

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра екології

С. С. Душкін

КУРС ЛЕКЦІЙ

**«МОНІТОРИНГ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА
ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ»**

(Частина 2)

Харків
ХНАДУ
2026

УДК 504.064.2/.3

ББК

Душкін С.С. Курс лекцій з дисципліни «Моніторинг, моделювання та прогнозування стану довкілля», частина 2 / Душкін Станіслав Сергійович: Курс лекцій. Харків: ХНАДУ, 2026. – 156 с.

Курс лекцій розроблено відповідно вимог освітньо-професійної програми «Екологія та охорона навколишнього середовища» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю Е2 Екологія під навчальне аудиторне навантаження 32 години (16 лекцій).

Зміст лекцій відповідає робочій програмі навчальної дисципліни ОК 21 «Моніторинг, моделювання та прогнозування стану довкілля» 2026 р.

Мова навчання – державна

Душкін С.С., 2026

ХНАДУ, 2026

ЗМІСТ

ЛК. 1. Моніторинг як система оцінювання і прогнозування стану довкілля. Вибір та затвердження об'єкта дослідження.....	4
ЛК. 2, 3. Моніторинг фізичних факторів. Контроль шуму, вібрації, теплового, електромагнітного та радіаційного забруднення.....	15
ЛК. 4, 5. Спеціалізований моніторинг. Моніторинг відходів, промислових об'єктів та об'єктів підвищеної екологічної небезпеки (ОПЕН).....	24
ЛК. 6. Інтегрований моніторинг довкілля. Принципи інтеграції, моделі DERR, розрахунок та застосування інтегральних індексів.....	41
ЛК. 7. Екологічний аудит та системи управління (ISO 14001). Основи, етапи, вимоги до екологічної звітності.....	50
ЛК. 8, 9. Екологічна паспортизація територій та підприємств. Роль паспортизації у системі моніторингу та контролю.....	62
ЛК. 10, 11. Екологічне прогнозування та моделювання: принципи, класифікація, етапи, математичні основи моделювання.....	92
ЛК. 12. Моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. (Модель Гаусса, програмні комплекси, оцінка ризиків).....	109
ЛК. 13. Моделювання процесів у гідросфері. (Моделі Стреттера-Фелпса, моделювання розведення та самоочищення водних об'єктів)...	120
ЛК. 14. Моделювання процесів у літосфері. (Моделювання міграції забруднюючих речовин у ґрунтах та ґрунтових водах).....	129
ЛК. 15. Моделювання екологічних ризиків. Методологія, сценарне прогнозування, оцінка економічних збитків.....	138
ЛК. 16. Системи інформаційного забезпечення моніторингу (EIM): зберігання, обробка та візуалізація даних. Big Data та AI в екології.....	146

Лекція 1

МОНІТОРИНГ ЯК СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ. ВИБІР ТА ЗАТВЕРДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

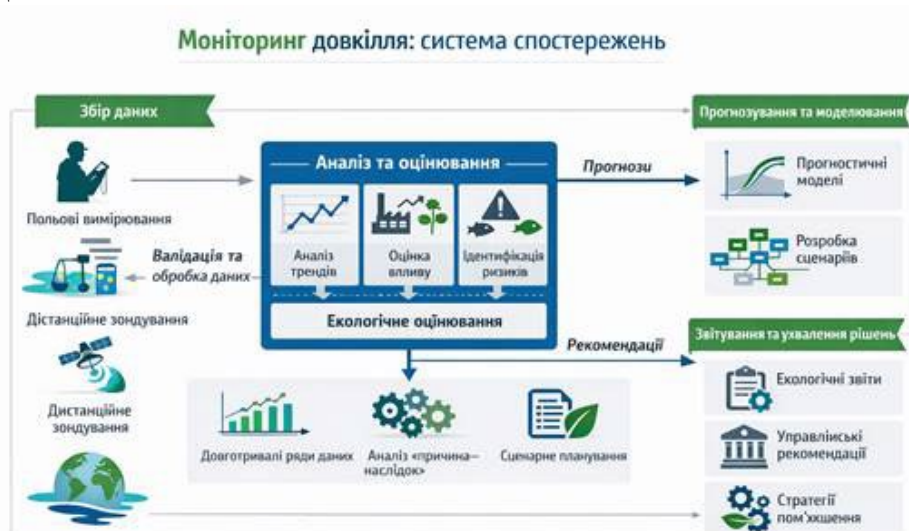
Мета лекції: сформувати розуміння сутності моніторингу довкілля як системи оцінювання і прогнозування та надати методологічні принципи вибору і затвердження об'єкта дослідження в екологічному моніторингу.

План лекції:

1. Поняття моніторингу довкілля як системи спостережень, оцінювання і прогнозування
2. Структурні рівні та компоненти системи моніторингу
3. Критерії вибору об'єкта моніторингового дослідження
4. Процедура затвердження об'єкта, формування паспорта моніторингового дослідження
5. Просторові, часові та інформаційні межі об'єкта

1. Поняття моніторингу довкілля як системи спостережень, оцінювання і прогнозування

Моніторинг довкілля сформувався як відповідь науки на потребу розуміти не лише статичний стан природного середовища, а й механізми його змін у часі під впливом природних та антропогенних чинників. Він визначається як впорядкована система регулярних спостережень, що охоплює відбір даних, їхню перевірку, накопичення, аналітичне опрацювання та подальше прогнозування екологічних процесів. Така система дозволяє розглядати довкілля як динамічну модель, у якій зміни параметрів є сигналами трансформацій, деградацій або відновлювальних процесів. Моніторинг не обмежується фіксацією показників, він забезпечує їхню інтерпретацію на основі причинно-наслідкових зв'язків, а також побудову обґрунтованих прогнозів для коротко-, середньо- та довгострокових сценаріїв розвитку стану середовища.



На відміну від одноразових досліджень, моніторинг має циклічний характер і передбачає постійне повернення до об'єкта спостережень, що створює можливість порівнювати результати між різними часовими зрізами та виявляти тренди. Університетська екологічна школа розглядає моніторинг як інструмент, який одночасно працює на трьох ключових рівнях: вимірювання поточних змін, оцінювання їхньої екологічної значущості та прогнозування майбутніх станів системи. Він може охоплювати як природні компоненти (повітря, воду, ґрунт), так і живі системи (організми, популяції, угруповання), або інтегровані об'єкти (території, ландшафти, екосистеми). Дані, отримані в межах моніторингової системи, проходять етапи стандартизації та перевірки, оскільки лише валідована та методологічно узгоджена інформація може бути використана для коректних екологічних висновків та прогнозних моделей.

Моніторинг також тісно пов'язаний із поняттям екологічного контролю, але не тотожний йому. Контроль відповідає на запитання, чи перевищено допустимі межі параметрів, тоді як моніторинг пояснює, чому ці межі змінюються, які фактори це спричиняють і якою є ймовірна траєкторія подальших змін. Прогностична складова моніторингу базується на аналізі довготривалих рядів даних, застосуванні моделей екологічної динаміки, геоінформаційних систем та статистичних методів, які дозволяють визначати залежності, сценарні коридори змін і критичні точки переходу системи у нестабільні стани. Тому моніторинг докілья є не лише системою спостережень, а й системою доказового оцінювання і науково обґрунтованого передбачення, що робить його базовою складовою сучасної екологічної освіти та прикладних природоохоронних рішень.

Для чіткого розмежування цих функцій нижче наведена таблиця, в якій порівнюються ключові аспекти обох видів діяльності.

Таблиця: Концептуальні розбіжності між екологічним контролем та моніторингом

Характеристика	Екологічний контроль (Eco-control)	Екологічний моніторинг (Eco-monitoring)
Основна мета	Перевірка відповідності встановленим нормам та лімітам (ГДК, ГДВ).	Вивчення стану системи, виявлення причин змін та тенденцій.
Ключове питання	«Чи є порушення закону/норми зараз?»	«Чому відбуваються зміни і що буде далі?»
Характер даних	Дискретний (фіксація моменту порушення).	Безперервний або тривалий (динамічні ряди даних).
Спрямованість у часі	Теперішній час (реакція на факт).	Минуле, теперішнє та майбутнє (прогноз).
Методологія	Інспектування, вимірювання викидів, юридична оцінка.	Спостереження, математичне моделювання, ГІС-аналіз.
Результат	Штрафи, приписи, санкції, зупинка діяльності.	Наукові звіти, карти прогнозів, стратегії управління.
Суб'єкт дії	Переважно державні органи (інспекції).	Наукові інститути, спеціалізовані станції, аналітичні центри.

Важливо розуміти, що у сучасній екологічній освіті контроль – це юридичний інструмент, а моніторинг – інформаційний фундамент. Без даних моніторингу контроль був би «сліпим», оскільки він не знав би, які саме параметри є критичними для конкретної екосистеми в довгостроковій перспективі. Він дозволяє визначити варіанти розвитку подій залежно від антропогенного навантаження, що є основою для прийняття стратегічних рішень.

2. Структурні рівні та компоненти системи моніторингу

Сучасна система моніторингу докільця функціонує як багаторівнева ієрархія, де кожен щабель виконує специфічні завдання, але водночас тісно пов'язаний з іншими рівнями через постійний обмін даними, методологічну узгодженість і спільні об'єкти спостереження. Такий принцип організації забезпечує повноту аналізу, достовірність оцінювання стану природних систем та можливість прогнозувати зміни, що важливо для прийняття рішень у сфері екологічної безпеки, управління природними ресурсами та міжнародної звітності.

Компоненти моніторингу є наскрізними для всіх рівнів системи, але відрізняються методами, деталізацією та формою представлення результатів. Атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунтове середовище та біологічні системи є основними блоками спостереження, оскільки саме вони найшвидше реагують на антропогенний вплив і формують інтегральний портрет стану докільця. Атмосферний моніторинг оцінює газовий і пиловий склад, хімічні домішки та опади. Моніторинг вод охоплює поверхневі, підземні та морські води, включаючи аналіз їхніх фізичних, хімічних і біологічних параметрів. Дослідження ґрунтів передбачає оцінку токсичного навантаження, структури, ерозійних процесів та накопичення забруднювальних речовин. Біологічний моніторинг аналізує стан живих організмів, їхню чутливість, видове різноманіття та здатність акумулювати токсиканти, що дозволяє оцінити не моментальний, а накопичений ефект впливу.

Взаємозв'язок між рівнями та компонентами моніторингу проявляється у тому, що кожен рівень працює з однаковими екологічними підсистемами, але виконує різну функцію (Рис. 1): локальний збирає, регіональний аналізує, національний стандартизує й моделює, глобальний інтегрує та формує фонові прогнози. Цей процес відображає замкнений цикл інформації, де дані не тільки передаються знизу вгору, а й повертаються у вигляді нормативів, методик, прогнозних моделей та рекомендацій для уточнення наступних вимірювань і корекції спостережень.

Структурні рівні моніторингу

Найвищим щаблем є глобальний рівень, який орієнтований на оцінювання процесів, що охоплюють біосферу планети. На цьому рівні працюють міжнародні моніторингові програми, супутникові системи спостереження, а також міждержавні наукові платформи. Тут формується розуміння фонових тенденцій, зокрема змін клімату, стану озонового шару,

динаміки Світового океану та глобальних біогеохімічних циклів. Дані глобального моніторингу задають орієнтири для національних систем, визначають міжнародні стандарти вимірювань і порівняльні бази для аналізу.



Рис. 1. Рівні та компоненти системи моніторингу довкілля

Наступним є національний рівень, що функціонує в межах держави та координується центральними органами влади або спеціалізованими науковими інституціями. Основним завданням цього рівня є стандартизація методів, створення єдиних баз даних, контроль екологічної безпеки на рівні країни та стратегічне прогнозування. Національна система моніторингу отримує агреговану інформацію від регіонів, порівнює її з глобальними

трендами, а також формує управлінські рекомендації, державні доповіді та довгострокові прогнози стану довкілля.

