Scytosiphon lomentaria*). У більш теплих водах їм на зміну приходять саргаси (*Sargassum pallidum*, *S. mijabei*, *S. tosaene*), пельвеція (*Pelvetia wrightii*) і представники інших родів порядку *Fucales*.

Про рівні біоконцентрації іонів важких металів бурими водоростями можна зробити висновок за даними, які отримані в різних районах Приморського краю. Вміст металів (мкг/г сухої маси) коливається в них у межах:

Залізо 22-258

Цинк 20-915

Марганець 2-175

Свинець 0,5-23

Мідь 1-9

Кадмій 0,4-8

Найбільші концентрації, як і варто було очікувати, були зареєстровані у водоростей, що ростуть біля гирла рік, які виносять значні кількості теригенного матеріалу й антропогенних домішок. Аналогічна картина спостерігалася і при дослідженні хімічного складу бурих водоростей біля узбережжя Англії, Ірландії, Норвегії.

|           |        |         |        |
|-----------|--------|---------|--------|
| Залізо    | 22-258 | Цинк    | 20-915 |
| Марганець | 2-175  | Свинець | 0,5-23 |
| Мідь      | 1-9    | Кадмій  | 0,4-8  |

Граничні значення концентрацій у водоростях Атлантики були набагато вищими і сягали (мкг/г сухої маси):

|           |      |         |      |
|-----------|------|---------|------|
| Залізо    | 2400 | Цинк    | 3700 |
| Марганець | 250  | Свинець | 136  |
| Мідь      | 300  | Кадмій  | 31   |

Характерним є те, що підвищення вмісту цинку реєструвалося у водоростях із районів, які перебували під сильним антропогенним пресом. Очевидно, цей показник може слугувати своєрідним індикатором освоєння морського узбережжя людиною.

Поруч із водоростями в біоіндикації забруднення морських екосистем важкими металами використовуються двостулкові (*Bivalvia*) і черевоногі (*Gastropoda*) молюски. Ці безхребетні тварини широко розповсюджені в прибережних водах усіх морів і звичайно утворюють великі популяції. Багато двостулкових молюсків (мідії, устриці, гребінці) вживаються в їжу. Крупні двостулкові молюски щодобово пропускають крізь мантийну порожнину багато десятків і сотень літрів води, що містить суспендовані часточки. Їхня здатність накопичувати токсиканти з неорганічних суспензій і, таким чином, характеризувати повне забруднення розглядається як перевага перед біоіндикаторами-водоростями. Проте метали набагато швидше виводяться з організмів цих тварин (г/2~ 2 тижні), тобто можливість отримання з їхньою допомогою усереднених за часом показників забрудненості є обмеженою.

Дуже великі кількості свинцю, цинку і кадмію, що відповідно сягають 3100, 2370 і 140 мкг/г сухої маси, були виявлені в їстівних мідіях (*M. edulis*) із Хардагенфіорда (Норвегія). Деякі двостулкові молюски відрізняються унікальною здатністю накопичувати кадмій. Наприклад, у пектинах (*Pecten maximus*) з протоки Ла-Манш середній вміст Cd у розрахунку

на суху масу склав 32,5 мкг/г, а в – *Pecten novae-zelandiae* із затоки Тасман (Нова Зеландія) він перебуває в межах 210-300 мкг/г.

Так само, як і у випадку з водоростями, у молюсків існує особливий механізм зв'язування іонів важких металів, який забезпечує високу пластичність і дає їм можливість вижити в умовах як природних геохімічних аномалій, так і сильного антропогенного забруднення вод цими токсинами. У цитоплазмі молюсків із забруднених вод виявлені великі кількості водорозчинних низькомолекулярних білків-металтіонеїнів, які мають значну спорідненість з іонами металів. Молекулярні маси цих білків коливаються від 6 до 12 тис. При цьому вміст у них цистеїну сягає 30-35 %. Встановлено, що металтіонеїни з молекулярними масами до 25 тис. Д. а. синтезуються і в організмах хребетних тварин у відповідь на введення іонів кадмію, цинку, міді і ртуті.

У морських безхребетних у зв'язуванні, а отже, і в детоксикації деяких важких металів беруть участь не тільки металтіонеїни. У тканинах зябер, мантиї і травної залози мідії *M. galloprovincialis* були виявлені білки, які зв'язують мідь і мають відносно невисокий вміст цистеїну. Навіть у мідій, що не зазнали впливу іонів  $\text{Cu}^{2+}$ , були виявлені такі білки. Очевидно, вони здійснюють не тільки захисну функцію по відношенню до цитотоксичного впливу цього металу, але також грають важливу роль в основному метаболізмі життєво необхідної міді.

Водорості-макрофіти і молюски можуть також використовуватися як біоіндикатори забруднення морських екосистем органічними поліхлорованими сполуками. Дані про накопичення цих еко-токсикантів у гідробіонтах отримані для багатьох районів Світового океану, у тому числі для східної частини Балтійського моря. У воді центральної частини Фінської затоки (бухта Колга) найбільші концентрації поліхлорованих біфенілів і суми ДЦТ (ДЦТ + ДДД + ДДЕ) у середині 1980-х рр. складали 6,9 і 0,13 нг/л відповідно. У водоростях *Fucus vesiculosus* (у розрахунку на сирю біомасу) середні концентрації ПХБ дорівнювали 9,4 мкг/г ( $\text{Bcf} = 2170$ ), а суми ДДТ – 6 мкг/г ( $\text{Bcf} = 46150$ ).

Вміст ПХБ і ДДТ у мідії їстівній із різних районів Балтійського моря в ці роки коливався від 33 до 109 і від 26 до 94 мкг/г сиріої маси відповідно. Ще більшим він був у тканинах молюска-мулоїда *Macoma baltica*: 78-174 мкг/г ПХБ і 40-110 мкг/г ДДТ. І у водоростях, і в молюсках основні кількості цих ліпофільних екоотоксикантів містилися в жирових тканинах.

### Біоіндикація на рівні біосфери

Деякі приклади індикаторів глобальних змін середовища: «повзуча евтрофікація». Присутність в морській воді стічних вод все частіше індукують червоні та бурі припливи. Вони виникають через спалахи чисельності одноклітинних водоростей: токсичних дінофлагелят (червоні) і діатомових водоростей (бурі);

**Глобальне потепління клімату.** Звичайним явищем стає «червоний сніг». З'являється в горах при підвищеній інсоляції завдяки зростанню чисельності одноклітинних водоростей (в основному гемококів).

**Фонове забруднення середовища.** Навіть на заповідних територіях за останні 40 років знизилася різноманітність і чисельність тварин. Регулярне та повсюдне застосування пестицидів призвело до зниження чисельності ґрунтових членистоногих на полях за останні 30 років в кілька разів.