Регіональний рівень охоплює окремі адміністративні або природні зони, включаючи області, промислові агломерації, водозбірні басейни, гірські або степові екосистеми. Тут здійснюється систематизація даних, отриманих з локальних пунктів спостереження, аналізується взаємодія різних джерел впливу, виявляються регіональні тенденції, формуються карти забруднення та короткострокові прогнози. Цей рівень є ключовим для розуміння екосистемної реакції на комплексні фактори забруднення, оскільки враховує взаємозв'язок між компонентами довкілля в межах конкретної території.

Найближчим до джерел впливу є локальний рівень, де здійснюється первинний збір даних. Об'єктами спостереження тут виступають підприємства, стічні води, атмосферні викиди окремих цехів, санітарні або захисні зони, міські зелені насадження, водні об'єкти та ґрунти поблизу точкових джерел забруднення. Локальний моніторинг працює як система контролю, що фіксує стан компонентів довкілля, визначає концентрації забруднювачів, оцінює токсичність середовища, а також передає дані на регіональний рівень для подальшої інтеграції.

Компоненти системи моніторингу

Система екологічного моніторингу аналізує чотири базові компоненти: атмосферу, гідросферу, педосферу та біоту. Особливістю є те, що ці компоненти є спільними об'єктами спостереження на всіх рівнях ієрархії, але масштаб аналізу змінюється залежно від рівня. Атмосферний моніторинг включає контроль хімічного складу повітря, аналіз опадів, пилового навантаження, газових домішок та транскордонного перенесення забруднювачів. Гідросфера аналізується через спостереження за поверхневими, підземними та морськими водами, визначення фізичних, хімічних і біологічних параметрів, динаміки течій, каламутності, евтрофікації та токсичного впливу на водні організми. Педосфера, як ґрунтовий компонент, оцінюється через вміст пестицидів, важких металів, органічних токсикантів, а також через аналіз деградаційних процесів, таких як ерозія, засолення або опустелювання. Біота виступає основним об'єктом біологічного моніторингу, оскільки дозволяє оцінити інтегральну реакцію живих систем на стан середовища. Тут використовуються біоіндикатори, аналізується видове різноманіття, поведінкові реакції організмів, біоаккумуляція токсичних речовин у тканинах, а також проводяться дослідження стану екосистем і опосередковано здоров'я населення через екологічні фактори впливу.

3. Критерії вибору об'єкта моніторингового дослідження

Вибір об'єкта моніторингу є ключовим етапом проектування всієї системи спостережень, оскільки саме від цього рішення залежить релевантність отриманих даних, ефективність їхньої подальшої обробки та можливість застосування результатів для прогнозування і управління. Об'єктом моніторингового дослідження може бути природна екосистема,

окремий компонент середовища, територія з підвищеним антропогенним навантаженням або джерело впливу, для якого необхідно відстежити як прямі, так і опосередковані ефекти на довкілля. Критерії вибору об'єкта формуються на основі наукової обґрунтованості, вимог законодавчого регулювання, потенційних екологічних ризиків, доступності методів вимірювання, можливості регулярного збору даних та значущості об'єкта для регіональної або державної системи моніторингу (Рис. 2).



Рис. 2. Критерії вибору об'єкта моніторингового дослідження

Першим критерієм є екологічна чутливість, яка визначає, наскільки швидко об'єкт реагує на зміни середовища або забруднювальні фактори. Чутливі екосистеми, такі як заболочені території, заплави річок або зони біорізноманіття, мають вищий пріоритет, оскільки навіть незначні відхилення можуть спричинити каскадні порушення природних процесів. Другим

важливим критерієм є інтенсивність антропогенного впливу, що включає наявність промислових підприємств, транспортних вузлів, зон видобутку корисних копалин, агровиробництва або місць накопичення відходів. Об'єкти з множинними джерелами впливу потребують моніторингу для оцінювання сумарного ефекту та просторового розподілу навантаження.

Третім критерієм є репрезентативність, яка дозволяє об'єкту бути модельним для ширшої території або типу екосистем. Якщо результати, отримані на об'єкті, можуть бути масштабовані для регіону чи використані для порівняльного аналізу, такий об'єкт вважається стратегічно цінним. Наступний критерій – доступність і вимірюваність, що означає можливість технічно та методично проводити регулярні спостереження, відбирати проби або застосовувати біологічні, фізико-хімічні чи дистанційні методи оцінювання. Об'єкт має бути придатним для повторюваних вимірювань без значних логістичних або фінансових бар'єрів.

П'ятим критерієм є ризик для здоров'я та безпеки, який враховує, чи може стан об'єкта прямо або опосередковано впливати на населення, джерела питного водопостачання, продовольчу безпеку або якість повітря в житлових зонах. Такі об'єкти мають пріоритет у локальних і регіональних програмах. Окрему групу критеріїв формує нормативна значущість, що передбачає обов'язковість моніторингу для об'єктів, які регулюються державними екологічними стандартами, директивами або міжнародними угодами, що імплементовані в національну систему.

Фінальний критерій – прогностична цінність, яка визначає, чи здатні дані, отримані на об'єкті, бути використані для моделювання трендів, сценарного прогнозування або оцінювання довгострокових змін. Наприклад, моніторинг лісових масивів дозволяє прогнозувати зміни депонування вуглецю, а спостереження за прісноводними системами – оцінювати ризики евтрофікації або зміни якості води в майбутньому. Усі критерії не застосовуються ізольовано, вони комбінуються для формування рейтингу пріоритетності, що забезпечує об'єктивний та системний підхід до вибору об'єкта.

4. Процедура затвердження об'єкта, формування паспорта моніторингового дослідження

Процедура затвердження об'єкта моніторингового дослідження в академічній практиці має чітку послідовність і ґрунтується на принципах системності, об'єктивності, відтворюваності та нормативної відповідності (Рис. 3). Після того, як об'єкт визначено за встановленими критеріями, розпочинається етап його офіційного узгодження в межах програми моніторингу, що передбачає документальне оформлення, встановлення меж спостережень, вибір методичного інструментарію та фіксацію базових параметрів для подальшого порівняльного аналізу. Уся процедура складається з аналітичної та організаційної частин, які не розділяються, а формують єдиний цикл підготовки дослідження до впровадження.



Рис. 3. Узгодження об'єкта моніторингового дослідження

Першим кроком є обґрунтування вибору об'єкта, яке формується у вигляді аналітичної довідки або пояснювальної записки. У ній зазначаються причини включення об'єкта до системи моніторингу, наявні екологічні ризики, потенційні джерела впливу, очікувана наукова та практична цінність даних, а також можливість регулярного отримання вимірювань. Другий крок включає визначення рівня моніторингу, на якому об'єкт буде досліджуватись: глобальному, національному, регіональному або локальному. Це важливо для розуміння, які саме дані і з якою деталізацією необхідно збирати, куди вони передаватимуться, та які структури відповідатимуть за їхню аналітику.

Третім кроком є погодження методів і формату спостережень, де визначаються індикатори, параметри вимірювань, частота збору даних, підходи до біоіндикації або біотестування (якщо об'єктом є біота), способи відбору проб та засоби фіксації результатів. Після цього відбувається офіційне затвердження об'єкта відповідальним структурним підрозділом, що в університетському середовищі може бути кафедра, наукова лабораторія або міждисциплінарна робоча група, яка координує моніторингові дослідження. На цьому етапі об'єкт включається до реєстру або переліку точок спостереження.

П'ятий крок – це формування паспорту моніторингового дослідження, який є базовим документом, що стандартизує всі подальші етапи роботи. Паспорт містить назву об'єкта, географічні координати або територіальний опис, тип середовища (повітря, вода, ґрунт, біота або їхня комбінація), рівень моніторингу, перелік показників для спостереження, методи збору даних, часові межі спостережень, відповідальних виконавців та формат підсумкової звітності. Він також включає базовий стан об'єкта (фон або стартові значення), які стають точкою відліку для аналізу динаміки змін.

Останнім етапом є побудова інформаційної моделі руху даних, щоб забезпечити зворотний зв'язок між рівнями моніторингу. Локальні спостереження передаються на регіональний рівень для агрегації, регіональні висновки надходять до національної системи для стандартизації та моделювання, а національні тренди можуть інтегруватись у глобальні бази. Водночас методики, нормативи та прогнозні моделі спускаються згори до виконавців для корекції й уточнення спостережень, що робить моніторинг не лінійним, а циклічним процесом.

5. Просторові, часові та інформаційні межі об'єкта

Встановлення меж об'єкта моніторингового дослідження є необхідною умовою для коректного проектування системи спостережень і подальшої інтерпретації даних (Рис. 4). Межі не обмежують дослідження, а формують його каркас, який забезпечує порівнюваність результатів у часі та просторі, дозволяє уникати розмивання вибірки даних і створює можливість для чіткого визначення відповідальних за збір, передачу та аналіз інформації. У практиці екологічного моніторингу ці межі поділяють на три взаємопов'язані групи: просторові, часові та інформаційні, кожна з яких має власну логіку встановлення, але функціонує лише у комплексі з іншими.

Просторові межі визначають територіальний або об'ємний масштаб об'єкта. Якщо об'єктом є природна екосистема, межі можуть проходити по ландшафтних рубежах, вододілах, заплавах або межах природних зон. Якщо моніторинг спрямований на техногенний об'єкт, межі визначаються санітарно-захисною зоною підприємства, точкою скиду, ділянкою виробничого майданчика або зоною потенційного розсіювання забруднювачів. Просторове визначення меж включає як горизонтальну площину, так і вертикальне охоплення середовища, наприклад шар атмосфери, глибину водного об'єкта або ґрунтовий профіль, що підлягає контролю. Саме просторові межі формують розуміння того, де дані є репрезентативними, а де потребують додаткової деталізації або розширення спостережень.

Часові межі задають інтервал спостереження і частоту збору даних. Моніторинг може бути безперервним, сезонним, річним або багаторічним, залежно від динаміки змін об'єкта. Сезонні дослідження важливі для об'єктів, стан яких суттєво залежить від температури, опадів, вегетаційних циклів або гідрологічного режиму. Багаторічні спостереження необхідні для оцінки довгострокових трендів, накопичувальних ефектів забруднення, змін

біорізноманіття або кліматично обумовлених трансформацій. Встановлення часових меж також включає визначення стартової точки відліку, тобто базового фоновому стану об'єкта, від якого буде вимірюватись динаміка відхилень. Без фіксації часових меж неможливо коректно моделювати тренди або будувати прогнозні сценарії, оскільки порівняння даних поза визначеним часовим каркасом призводить до статистичних викривлень.



Рис. 4. Узгодження меж об'єкта моніторингового дослідження

Інформаційні межі окреслюють перелік показників і параметрів, що будуть включені в систему аналізу. Це можуть бути фізичні, хімічні, біологічні або інтегральні індекси стану середовища, які обираються залежно від типу об'єкта, рівня моніторингу та поставлених задач. Інформаційні межі визначають не лише, які саме дані збираються, а й у якій формі вони передаються, як кодуються, агрегуються, верифікуються і зберігаються. Важливою частиною інформаційних меж є також вибір базових джерел даних, форматів вимірювальних журналів, способів аналітичної обробки, моделей інтеграції та правил передачі інформації між рівнями системи. Ці межі

гарантують, що моніторинг буде стандартизованим, відтворюваним і придатним для подальшого використання у наукових, аналітичних або управлінських цілях.

Взаємозв'язок між трьома типами меж полягає у тому, що просторові межі відповідають на запитання де, часові коли, а інформаційні що саме вимірюємо і як передаємо. Разом вони формують єдину систему координат дослідження, яка закладається в паспорт моніторингового проєкту і стає базою для побудови стійкого циклу спостережень, аналізу і прогнозування. Моніторинг без визначених меж перетворюється на фрагментарний збір даних без можливості інтеграції та системного аналізу, що неприпустимо в академічному й професійному середовищі.

Контрольні питання

1. Як визначається поняття моніторингу довкілля і чому воно включає не лише спостереження, а й оцінювання та прогнозування?
2. Які основні функції виконує система моніторингу довкілля у прийнятті управлінських рішень?
3. Чим відрізняються між собою рівні моніторингу і чому компоненти моніторингу вважаються наскрізними для всіх рівнів системи?
4. Які критерії використовують для вибору об'єкта моніторингового дослідження і чому жоден із них не може бути єдиним визначальним?
5. Як критерії екологічної чутливості та інтенсивності антропогенного впливу впливають на пріоритетність вибору об'єкта?
6. Що означає репрезентативність об'єкта у моніторингу і як вона впливає на можливість масштабування результатів?
7. Які основні елементи має містити паспорт моніторингового дослідження?
8. Як відбувається рух даних у системі моніторингу між локальним, регіональним, національним і глобальним рівнями?
9. У чому полягає циклічність моніторингу довкілля і як реалізується зворотний інформаційний зв'язок?
10. Що визначають просторові межі об'єкта моніторингу і які підходи застосовуються для їхнього встановлення?
11. Чому важливо фіксувати стартову точку відліку при встановленні часових меж спостереження?
12. Які завдання виконують інформаційні межі моніторингового дослідження?
13. Як три типи меж (просторові, часові, інформаційні) разом формують систему координат моніторингового проєкту?
14. Які обмеження виникають, якщо об'єкт моніторингу обрано без належного обґрунтування та встановлення меж?
15. Які перспективні напрямки розвитку систем моніторингу є найбільш актуальними для сучасної екологічної науки та практики?

Лекція 2, 3

МОНІТОРИНГ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ. КОНТРОЛЬ ШУМУ, ВІБРАЦІЇ, ТЕПЛОВОГО, ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ТА РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Мета лекції: сформувати у майбутніх екологів систему знань про природу фізичних забруднювачів, методи їх інструментального вимірювання та нормативного регулювання, а також навчити оцінювати кумулятивний вплив акустичного, електромагнітного та термального навантаження на здоров'я населення та стан екосистем у межах міського середовища.

План лекції

1. Акустичне забруднення: Моніторинг шуму та інфразвуку.
2. Вібраційний вплив: Джерела та методи контролю.
3. Електромагнітне випромінювання (ЕМВ): Від ліній електропередач до 5G.
4. Теплове (термальне) забруднення: Вплив на мікроклімат міст та екосистеми водойм.
5. Радіаційний моніторинг: Принципи контролю природного та техногенного фону.

У межах загальної системи державного моніторингу довкілля особливе місце посідає моніторинг фізичних факторів впливу. На відміну від хімічного забруднення, моніторинг фізичних факторів концентрується на вимірюванні рівнів енергії (хвильової, коливальної або теплової), що надходить у середовище від техногенних джерел. Особливістю цих факторів є їхня здатність діяти на організм людини та біоту миттєво або накопичувати негативні фізіологічні ефекти без видимих змін у хімічному складі повітря чи води. Сучасний еколог розглядає фізичне навантаження як сукупність полів та випромінювань, що формують специфічний «фізичний смог» урбанізованих територій.

Для забезпечення екологічної безпеки та розробки заходів захисту, моніторинг фізичних факторів організовується за принципом інструментального контролю кожного окремого виду впливу на живі та неживі об'єкти.

1. Акустичне забруднення: Моніторинг шуму та інфразвуку

Шум – це сукупність звуків різної частоти та інтенсивності, які виникають у результаті коливальних рухів частинок пружного середовища (повітря). Для еколога шум – це не просто звук, а забруднювач, який не накопичується в середовищі, але має кумулятивний ефект впливу на здоров'я.

Основні фізичні характеристики Для проведення моніторингу ми оперуємо такими показниками:

– Рівень звукового тиску (L): вимірюється в децибелах (дБ). Це логарифмічна величина, тому подвоєння джерел шуму додає лише 3 дБ, а не збільшує шум удвічі.

– Частота (f): вимірюється в герцах (Гц). Людське вухо сприймає діапазон 20 Гц – 20 кГц.

– Інфразвук (< 20 Гц): нечутний, але вкрай небезпечний, бо входить у резонанс із внутрішніми органами людини.

Джерела шуму в містах. Моніторинг поділяє джерела на:

– Мобільні: транспорт (70-80% всього шумового навантаження міст).

– Стаціонарні: промислові підприємства, будівництво, системи вентиляції та кондиціонування.

Методи та прилади моніторингу. Вимірювання проводяться за допомогою шумомірів.

– Корекція за шкалою «А»: оскільки людське вухо неоднаково сприймає різні частоти, прилади використовують фільтр «А». Результати записуються як дБА.

– Точки моніторингу: вимірювання проводяться на висоті 1.2–1.5 м від поверхні землі. Якщо ми оцінюємо вплив на житлову забудову — на відстані 2 м від фасаду будівлі.

Нормування (ГДК для шуму). В Україні діють санітарні норми, які обмежують допустимі рівні:

– Території житлової забудови: 55 дБА (день), 45 дБА (ніч).

– Навчальні класи / лікарні: 35–40 дБА.

Заходи контролю та захисту. Якщо моніторинг фіксує перевищення норм, еколог пропонує:

– Архітектурно-планувальні заходи: зонування територій, створення захисних екранів.

– Технічні: встановлення глушників, звукоізоляція джерел.

– Біологічні: створення смуг зелених насаджень (дерева з густою кроною можуть знизити шум на 5-10 дБ).

Моніторинг шуму в Україні сьогодні трансформується з радянської системи «боротьби зі сміттям» у європейську систему управління шумовим ландшафтом.

Контроль здійснюється на основі таких документів:

– Закон України [«Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення»](#) (ст. 24): зобов'язує органи влади та підприємства вживати заходів щодо недопущення перевищення рівнів шуму.

– [Наказ МОЗ України № 463](#) (від 22.02.2019): «Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будівель і на території житлової забудови». Саме тут прописані ті самі 55 дБ дня та 45 дБ ночі.

– [ДСТУ ISO 1996-1:2006](#): Акустика. Опис, вимірювання та оцінювання шуму в навколишньому середовищі.

– [ДСТУ ISO 9612:2008](#). Акустика. Настанови щодо вимірювання та оцінювання експозиції шуму у виробничому середовищі.

В межах Угоди про асоціацію Україна імплементує Директиву [2002/49/ЄС](#) (Environmental Noise Directive – END).

2. Вібраційний вплив: Джерела та методи контролю.

Вібрація в системі моніторингу довкілля розглядається як динамічний фактор, що має механічну природу. На відміну від шуму, вібрація має здатність до структурного поширення – вона передається через фундаменти та ґрунти на великі відстані, викликаючи вторинні акустичні ефекти (гул стін).

2.1. Джерела вібраційного навантаження

У сучасному моніторингу джерела класифікують за походженням та характером впливу:

Транспортні джерела (зовнішні):

– Рейковий транспорт: Метрополітен мілкового закладання (основне джерело в мегаполісах), важкі залізничні состави, трамваї.

– Автотранспорт: Важковагові вантажівки (особливо при наявності нерівностей на дорожньому покритті).

Техногенно-будівельні:

– Робота пальових молотів та віброзанурювачів.

– Рух важкої гусеничної техніки.

Виробничо-інженерні (внутрішні): насосні агрегати, системи вентиляції, ліфтові лебідки, промислові преси.

2.2. Параметри, що підлягають контролю

Згідно з [ДСН 3.3.6.039-99](#) та [ISO 2631](#), контроль здійснюється за наступними фізичними величинами:

– Віброприскорення (w , м/с²) - параметр для оцінки біологічного впливу.

– Віброшвидкість (v , мм/с) - параметр для оцінки ризику руйнування будівель.

– Логарифмічні рівні (L_v , L_w) - вимірюються в децибелах (дБ) щодо опорного значення (аналогічно шуму).

– Частотний спектр (Гц): Контроль проводиться в октавних смугах (від 1 до 80 Гц).

2.3. Методи та прилади контролю

Моніторинг вібрації – це складний інженерний процес, що вимагає специфічного обладнання:

Прямі інструментальні вимірювання

Використовуються віброметри та аналізатори спектра.

– Датчик (Акселерометр): Кріпиться до поверхні за допомогою магніту, різьбового з'єднання або спеціальної важкої платформи.

– Трьохкоординатний метод: Вимірювання проводяться одночасно по трьох осях: вертикальній (Z) та двох горизонтальних (X, Y).

Метод розрахункового моніторингу

Використовується на етапі екологічної експертизи проектів будівництва. Еколог розраховує загасання вібрації в ґрунті від джерела до житлової забудови за формулою:

$$v(r) = v_0 \cdot \sqrt{\frac{r_0}{r}} \cdot e^{-\alpha(r-r_0)}$$

де a – коефіцієнт поглинання ґрунту.

В. Автоматизований стаціонарний моніторинг

Встановлюється на історичних пам'ятках або об'єктах атомної енергетики для безперервного спостереження за динамікою коливань.

2.4. Нормативне регулювання (Україна та ЄС)

1. Національний стандарт: ДСТУ ISO 2631-1:2004 (Механічна вібрація та удар. Оцінювання впливу загальної вібрації на людину) – повністю гармонізований з міжнародними нормами.

2. Європейська практика: [Директива 2002/44/ЄС](#) – впроваджує термін «Daily Exposure Action Value» (рівень, що вимагає негайних дій). Для загальної вібрації це 1.15 м/с².

3. Містобудівний контроль: [ДБН В.1.1-31:2013](#) (Захист від шуму та вібрації). Містить методики розрахунку відстаней СЗЗ від залізниць та метрополітену.

Головна мета моніторингу вібрації – попередити виникнення резонансу. Для людини найбільш небезпечними є частоти 4–8 Гц (резонанс черевної порожнини та серця) та 20–30 Гц (резонанс голови).

3. Електромагнітне випромінювання (ЕМВ): від ліній електропередач до 5G.

Електромагнітне забруднення – це зміна електромагнітних властивостей середовища внаслідок роботи технічних систем. В екологічному моніторингу ми розглядаємо переважно антропогенні некогерентні випромінювання.

3.1. Основні джерела та діапазони моніторингу

Класифікуємо джерела за частотою та потужністю:

– Низькочастотні (НЧ, 50 Гц): Високовольтні лінії електропередач (ЛЕП), трансформаторні підстанції, кабельні лінії.

– Радіочастотні (РЧ, від 30 кГц до 300 ГГц): Радіо- та телевізійні передавачі, радіолокаційні станції (РЛС).

– Мікрохвильові (НВЧ - *надвисокочастотне випромінювання*): Системи стільникового зв'язку (2G, 3G, 4G, 5G), Wi-Fi роутери, супутникові системи.

3.2. Нормативно-правова база та європейські стандарти

Україна має одні з найсуворіших (найжорсткіших) норм у світі щодо захисту населення від ЕМВ, хоча останнім часом вони гармонізуються з європейськими.

[Наказ МОЗ України № 239](#) (від 01.08.1996): «Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань». Це базовий документ для еколога. *Цікавий факт:* До 2017 року норма для

діапазону стільникового зв'язку була 2.5 мкВт/см^2 , зараз становить 100 мкВт/см^2 , що наближає нас до стандартів ЄС.

[Директива 2013/35/EU](#): Про мінімальні вимоги щодо охорони здоров'я та безпеки працівників від ризиків, пов'язаних з електромагнітними полями.

3.3. Методи та об'єкти контролю

Моніторинг проводиться двома шляхами:

– Розрахунковий метод: Створення «санітарних паспортів» об'єктів (наприклад, базових станцій). Еколог розраховує межі санітарно-захисної зони (СЗЗ) та зони обмеження забудови (ЗОЗ).

– Інструментальний метод: Вимірювання реальних рівнів за допомогою вимірювачів напруженості поля.

Ключові показники:

– Напруженість електричного поля (Е, В/м): Контролюється переважно для ЛЕП.

– Густина потоку енергії (ГПЕ, мкВт/см^2 або Вт/м^2): Основний показник для високочастотних джерел (мобільний зв'язок).

3.4. Виклик 5G: Особливості моніторингу

Впровадження 5G ставить перед моніторингом довкілля нові завдання:

– Висока щільність: 5G використовує велику кількість «малих сот» (Small Cells), що потребує більш густої мережі точок заміру.

– Міліметрові хвилі: Вони мають низьку проникну здатність, але високу концентрацію енергії на поверхні шкіри та очей.

– Beamforming (спрямований промінь): На відміну від 4G, антени 5G направляють енергію безпосередньо на користувача. Це вимагає моніторингу динамічного навантаження, а не постійного фону.

3.5. Заходи захисту та профілактики

За результатами моніторингу еколог може запропонувати:

– Екранування: Використання спеціальних сіток, металізованих фарб або скла.

– Дистанціювання: Дотримання розриву між ЛЕП та житловою забудовою (для ЛЕП 750 кВ це 40 метрів від крайнього проводу).

– Рациональне розміщення: Встановлення антен на високих опорах та спрямування їхнього випромінювання вище дахів будинків.

Питання для обговорення: Як ви вважаєте, чи виправдане пом'якшення українських норм інтенсивності ЕМВ до європейського рівня (100 мкВт/см^2 замість 2.5 мкВт/см^2)?

4. Теплове (термальне) забруднення: Вплив на мікроклімат міст та екосистеми водойм.

Теплове забруднення – це вид фізичного забруднення, що полягає у підвищенні температури середовища вище природного рівня внаслідок викидів відпрацьованого тепла.

4.1. Ефект «Міського острова тепла» (Urban Heat Island – UHI)

У мегаполісах температура повітря може бути на 5–10 °С вищою, ніж у прилеглий сільській місцевості.

Джерела та причини:

– Заміна природного ландшафту: Асфальт і бетон мають високу теплоємність і низьке альbedo (здатність відбивати світло). Вони накопичують сонячну енергію вдень і віддають її вночі.

– Техногенне тепло: Викиди від ДВЗ автомобілів, промислових підприємств та систем кондиціонування (кондиціонер охолоджує кімнату, але викидає тепло на вулицю).

– Відсутність вегетації: Брак дерев зменшує ефект евапотранспірації (природного охолодження через випаровування вологи листям).

Моніторинг УНІ проводиться на наступних рівнях:

– Приземний (поверхневий): Вимірювання температури поверхонь (дах, асфальт). Використовуються інфрачервоні термометри та тепловізори.

– Атмосферний: Вимірювання температури повітря на висоті 1.5–2 м. Використовуються метеостанції та мобільні датчики-логгери.

– Дистанційний (ДЗЗ): Побудова теплових карт на основі супутникових знімків (спектральні канали Thermal Infrared).

Моніторинг та заходи з протидії УНІ в Україні регулюються в межах політики сталого розвитку та кліматичної адаптації:

– Закон України «Про основні засади державної екологічної політики України на період до 2030 року»: Передбачає впровадження заходів з адаптації до змін клімату в містах. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>

– [Постанова Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 № 827](#) «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» – затверджує Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря та встановлює вимоги до організації спостережень, у тому числі до збору метеорологічних даних у населених пунктах.

– [Директива 2008/50/ЕС](#) про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи: Хоча вона зосереджена на хімічних забруднювачах, тепловий режим враховується як фактор, що впливає на розсіювання домішок.

– [ISO 37120:2018](#) (Sustainable cities and communities): Міжнародний стандарт, що містить показники (індикатори) сталості міст, включаючи моніторинг кліматичних параметрів.

4.2. Теплове забруднення гідросфери

Це зміна термічного режиму водойм внаслідок скидання нагрітих стічних вод.

Основні джерела:

– АЕС та ТЕС: Використовують величезну кількість води для охолодження конденсаторів турбін.

– Промислові підприємства: Металургійні та хімічні заводи.

Наслідки для екосистем:

– Дефіцит кисню: Зі збільшенням температури розчинність кисню у воді різко падає.

– «Цвітіння» води: Тепло стимулює бурхливий ріст синьо-зелених водоростей, що призводить до евтрофікації.

– Термічний шок: Різка зміна температури викликає загибель ікри та молоді риб.

4.3. Методи моніторингу та контролю

Моніторинг теплового забруднення проводиться за допомогою:

– Дистанційного зондування Землі (ДЗЗ): Використання супутників з інфрачервоними датчиками (наприклад, супутники Landsat) для побудови теплових карт міст.

– Контактної термометрії: Автоматичні датчики-логгери у місцях скидання стічних вод.

4.4. Нормативна база та Європейські директиви

[Водний кодекс України](#): Регламентує температуру води у контрольних створах (не повинна підвищуватися більше ніж на 3 °С порівняно з природною).

[Директива 2006/44/ЕС](#) (щодо якості прісних вод для підтримки життя риб): Встановлює чіткі термічні межі для вод "лососевого" та "коропового" типів.

5. Радіаційний моніторинг: Принципи контролю природного та техногенного фону

Для України цей розділ є особливим з огляду на досвід Чорнобильської катастрофи та сучасні ризики навколо ЗАЕС.

5.1. Показники радіаційного стану

Еколог-дозиметрист оперує такими величинами:

– Потужність еквівалентної дози (ПЕД): Вимірюється в мікрозівртах на годину ($\mu\text{Sv/h}$). Природний фон в Україні зазвичай становить 0.1–0.2 $\mu\text{Sv/h}$.

– Питома активність: Вимірюється в Беккерелях на кілограм/літр (Bq/kg). Контролюється в продуктах харчування та воді.

5.2. Система моніторингу в Україні

Україна має одну з найпотужніших систем радіаційного моніторингу в Європі (державні АСКРО та Держгідромет та агрегатор громадського та державного моніторингу SaveEcoBot):

– [АСКРО](#) (Автоматизована система контролю радіаційного стану): складається з мережі датчиків у 30-кілометрових зонах спостереження навколо кожної АЕС (Запорізької, Рівненської, Хмельницької, Південноукраїнської) та на майданчику ЧАЕС. Система забезпечує безперервне вимірювання потужності еквівалентної дози (ПЕД) та передачу даних кожні 1-10 хвилин до кризових центрів ДП «Енергоатом» та ДАЗВ.

– [Гідрометеорологічна служба](#): здійснює щоденний моніторинг на понад 150 метеостанціях по всій країні. Крім вимірювання ПЕД, служба проводить

відбір проб атмосферних випадінь та аерозолів для детального спектрометричного аналізу в лабораторних умовах.

– [SaveEcoBot](#) – найбільший в Україні екологічний чат-бот та карта, що інтегрує дані з декількох джерел:

– Державні дані: Транслює показники з постів АСКРО та Гідрометцентру.

– Міжнародні мережі: Відображає дані європейських систем (наприклад, [EURDEP](#)).

– Громадські датчики: Збирає дані з приватних станцій моніторингу (наприклад, мережа [EcoCity](#)), обладнаних трубками Гейгера-Мюллера.

– Функція сповіщення: Дозволяє користувачам підписатися на миттєві push-повідомлення у разі різкого стрибка радіаційного фону в конкретному регіоні.

5.3. Основні нормативні документи

– [НРБУ-97](#) (Норми радіаційної безпеки України): Фундаментальний документ, що визначає ліміти доз для населення (1 мЗв/рік) та персоналу.

– Закон України «[Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання](#)».

5.4. Радон – невидима загроза

Радон-222 – це природний радіоактивний газ без кольору та запаху, що утворюється в результаті розпаду урану в земній корі. У закритих приміщеннях його концентрація може перевищувати норму в десятки разів, що є другою після куріння причиною раку легень у світі за даними ВООЗ.

Нормативна база та ГДК

Моніторинг радону в Україні регулюється наступними документами:

– [НРБУ-97](#) (Норми радіаційної безпеки України): Встановлюють рівні дій для середньорічної еквівалентної рівноважної об'ємної активності (ЕРОА) радону-222.

Закон України «[Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання](#)»: Стаття 15 прямо зобов'язує проводити моніторинг радону в повітрі житлових та громадських будівель.

Методи моніторингу

Екологічний контроль радону здійснюється за допомогою:

– Інтегральний метод: Використання трекових детекторів, які встановлюються у приміщенні на тривалий термін (від 1 до 3 місяців), що дозволяє оцінити середньорічну дозу.

– Миттєвий метод: Використання радіометрів радону (наприклад, прилади серії Alphanix або Radon Scout) для швидкої оцінки концентрації в даний момент.

Міжнародні рекомендації та Євроінтеграція

Україна впроваджує європейські підходи згідно з Директивою [2013/59/Euratom](#), яка встановлює базові стандарти безпеки для захисту від небезпек, що виникають внаслідок іонізуючого випромінювання ([WHO Handbook on Indoor Radon](#)).

План заходів щодо зниження рівня опромінення населення радоном: [Затверджений розпорядженням КМУ](#), передбачає обов'язковий радіаційний контроль у школах та дитячих садках.

Таким чином моніторинг радону є критично важливим для регіонів України з виходом гранітних порід на поверхню (наприклад, Кіровоградська та Житомирська області). Основним методом мінімізації ризику за результатами моніторингу є радонозахисна вентиляція та герметизація фундаментів.

Контрольні питання

1. Яка фізична природа звуку та за якою формулою (або шкалою) вимірюється рівень звукового тиску в екологічному моніторингу?
2. Поясніть фізичний зміст фільтрації за шкалою «А» (дБА). Чому ми не використовуємо лінійні одиниці (Паскалі) для нормування шуму?
3. Які граничні рівні шуму встановлені Наказом МОЗ №463 для житлової забудови у денний та нічний час?
4. У чому полягає основна вимога Директиви 2002/49/ЄС щодо управління шумом у великих містах (понад 100 тис. населення)?
5. Чим відрізняється поняття «звукоізоляція» від «звукопоглинання» при проектуванні захисних заходів?
6. Назвіть основні параметри, що підлягають контролю при моніторингу вібраційного впливу на житлові будинки згідно з ДСН 3.3.6.039-99.
7. Які частотні діапазони є найбільш небезпечними для організму людини при впливі загальної вібрації (явище резонансу)?
8. Які існують методи моніторингу вібрації від ліній метрополітену мілкого закладання?
9. Охарактеризуйте поняття «електромагнітний смог». Які джерела створюють основне навантаження у НВЧ-діапазоні?
10. Як змінилися нормативи гранично допустимого рівня ЕМВ в Україні у процесі гармонізації із законодавством ЄС (Наказ МОЗ №239)?
11. Поясніть сутність ефекту «Міського острова тепла» (УНІ). Які антропогенні фактори найбільше впливають на його формування?
12. Які екологічні наслідки має теплове забруднення водойм-охолоджувачів ТЕС та АЕС для гідробіонтів?
13. Дайте визначення потужності еквівалентної дози (ПЕД). Який середній рівень природного радіаційного фону є нормою для території України?
14. У чому полягає небезпека накопичення радону-222 у закритих приміщеннях та які існують методи його моніторингу?
15. Яка роль автоматизованих систем контролю радіаційного стану (АСКРО) у загальній системі екологічного моніторингу України?

Лекція 4, 5

СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ МОНІТОРИНГ. МОНІТОРИНГ ВІДХОДІВ, ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ОБ'ЄКТІВ ПІДВИЩЕНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ (ОПЕН)

Частина 1

Мета лекції: Сформувати у студентів цілісне розуміння методології та практичного інструментарію моніторингу відходів, промислових майданчиків та об'єктів підвищеної екологічної безпеки (ОПЕН). Особлива увага приділяється адаптації української системи моніторингу до стандартів ЄС, впровадженню автоматизованих систем контролю та нормативно-правовому регулюванню діяльності суб'єктів господарювання, що мають значний техногенний вплив на довкілля.

План лекції

1. Методологічні основи моніторингу відходів
2. Екологічний моніторинг промислових об'єктів
3. Специфіка моніторингу об'єктів підвищеної екологічної безпеки (ОПЕН)
4. Прогнозування та реагування

Частина 2

Мета лекції: Сформувати у студентів системне уявлення про особливості спеціалізованого екологічного моніторингу у сфері поводження з відходами, функціонування промислових об'єктів та об'єктів підвищеної екологічної безпеки, а також розкрити методичні підходи до організації спостережень, оцінювання екологічних ризиків і використання результатів моніторингу в системі управління екологічною безпекою.

План лекції

1. Методичні підходи до організації спеціалізованого екологічного моніторингу
2. Особливості моніторингу у сфері поводження з відходами
3. Моніторинг промислових об'єктів як складова екологічної безпеки
4. Моніторинг об'єктів підвищеної екологічної безпеки (ОПЕН)
5. Використання результатів спеціалізованого моніторингу в системі управління

Ч.1.1. Методологічні основи моніторингу відходів

В умовах гармонізації українського законодавства з європейським, моніторинг стає не просто фіксацією обсягів сміття, а інструментом мінімізації екологічних ризиків. Основна увага приділяється ідентифікації небезпечних властивостей відходів, контролю за спеціалізованими спорудами для їх зберігання (полігони, хвостосховища) та запобіганню транскордонному забрудненню.

1.1. Класифікація відходів за класами небезпеки та новими стандартами

Згідно з чинним Законом України «[Про управління відходами](#)», що базується на положеннях Директиви [2008/98/ЄС](#), Україна перейшла на європейську систему класифікації. Відходи поділяються на небезпечні та такі, що не є небезпечними, проте для потреб моніторингу продовжує враховуватися ступінь їхнього токсичного впливу (традиційно I–IV класи небезпеки). Моніторинг починається з первинного обліку за [формою № 1-ВТ](#) та паспортизації. Для об'єктів I та II класів (ртутовмісні прилади, відпрацьовані мастила, акумулятори) встановлюється режим особливого контролю, що передбачає обов'язкове ліцензування операцій та використання систем GPS-трекінгу при транспортуванні. Важливим аспектом є впровадження Національного переліку відходів, який синхронізований з [European Waste Catalogue \(EWC\)](#), що дозволяє здійснювати моніторинг за уніфікованими кодами, полегшуючи звітність та контроль за обігом специфічних потоків відходів у промисловості.

1.2. Моніторинг місць розміщення відходів: полігонів, шламонакопичів та териконів

Спостереження за місцями видалення відходів (МВВ) є найбільш критичним етапом, оскільки такі об'єкти як шламонакопичувачі металургійних заводів або терикони шахт є джерелами довгострокового впливу. Відповідно до Постанови КМУ «[Про затвердження Порядку ведення реєстру місць видалення відходів](#)», кожен такий об'єкт повинен мати паспорт та систему моніторингових свердловин. Для териконів моніторинг включає контроль за температурою (запобігання самозайманню) та ерозійними процесами. Шламонакопичувачі потребують постійного інструментального спостереження за стійкістю дамб та рівнем підтоплення прилеглих територій. Впровадження [Директиви 1999/31/ЄС](#) про захоронення відходів вимагає від операторів полігонів здійснювати моніторинг навіть після закриття об'єкта (протягом 30 років), що забезпечує контроль за стабілізацією масиву відходів та запобігає винесенню забруднювачів у ґрунтові води.

1.3. Контроль фільтрату та біогазу на сміттєвих полігонах

Одним із найскладніших аспектів моніторингу є контроль рідкої та газоподібної фаз, що утворюються в тілі полігона. Фільтрат – це високотоксична суміш, контроль якої здійснюється шляхом регулярного відбору проб із контрольних колодязів для аналізу на ХСК, БСК, вміст амонійного азоту та важких металів. Моніторинг біогазу (переважно метану та вуглекислого газу) спрямований на запобігання пожежам та вибухам, а також на оцінку викидів парникових газів.

Вимоги [ДБН В.2.4-2:2005](#) «Полігони твердих побутових відходів» регламентують обов'язкове встановлення систем дегазації та збору фільтрату на сучасних об'єктах. Сучасний моніторинг передбачає використання автоматичних датчиків концентрації метану (CH₄) у повітрі робочої зони та на межі санітарно-захисної зони, що інтегруються в загальнодержавну систему

моніторингу довкілля для оперативного реагування на перевищення допустимих норм.

Ч.1.2. Екологічний моніторинг промислових об'єктів

Промисловий моніторинг (або моніторинг емісій) є фундаментом для впровадження принципу «забруднювач платить» та переходу України до інтегрованого довкілля управління: сучасне підприємство має контролювати свої викиди у повітря та скиди у води, орієнтуючись на найкращі доступні технології (ВАТ) та суворі європейські ліміти.

2.1. Поняття ВАТ та інтегрований моніторинг згідно з Директивою 2010/75/EU

Впровадження [Директиви 2010/75/ЄС](#) про промислові викиди (IED) кардинально змінює підхід до моніторингу в Україні. Замість контролю окремих компонентів запроваджується інтегрований підхід, де моніторинг є частиною екологічного дозволу. Ключовим стає поняття Найкращих доступних технологій та методів керування (НДТМ/ВАТ). Моніторинг за стандартами ВАТ передбачає не лише вимірювання концентрацій речовин на виході, а й контроль параметрів технологічного процесу (температура спалювання, тиск, витрата палива), що дозволяє мінімізувати утворення забруднювачів. Це вимагає від великих підприємств (металургія, енергетика, хімія) створення внутрішніх служб екологічного аудиту та постійної звітності перед державними органами через електронні кабінети.

2.2. Організація автоматизованих систем моніторингу (АСК) на джерелах викидів

Сучасний промисловий моніторинг неможливий без АСК – автоматизованих систем контролю, що встановлюються безпосередньо на димових трубах та випусках стічних вод. Згідно з Наказом Міндовкілля № 287, великі спалювальні установки зобов'язані бути обладнані приладами безперервного вимірювання вмісту SO₂, NO_x, пилу та СО. Ці системи працюють у режимі реального часу 24/7, передаючи дані на сервер підприємства та в перспективі – до державного реєстру викидів. Автоматизація виключає людський фактор і дозволяє оператору миттєво реагувати на технологічні збої, що призводять до понаднормативних викидів, забезпечуючи високу точність порівняно з періодичними інструментальними замірами раз на квартал чи рік.

2.3. Контроль дотримання нормативів у санітарно-захисних зонах

Моніторинг у СЗЗ є сполучною ланкою між контролем джерел викидів та моніторингом атмосферного повітря в населених пунктах. Відповідно до [ДСП 173-96](#) «Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів», кожне підприємство має визначений розмір СЗЗ, де проживання людей заборонено. Моніторинг тут проводиться в точках на межі СЗЗ та найближчої житлової забудови. Він включає вимірювання не лише хімічних забруднювачів, а й фізичних факторів: шуму, вібрації та електромагнітного випромінювання. Дані спостережень у СЗЗ використовуються для

підтвердження того, що впроваджені на заводі очисні споруди та пілогазоочисне устаткування (ПГОУ) працюють ефективно і концентрації шкідливих речовин у повітрі не перевищують гранично допустимі (ГДК) для населення.

Ч.1.3. Специфіка моніторингу об'єктів підвищеної екологічної небезпеки (ОПЕН)

Моніторинг ОПЕН характеризується підвищеною частотою замірів, використанням автоматизованих систем раннього виявлення надзвичайних ситуацій та інтеграцією в загальнодержавну систему цивільного захисту. В умовах воєнного стану в Україні моніторинг цих об'єктів набув особливого значення через ризики фізичного пошкодження критичної інфраструктури.

3.1. Критерії ідентифікації ОПЕН та їх державний облік

Ідентифікація об'єктів підвищеної небезпеки в Україні регулюється Законом України «[Про об'єкти підвищеної небезпеки](#)» та відповідною Постановою [КМУ № 1030](#). Основним критерієм є наявність на об'єкті небезпечних речовин у кількостях, що перевищують встановлені порогові маси (вибухові, легкозаймисті, токсичні речовини). Моніторинг розпочинається з розробки декларації безпеки та ПЛАС (плану локалізації та ліквідації аварійних ситуацій). Обов'язковим елементом є ведення Державного електронного реєстру ОПЕН, куди вносяться дані про тип небезпеки та радіус можливого ураження. Моніторинг таких об'єктів здійснюється не лише власником, а й під жорстким наглядом ДСНС та Держекоінспекції, що забезпечує багатокomпонентний контроль за станом технологічного обладнання та резервуарів.

3.2. Специфіка моніторингу радіаційно та хімічно небезпечних об'єктів

Моніторинг радіаційно небезпечних об'єктів (насамперед АЕС) базується на системі АСКРО (автоматизована система контролю радіаційної обстановки). Вона включає датчики потужності експозиційної дози гамма-випромінювання, встановлені безпосередньо на промисловому майданчику та в 30-кілометровій зоні спостереження. Для хімічно небезпечних об'єктів (ХНО), таких як аміакопроводи чи заводи з виробництва хлору, ключовим є моніторинг приземного шару атмосфери на межі промайданчика за допомогою газоаналізаторів, налаштованих на специфічні маркери (аміак, хлор, сірковуглець). Згідно з вимогами Директиви [Seveso III \(2012/18/EU\)](#), моніторинг має бути превентивним: датчики тиску та температури в ємностях пов'язані з автоматичними системами аварійного скидання або нейтралізації реагентів.

3.3. Прогнозування наслідків аварійних ситуацій та система оповіщення

Завершальною ланкою моніторингу ОПЕН є математичне моделювання можливих зон забруднення. Використовуючи дані метеостанцій (напрямок і швидкість вітру, інверсія температури) та дані моніторингу викидів,

спеціалізоване програмне забезпечення прогнозує рух «хмари» забруднення. Це дозволяє в режимі реального часу визначати райони, що потребують евакуації. В Україні цей процес регламентується [Методикою прогнозування наслідків вилливу \(викиду\) небезпечних хімічних речовин](#). Сучасний моніторинг ОПЕН передбачає інтеграцію з мобільними застосунками та системами СМС-оповіщення населення, що базуються на оперативних даних з датчиків моніторингу, забезпечуючи мінімальний час реагування між виникненням загрози та інформуванням громадян.

Ч.1.4. Прогнозування та реагування

Прогнозування є ключовим елементом екологічного менеджменту, оскільки воно дозволяє діяти на випередження, мінімізуючи збитки для довкілля та економіки. В розділі розглядаються інструменти моделювання та державні механізми контролю, які забезпечують стійкість екологічної системи країни.

4.1. Моделювання розповсюдження забруднюючих речовин

Сучасне прогнозування базується на математичних моделях розсіювання (для атмосфери) та міграції (для гідросфери). Використовуючи дані моніторингу промислових викидів, метеорологічні параметри та рельєф місцевості, фахівці будують карти полів концентрацій. В Україні для цього застосовуються методики, що базуються на ОНД-86, проте триває активний перехід до європейських моделей, таких як [ADMS](#) або [AERMOD](#). Ці моделі дозволяють спрогнозувати «екологічний слід» підприємства на 24–48 годин вперед, враховуючи зміну погодних умов, що є критично важливим для ОПЕН при розрахунку ризиків для прилеглих населених пунктів.

4.2. Інформаційні системи підтримки прийняття рішень (DSS)

Інтегрований моніторинг вимагає централізованого збору даних. В Україні базою для цього є Загальнодержавна екологічна автоматизована інформаційно-аналітична система «[ЕкоСистема](#)». Системи підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems) дозволяють автоматично зіставляти поточні дані моніторингу з нормативами ГДК (гранично допустимих концентрацій). У разі фіксації перевищень система автоматично генерує сповіщення для екологічних служб підприємства та державних контролюючих органів. Це забезпечує прозорість і дозволяє оперативно впроваджувати заходи з регулювання викидів (наприклад, зниження потужності виробництва під час несприятливих метеорологічних умов).

4.3. Державний облік та екологічна звітність

Фінальним етапом реагування є відображення результатів моніторингу в офіційній звітності. Згідно з Регламентом (ЄС) [№ 166/2006](#), Україна впроваджує [РТВП](#) – Реєстр викидів та перенесення забруднювачів. Це відкрита база даних, де кожен громадянин може перевірити, скільки відходів утворило підприємство та які саме речовини воно викинуло в повітря. Реагування з боку держави включає проведення планових та позапланових перевірок [Держекоінспекцією](#) на основі даних моніторингу, нарахування

збитків за порушення природоохоронного законодавства та, у разі потреби, анулювання екологічних дозволів. Таким чином, моніторинг стає юридичним підґрунтям для притягнення до відповідальності та стимулювання підприємств до модернізації.

Ч.2.1. Методичні підходи до організації спеціалізованого екологічного моніторингу

Спеціалізований екологічний моніторинг є складовою державної системи моніторингу довкілля та спрямований на отримання достовірної, репрезентативної і своєчасної інформації про стан окремих компонентів навколишнього природного середовища в зонах впливу конкретних джерел антропогенного навантаження.

Організація спеціалізованого моніторингу базується на низці науково обґрунтованих принципів, серед яких визначальними є системність, комплексність, безперервність, достовірність та порівнюваність отриманих даних. Системність передбачає узгодженість усіх елементів моніторингу – від вибору об'єктів спостереження до інтерпретації результатів. Комплексність забезпечує одночасний облік декількох факторів впливу, що дозволяє оцінити сукупний екологічний ефект. Безперервність означає регулярність спостережень, необхідну для виявлення динаміки змін. Достовірність і порівнюваність досягаються завдяки використанню стандартизованих методик вимірювання та єдиних критеріїв оцінки.

Важливим етапом організації моніторингу є визначення об'єкта спостереження. У контексті спеціалізованого моніторингу такими об'єктами виступають промислові підприємства, місця утворення, зберігання і видалення відходів, а також об'єкти підвищеної екологічної небезпеки. При цьому враховується характер виробничої діяльності, склад і обсяги викидів та скидів, фізико-хімічні властивості забруднюючих речовин, а також потенційний вплив на населення і довкілля.

Наступним етапом є вибір контрольних точок спостереження. Їх розташування визначається з урахуванням просторового розповсюдження забруднюючих речовин, особливостей рельєфу місцевості та метеорологічних умов. Особливу роль відіграє напрямок і повторюваність вітру, що обумовлює формування зон максимального забруднення. Контрольні точки, як правило, розміщуються на межі санітарно-захисної зони, у зоні житлової забудови та в місцях потенційного накопичення забруднювачів.

Періодичність проведення спостережень встановлюється залежно від характеру джерела впливу та рівня екологічного ризику. Для об'єктів із постійними викидами доцільним є регулярний або безперервний моніторинг, тоді як для об'єктів із періодичним впливом застосовуються дискретні вимірювання. При цьому важливо забезпечити репрезентативність вибірки, що дозволяє отримати об'єктивну картину стану довкілля.

Значну роль у спеціалізованому моніторингу відіграють методи вимірювання та обробки даних. Використовуються як інструментальні, так і

розрахункові методи. Інструментальні методи передбачають безпосереднє визначення концентрацій забруднюючих речовин у повітрі, воді або ґрунті. Розрахункові методи базуються на математичному моделюванні процесів розсіювання та трансформації забруднювачів, що дозволяє прогнозувати їх просторовий розподіл.

Сучасний етап розвитку моніторингу характеризується впровадженням автоматизованих систем спостереження, які забезпечують оперативне отримання даних у режимі реального часу. Такі системи інтегруються з геоінформаційними технологіями, що дозволяє здійснювати просторовий аналіз та візуалізацію результатів.

Отримані в процесі моніторингу дані підлягають аналізу та інтерпретації з урахуванням нормативних значень, зокрема гранично допустимих концентрацій. Це дає змогу оцінити рівень екологічної небезпеки та визначити необхідність впровадження природоохоронних заходів.

Таким чином, спеціалізований екологічний моніторинг виступає ключовим інструментом інформаційного забезпечення управління екологічною безпекою, забезпечуючи науково обґрунтовану основу для прийняття управлінських рішень.

1.1. Вибір контрольних точок спостереження

Вибір контрольних точок є одним із ключових етапів організації спеціалізованого екологічного моніторингу, оскільки саме від їх розташування залежить достовірність оцінки рівня забруднення.

Розміщення точок спостереження здійснюється з урахуванням таких факторів: розташування джерел викидів; характеристик рельєфу місцевості; метеорологічних умов (напрямок і швидкість вітру); наявності житлової забудови; меж санітарно-захисної зони.

Контрольні точки, як правило, розміщуються:

- у безпосередній близькості до джерела викиду;
- на межі санітарно-захисної зони;
- у напрямку переважаючих вітрів;
- у зоні можливого максимального забруднення.

Алгоритм вибору контрольних точок:

1. Визначення джерела забруднення.
2. Аналіз рози вітрів території.
3. Встановлення напрямків переносу домішок.
4. Виділення зон максимального впливу.
5. Розміщення точок спостереження у характерних зонах.

1.2. Визначення кратності перевищення гранично допустимих концентрацій

Оцінка рівня забруднення довкілля здійснюється шляхом порівняння фактичних концентрацій із нормативними значеннями.

Основним показником є кратність перевищення:

$$K = \frac{C}{ГДК}$$

де: C – фактична концентрація забруднюючої речовини, мг/м³;

ГДК – гранично допустима концентрація, мг/м³.

Інтерпретація результатів:

– $K \leq 1$ – норматив не перевищено;

– $K > 1$ – спостерігається перевищення;

– $K \gg 1$ – високий рівень екологічної небезпеки.

1.3. Оцінка комбінованого впливу забруднюючих речовин

У випадку одночасної присутності кількох забруднювачів із односпрямованою дією використовується показник сумачії.

$$\sum \frac{C_i}{\text{ГДК}_i} \leq 1$$

де: C_i – концентрація i -ї речовини;

ГДК _{i} – відповідна гранично допустима концентрація.

Критерій оцінки:

– сума ≤ 1 – допустимий рівень впливу;

– сума > 1 – перевищення нормативу.

1.4. Врахування метеорологічних умов при моніторингу

Метеорологічні умови відіграють визначальну роль у формуванні рівнів забруднення атмосферного повітря.

Основними параметрами є: напрямок і швидкість вітру, температурна стратифікація атмосфери та наявність інверсій.

Для аналізу використовується роза вітрів – графічне відображення повторюваності напрямків вітру.

Розрахунок повторюваності напрямку:

$$P = \frac{n}{N} \cdot 100\%$$

де: n – кількість спостережень для певного напрямку;

N – загальна кількість спостережень.

1.5. Алгоритм організації спеціалізованого моніторингу

Організація моніторингу здійснюється поетапно.

Етапи: визначення об'єкта моніторингу → ідентифікація джерел забруднення → вибір контрольних показників → розміщення точок спостереження → проведення вимірювань → обробка результатів → порівняння з нормативами → інтерпретація результатів.

Ч.2.2. Особливості моніторингу у сфері поводження з відходами

Моніторинг у сфері поводження з відходами є важливою складовою спеціалізованого екологічного моніторингу, оскільки відходи виступають одним із найбільш небезпечних джерел антропогенного впливу на довкілля. Його основною метою є отримання систематизованої інформації про обсяги утворення, склад, властивості, умови зберігання, транспортування та утилізації відходів, а також оцінка їх впливу на компоненти навколишнього природного середовища.

Організація моніторингу у цій сфері передбачає насамперед класифікацію відходів за ступенем небезпеки, агрегатним станом та походженням. Відповідно до чинних підходів, відходи поділяються на небезпечні та безпечні, при цьому небезпечні відходи характеризуються токсичністю, здатністю до біоаккумуляції, вибухо- та пожежонебезпечністю, а також здатністю до тривалого негативного впливу на довкілля та здоров'я людини.

Важливим елементом моніторингу є державний облік відходів, який забезпечує формування інформаційної бази щодо їх утворення та руху. Облік здійснюється на рівні підприємств і включає ведення відповідної звітної документації, що відображає кількісні та якісні характеристики відходів. Це дозволяє оцінити масштаби проблеми та визначити пріоритетні напрями управління.

Особливе значення має паспортизація місць видалення відходів, яка передбачає систематизацію інформації про полігони, сховища, відвали та інші об'єкти розміщення відходів. У процесі паспортизації враховуються географічне розташування об'єкта, його технічні характеристики, обсяги накопичених відходів, а також умови їх ізоляції від навколишнього середовища.

Моніторинг відходів включає контроль низки показників, серед яких ключовими є обсяги утворення відходів, їх морфологічний та хімічний склад, рівень токсичності, а також показники, що характеризують можливість міграції забруднюючих речовин у навколишнє середовище. Особливу увагу приділяють процесам утворення фільтрату на полігонах твердих побутових та промислових відходів, який є джерелом забруднення ґрунтів і підземних вод.

Суттєвим аспектом є контроль за впливом місць видалення відходів на атмосферне повітря, що пов'язано з утворенням біогазу та виділенням токсичних речовин. У цьому контексті здійснюється вимірювання концентрацій забруднювачів у приземному шарі атмосфери, а також оцінка їх розповсюдження.

Моніторинг у сфері поводження з відходами також передбачає оцінку екологічних ризиків, пов'язаних із можливими аварійними ситуаціями, такими як прорив дамб шламонакопичувачів, займання полігонів або витік небезпечних речовин. Це потребує врахування як природних факторів, так і техногенних особливостей об'єктів.

Таким чином, моніторинг відходів забезпечує комплексне уявлення про їх вплив на довкілля, дозволяє виявляти потенційно небезпечні ситуації та формує інформаційну основу для прийняття ефективних управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.

2.1. Кількісна оцінка утворення відходів

Одним із базових показників моніторингу у сфері поводження з відходами є обсяг їх утворення, що дозволяє оцінити рівень техногенного навантаження.

Розрахунок річного обсягу утворення відходів:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

де: Q – загальний обсяг відходів, т/рік;

q_i – обсяг відходів i -го виду, т/рік.

У разі нормування утворення відходів використовується показник питомого утворення:

$$q_{\text{птг}} = \frac{Q}{P}$$

де: P – обсяг продукції або сировини.

Цей показник дозволяє порівнювати ефективність різних виробництв.

2.2. Класифікація відходів за ступенем небезпеки

Оцінка небезпеки відходів здійснюється з урахуванням їх токсичних властивостей.

Інтегральний показник небезпеки може визначатися як:

$$K_{\text{неб}} = \sum \frac{C_i}{\text{ГДК}_i}$$

де: C_i – концентрація небезпечної речовини у відходах;

ГДК_i – нормативне значення.

Чим більше значення показника, тим вищий клас небезпеки відходів.

2.3. Оцінка утворення фільтрату на полігонах

Фільтрат є одним із основних факторів забруднення при зберіганні відходів.

Спрощений розрахунок об'єму фільтрату:

$$L = P \cdot F \cdot k$$

де: L – об'єм фільтрату, м³;

P – кількість опадів, мм;

F – площа полігону, м²;

k – коефіцієнт інфільтрації.

Цей показник використовується для оцінки ризику забруднення підземних вод.

2.4. Оцінка міграції забруднюючих речовин у ґрунті

Для оцінки поширення забруднення у ґрунті використовується коефіцієнт міграції:

$$K_m = \frac{C_2}{C_1}$$

де: C_1 – концентрація у джерелі;

C_2 – концентрація на відстані.

Якщо $K_m \approx 1$, спостерігається висока мобільність речовини.

2.5. Алгоритм моніторингу відходів

Моніторинг у сфері поводження з відходами здійснюється за наступною послідовністю:

1. Ідентифікація джерел утворення відходів.
2. Класифікація відходів за видами та небезпечністю.

3. Визначення обсягів утворення.
4. Аналіз місць накопичення та видалення.
5. Оцінка можливих шляхів міграції.
6. Контроль стану довкілля у зоні впливу.
7. Порівняння отриманих даних із нормативами.
8. Формування висновків щодо екологічної безпеки.

Ч.2.3. Моніторинг промислових об'єктів як складова екологічної безпеки

Моніторинг промислових об'єктів є одним із ключових напрямів спеціалізованого екологічного моніторингу, оскільки саме промисловість формує значну частину антропогенного навантаження на довкілля. Його основною метою є контроль за викидами, скидами та іншими видами впливу підприємств, а також оцінка їхнього впливу на стан атмосферного повітря, водних ресурсів і ґрунтів.

Об'єктами моніторингу виступають стаціонарні та пересувні джерела забруднення, технологічні процеси, очисні споруди, а також прилеглі території, що зазнають впливу виробничої діяльності. Особлива увага приділяється підприємствам, діяльність яких пов'язана з викидами токсичних, канцерогенних або стійких забруднюючих речовин.

Одним із основних напрямів є моніторинг атмосферного повітря в зоні впливу промислових підприємств. Він включає визначення концентрацій забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери, аналіз їх відповідності гранично допустимим концентраціям, а також оцінку просторового розподілу забруднення. При цьому враховуються фізико-хімічні властивості речовин, висота джерел викиду, температурні характеристики газових потоків та метеорологічні умови.

Важливою складовою є контроль за скидами забруднюючих речовин у водні об'єкти. Моніторинг у цьому випадку передбачає визначення хімічного складу стічних вод, концентрацій забруднювачів, а також оцінку ефективності роботи очисних споруд. Особливо здійснюється контроль за станом водних об'єктів у зоні впливу підприємств.

Моніторинг ґрунтів у районах розташування промислових об'єктів спрямований на виявлення накопичення важких металів, нафтопродуктів та інших токсичних речовин. Це дозволяє оцінити довготривалий вплив підприємств на екосистеми та визначити ризики для сільськогосподарського використання земель.

Суттєвим елементом моніторингу є врахування метеорологічних факторів, які визначають характер розсіювання забруднюючих речовин у атмосфері. Напрямок і швидкість вітру, температурні інверсії, вологість повітря безпосередньо впливають на формування зон максимального забруднення. У цьому контексті важливим інструментом аналізу є характеристика вітрового режиму території.

На основі даних моніторингу визначаються зони впливу промислових підприємств, у межах яких концентрації забруднюючих речовин можуть

перевищувати нормативні значення. Це дозволяє оцінити рівень екологічної небезпеки та встановити необхідні обмеження щодо використання територій.

Таким чином, моніторинг промислових об'єктів забезпечує своєчасне виявлення негативних змін у довкіллі, дозволяє оцінити ефективність природоохоронних заходів та є важливою складовою системи управління екологічною безпекою.

3.1. Розрахунок приземних концентрацій забруднюючих речовин

Оцінка впливу промислових об'єктів на атмосферне повітря базується на визначенні максимальних приземних концентрацій забруднюючих речовин.

Спрощена формула:

$$C_{max} = \frac{M}{\pi \cdot u \cdot H^2}$$

де: C_{max} – максимальна приземна концентрація, мг/м³;

M – масова витрата викиду, г/с;

u – швидкість вітру, м/с;

H – ефективна висота джерела, м.

Збільшення висоти джерела або швидкості вітру призводить до зменшення концентрації.

3.2. Оцінка відповідності гранично допустимим концентраціям

Після визначення концентрацій здійснюється їх порівняння з нормативами.

$$K = \frac{C_{max}}{ГДК}$$

де: K – кратність перевищення.

Критерій:

- $K \leq 1$ – допустимо;
- $K > 1$ – перевищення.

3.3. Визначення розміру санітарно-захисної зони (СЗЗ)

Санітарно-захисна зона встановлюється як відстань, на якій концентрація забруднюючих речовин не перевищує нормативних значень.

Умовно:

$$C(x) \leq \text{ГДК}$$

де: x – відстань від джерела.

Практично розмір СЗЗ визначається:

- за нормативами (залежно від класу небезпеки);
- за результатами розрахунків розсіювання.

Типові нормативи:

- I клас – 1000 м
- II клас – 500 м
- III клас – 300 м
- IV клас – 100 м
- V клас – 50 м

3.4. Врахування рози вітрів при визначенні СЗЗ

Роза вітрів використовується для уточнення конфігурації СЗЗ.

Розрахунок повторюваності:

$$P = \frac{n}{N} \cdot 100\%$$

У напрямках із найбільшою повторюваністю вітру зона впливу подовжується, а СЗЗ може збільшуватись.

Таким чином, СЗЗ має не кругову, а асиметричну форму.

3.5. Алгоритм оцінки впливу промислового підприємства

1. Визначення джерел викидів.
2. Збір вихідних даних (М, Н, u).
3. Розрахунок концентрацій.
4. Порівняння з ГДК.
5. Визначення зони впливу.
6. Уточнення з урахуванням рози вітрів.
7. Встановлення розміру СЗЗ.

Ч.2.4. Моніторинг об'єктів підвищеної екологічної небезпеки (ОПЕН)

Моніторинг об'єктів підвищеної екологічної небезпеки є окремим напрямом спеціалізованого екологічного моніторингу, що зумовлено високим рівнем потенційного ризику їх функціонування для довкілля та населення. До таких об'єктів належать підприємства та установки, діяльність яких пов'язана з використанням, зберіганням або транспортуванням небезпечних речовин у значних обсягах, а також об'єкти, аварії на яких можуть спричинити масштабні екологічні наслідки.

Характерною особливістю моніторингу ОПЕН є його орієнтація не лише на фіксацію поточного стану довкілля, але й на попередження можливих аварійних ситуацій. У цьому контексті важливого значення набуває ризик-орієнтований підхід, який передбачає ідентифікацію потенційних джерел небезпеки, оцінку ймовірності виникнення аварій та прогнозування їх наслідків.

Організація моніторингу таких об'єктів включає контроль технічного стану обладнання, параметрів технологічних процесів, а також стану природних компонентів у зоні впливу. Особлива увага приділяється контролю за концентраціями небезпечних речовин у повітрі, воді та ґрунті, а також дотриманню встановлених нормативів.

Важливим елементом є створення систем раннього виявлення відхилень від нормального режиму функціонування об'єктів. Такі системи базуються на використанні автоматизованих засобів контролю, які дозволяють оперативно отримувати інформацію про зміну параметрів і своєчасно реагувати на потенційно небезпечні ситуації.

Моніторинг ОПЕН також передбачає розроблення сценаріїв можливих аварій та оцінку їх впливу на довкілля і населення. Це включає моделювання поширення забруднюючих речовин, визначення зон ураження та оцінку

масштабів можливих наслідків. Отримані результати використовуються для планування заходів реагування та мінімізації шкоди.

Суттєвим аспектом є взаємодія системи моніторингу з органами державного управління та службами цивільного захисту. Це забезпечує координацію дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій та підвищує ефективність реагування.

Таким чином, моніторинг об'єктів підвищеної екологічної небезпеки виконує не лише контрольну, але й превентивну функцію, спрямовану на зниження ризиків виникнення аварій та забезпечення екологічної безпеки території.

4.1. Ідентифікація об'єктів підвищеної екологічної небезпеки

Віднесення об'єкта до категорії підвищеної екологічної небезпеки здійснюється на основі аналізу кількості та властивостей небезпечних речовин, що використовуються або зберігаються.

Критерієм є перевищення порогових мас: $M_{\text{факт}} \geq M_{\text{пор}}$

де: $M_{\text{факт}}$ – фактична маса небезпечної речовини;

$M_{\text{пор}}$ – порогове значення.

У разі виконання умови об'єкт відноситься до ОПЕН.

4.2. Оцінка ймовірності аварійних ситуацій

Ймовірність виникнення аварії визначається на основі статистичних або експертних даних.

$$P = \frac{n}{N}$$

де: n – кількість аварій за певний період;

N – загальна кількість спостережень або об'єктів.

Чим вище значення PPP , тим більший рівень ризику.

4.3. Оцінка екологічного ризику

Екологічний ризик визначається як добуток ймовірності аварії на величину можливих збитків:

$$R = P \cdot D$$

де: R – ризик;

P – ймовірність;

D – збитки (екологічні, економічні, соціальні).

4.4. Розрахунок індексу небезпеки

Для комплексної оцінки використовується інтегральний індекс небезпеки:

$$I = \sum \frac{C_i}{ГДК_i}$$

де: C_i – концентрація i -ї речовини.

Якщо:

- $I \leq 1$ – допустимий рівень;
- $I > 1$ – небезпечний рівень.

4.5. Алгоритм моніторингу ОПЕН

1. Ідентифікація небезпечних речовин.

2. Визначення їх кількості.
3. Аналіз технологічних процесів.
4. Оцінка ймовірності аварій.
5. Розрахунок ризику.
6. Визначення зон можливого ураження.
7. Організація системи контролю.
8. Оцінка отриманих результатів.

Ч.2.5. Використання результатів спеціалізованого моніторингу в системі управління

Результати спеціалізованого екологічного моніторингу є основою для прийняття управлінських рішень у сфері охорони навколишнього природного середовища та забезпечення екологічної безпеки. Отримані дані дозволяють оцінити поточний стан довкілля, виявити тенденції його змін та визначити рівень антропогенного навантаження.

Одним із ключових напрямів використання результатів моніторингу є оцінка відповідності фактичних показників якості довкілля встановленим нормативам. У разі виявлення перевищень гранично допустимих значень виникає необхідність розроблення та впровадження заходів, спрямованих на зниження рівня забруднення.

На основі даних моніторингу здійснюється планування природоохоронної діяльності, що включає модернізацію технологічних процесів, удосконалення систем очищення викидів і скидів, а також оптимізацію умов розміщення джерел забруднення. Це сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля та підвищенню рівня екологічної безпеки.

Важливим аспектом є використання результатів моніторингу для обґрунтування екологічних нормативів і обмежень, зокрема встановлення режимів використання територій, визначення зон впливу та регулювання господарської діяльності. Це дозволяє забезпечити раціональне використання природних ресурсів і запобігти деградації екосистем.

Результати моніторингу також використовуються для інформаційного забезпечення органів державної влади, місцевого самоврядування та громадськості. Відкритість і доступність екологічної інформації сприяють підвищенню екологічної свідомості суспільства та формуванню відповідального ставлення до довкілля.

Таким чином, спеціалізований екологічний моніторинг є невід'ємною складовою системи управління екологічною безпекою, забезпечуючи науково обґрунтовану основу для прийняття ефективних рішень та реалізації природоохоронної політики.

5.1. Оцінка ефективності природоохоронних заходів

Ефективність заходів визначається шляхом порівняння показників до і після їх впровадження:

$$E = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100\%$$

де: C_1 – концентрація до впровадження;

C_2 – після.

5.2. Інтегральна оцінка стану довкілля

Для узагальнення результатів використовується інтегральний показник:

$$I_{\text{екол}} = \sum K_i$$

де: K_i – кратність перевищення за окремими показниками.

5.3. Алгоритм використання результатів моніторингу

1. Збір та систематизація даних.
2. Розрахунок показників.
3. Порівняння з нормативами.
4. Виявлення перевищень.
5. Оцінка ризиків.
6. Формування висновків.
7. Прийняття управлінських рішень.

За результатами розгляду особливостей спеціалізованого моніторингу можна зробити наступні узагальнюючі висновки:

1. Специфіка спеціалізованого моніторингу на відміну від загальнодержавних спостережень, моніторинг промислових об'єктів та ОПЕН фокусується на «точковому» техногенному впливі, що потребує індивідуального підбору параметрів контролю (специфічних забруднювачів) залежно від технологічного циклу підприємства та класу небезпеки відходів.

2. Перехід від періодичного лабораторного контролю до встановлення автоматичних датчиків на джерелах викидів («на трубі») є критично важливою умовою гармонізації українського законодавства з нормами ЄС, оскільки це забезпечує об'єктивність даних та дозволяє фіксувати залпові або аварійні викиди, які раніше залишалися непоміченими.

3. Система спостережень за об'єктами підвищеної небезпеки виконує не лише функцію фіксації фактів забруднення, а є фундаментом для прогнозування ймовірних аварійних ситуацій. Це дозволяє заздалегідь розраховувати зони ураження та розробляти плани евакуації й ліквідації наслідків, мінімізуючи екологічні та соціальні ризики.

4. Дані спеціалізованого моніторингу є офіційним підґрунтям для розрахунку екологічних податків та нарахування збитків за порушення природоохоронних норм. Впровадження прозорого пооб'єктного моніторингу стимулює підприємства інвестувати в модернізацію очисних споруд та переходити до екологічно безпечних технологій (НДТМ).

Контрольні питання

1. Проаналізуйте методологічні засади моніторингу місць видалення відходів (МВВ), розкривши специфіку спостережень за впливом фільтрату на підземні горизонти та станом атмосферного повітря в зоні впливу полігону.

2. Розкрийте зміст та завдання моніторингу промислових об'єктів, пояснивши роль локального моніторингу як інструменту внутрішнього екологічного менеджменту підприємства.

3. Дайте розгорнуту характеристику категорії «об'єкт підвищеної екологічної небезпеки» та обґрунтуйте необхідність запровадження для таких об'єктів особливих режимів спостереження.

4. Опишіть процедуру ідентифікації та паспортизації відходів у системі моніторингу, пояснивши, як дані паспортів відходів впливають на вибір параметрів контролю навколишнього середовища.

5. Проаналізуйте концепцію «Найкращих доступних технологій та методів керування» у контексті модернізації систем моніторингу промислових викидів згідно з європейськими стандартами.

6. Опишіть структуру та принципи функціонування автоматизованих систем контролю викидів на джерелах забруднення, розкривши переваги передачі даних у режимі реального часу для органів державного контролю.

7. Розкрийте методіку моніторингу ґрунтів та рослинності в санітарно-захисній зоні промислового майданчика як індикатора довгострокового техногенного впливу підприємства.

8. Проаналізуйте роль екологічного моніторингу в системі запобігання надзвичайним ситуаціям на хімічно небезпечних об'єктах, описавши алгоритм оперативного реагування при виявленні критичних концентрацій токсикантів.

9. Поясніть сутність та завдання пооб'єктного моніторингу стічних вод промислових підприємств, акцентуючи увагу на специфічних забруднювачах, характерних для різних галузей промисловості.

10. Опишіть етапи розробки та впровадження програми спеціалізованого моніторингу для новозбудованого промислового об'єкта (від стадії ОВД до експлуатації).

11. Розкрийте значення геоінформаційних систем у моніторингу відходів, пояснивши, як дистанційні методи допомагають у виявленні та ліквідації несанкціонованих сміттєзвалищ.

12. Проаналізуйте правові наслідки для суб'єкта господарювання у разі виявлення прихованих або несанкціонованих викидів за допомогою засобів спеціалізованого моніторингу.

13. Охарактеризуйте методіку оцінки ефективності впроваджених природоохоронних заходів на підприємстві за допомогою порівняльного аналізу даних моніторингу до і після модернізації.

14. Опишіть алгоритм використання результатів спеціалізованого моніторингу для розрахунку екологічних ризиків та прогнозування зон можливого ураження при аваріях на ОПЕН.

15. Обґрунтуйте взаємозв'язок між спеціалізованим моніторингом та системою прийняття управлінських рішень у сфері забезпечення екологічної безпеки на регіональному рівні.

Лекція 6

ІНТЕГРОВАНИЙ МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ. ПРИНЦИПИ ІНТЕГРАЦІЇ, МОДЕЛІ DERR, РОЗРАХУНОК ТА ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ

Мета лекції: опанувати концептуальні засади інтегрованого моніторингу довкілля як системного інструменту оцінки техногенного навантаження, вивчити методологію причинно-наслідкового моделювання за схемою DPSIR (DERR) та набути практичних навичок згортання багатовимірних екологічних даних у єдині інтегральні індекси для прийняття управлінських рішень.

План лекції:

1. Сутність та ієрархія інтегрованого моніторингу довкілля
2. Теоретичне обґрунтування та структура моделі DPSIR (DERR)
3. Методологія розрахунку та агрегування інтегральних екологічних індексів
4. Практичне застосування результатів моніторингу в екологічному управлінні

1. Сутність та ієрархія інтегрованого моніторингу довкілля.

1.1. Відмінність інтегрованого моніторингу від галузевого

Традиційно моніторинг довкілля будувався за галузевим принципом: окремо моніторинг атмосферного повітря, окремо – водних ресурсів, ґрунтів чи лісів. Такий підхід має суттєвий недолік – він фіксує стан конкретного середовища, але не дає цілісної картини екосистеми.

Інтегрований моніторинг довкілля (ІМД) – це комплексна система спостережень, яка оцінює стан природних об'єктів у їхньому взаємозв'язку, враховуючи перехід забруднюючих речовин з одного середовища в інше (ланцюги: повітря → ґрунт → підземні води → біота).

Ключові відмінності:

Об'єкт: У галузевому – окремий ресурс (вода/повітря); в інтегрованому – екосистема або біосфера в цілому.

Мета: У галузевому – контроль відповідності ГДК; в інтегрованому – виявлення причин змін та прогноз стану екосистеми.

Методологія: ІМД використовує єдину мережу стаціонарних постів, де одночасно відбираються проби всіх компонентів довкілля.

Принципи інтеграції:

Просторова інтеграція: Спостереження проводяться на різних географічних рівнях (від локального підприємства до глобальних фонових станцій).

Компонентна інтеграція: Одночасне вимірювання фізичних, хімічних та біологічних показників (наприклад, концентрація важких металів у ґрунті та їх накопичення в листі дерев на тій же ділянці).

Методична інтеграція: Використання стандартизованих методів вимірювань, що дозволяє порівнювати дані з різних регіонів.

Інформаційна інтеграція: Створення єдиних баз даних та ГІС-систем для синтезу інформації.

Таким чином інтегрований моніторинг перетворює "сухі" цифри концентрацій на інструмент стратегічного управління, оскільки дозволяє побачити реальний масштаб антропогенного навантаження на територію.

1.2. Рівні інтеграції: об'єктний, територіальний та інформаційний

Інтеграція в системі моніторингу здійснюється за принципом «від часткового до загального». Це забезпечує несуперечливість даних на різних рівнях управління.

1. Об'єктний (локальний) рівень

Це первинна ланка інтеграції. Вона зосереджена на конкретному джерелі антропогенного впливу (підприємство, ТЕС, полігон відходів).

Суть інтеграції: Поєднання даних про викиди (у повітря), скиди (у воду) та утворення відходів одного об'єкта.

Мета: Контроль за дотриманням технологічних регламентів та екологічних нормативів конкретним суб'єктом господарювання.

2. Територіальний (регіональний) рівень

На цьому рівні відбувається синтез даних від багатьох об'єктних систем у межах певної території (місто, область, річковий басейн).

Суть інтеграції: Оцінка сумарного (кумулятивного) техногенного навантаження на певну екосистему. Тут важливо враховувати фоновий стан довкілля. Приклад: Моніторинг басейну річки Дніпро, де інтегруються дані з усіх областей, через які вона протікає.

3. Інформаційний (системний) рівень

Це найвищий рівень, де фізичні вимірювання перетворюються на аналітичні моделі та звіти.

Суть інтеграції: Використання єдиних протоколів передачі даних та програмних комплексів (ГІС-технологій). На цьому рівні відбувається поєднання екологічної інформації з соціально-економічними даними (наприклад, кореляція рівня забруднення повітря з рівнем захворюваності населення).

Результат: Створення «Національних доповідей про стан довкілля» та прийняття стратегічних рішень на державному рівні.

Ієрархічна піраміда моніторингу:

– Нижній ярус: Окремі датчики та пости спостереження (первинна інформація).

– Середній ярус: Регіональні центри обробки даних (агрегування).

– Верхній ярус: Загальнодержавна екологічна інформаційна система (синтез та стратегія).

Таким чином без чіткої вертикальної інтеграції (від об'єкта до держави) моніторинг залишається набором цифр, які неможливо використовувати для ефективного екологічного планування.

1.3. Системний підхід до оцінки стану екосистем

Системний підхід в інтегрованому моніторингу розглядає довкілля не як набір ізольованих ресурсів, а як єдину складну систему з внутрішніми зв'язками.

Основні положення системного підходу:

1. Принцип цілісності (Емерджентність):

Стан екосистеми не є простою сумою станів її частин (повітря + вода + ґрунт). Екосистема має властивості, які не притаманні її окремим компонентам. Наприклад, здатність до самоочищення водою залежить від взаємодії мікроорганізмів, температури води та швидкості течії одночасно.

2. Взаємозалежність компонентів (Трансскордонний перенос):

Забруднення ніколи не залишається в одному середовищі. Наприклад, викиди оксидів сірки в атмосферу (повітря) призводять до кислотних дощів, які закислюють ґрунти та вимивають метали у підземні води (вода), що зрештою пригнічує ріст рослин (біота).

3. Зворотні зв'язки:

Системний підхід аналізує, як зміна стану довкілля впливає назад на джерело тиску. Наприклад, вичерпання чистих водних ресурсів змушує промисловість впроваджувати оборотне водопостачання (реакція системи).

Методи системної оцінки в моніторингу:

Біоіндикація: Використання живих організмів як «датчиків» стану системи. Якщо в річці зникають певні види риб, це сигнал про системне порушення, навіть якщо хімічні аналізи в нормі.

Енергетичний баланс: Оцінка того, як техногенне навантаження змінює потік енергії в екосистемі.

Трофічні ланцюги: Аналіз накопичення забруднюючих речовин (наприклад, важких металів) під час їх руху від ґрунту до вищих хижаків або людини.

Таким чином системний підхід дозволяє перейти від пасивної констатації факту забруднення («скільки викинули») до розуміння наслідків («як це змінить життєздатність системи»). Це єдина база для розробки стратегій сталого розвитку територій.

2. Теоретичне обґрунтування та структура моделі DPSIR (DERR)

Модель DPSIR (або її спрощений варіант DERR) – це причинно-наслідкова мережа, яка описує взаємодію між суспільством і довкіллям. Вона дозволяє не просто фіксувати забруднення, а розуміти, чому воно виникло і як на нього вплинути.

2.1. Генезис моделі: від PSR до DPSIR

Спочатку використовувалася проста модель PSR (Pressure – State – Response / Тиск – Стан – Реакція). Проте вона не враховувала соціально-економічні причини та конкретні наслідки для здоров'я. Розширена модель DPSIR стала золотим стандартом інтегрованого моніторингу.

2.2. Розшифровка компонентів (ланцюг взаємодії)

D (Driving forces) – Рушійні сили:

Це фундаментальні потреби суспільства. Те, що змушує економіку працювати.

Приклади: Зростання населення, потреба в електроенергії, розвиток сільського господарства, розширення транспортних мереж.

P (Pressures) – Тиск:

Конкретні дії рушійних сил, що безпосередньо впливають на довкілля.

Приклади: Викиди CO₂ в атмосферу, скидання стічних вод, використання пестицидів, обсяги видобутку корисних копалин.

S (State) – Стан:

Фізичні, хімічні та біологічні показники довкілля в певній точці простору та часу.

Приклади: Концентрація NO₂ у повітрі міста, температура води в річці, вміст гумусу в ґрунті.

I (Impact) – Вплив:

Наслідки змін стану довкілля для екосистем та людини.

Приклади: Зростання захворюваності на астму, загибель риби в озерах, зниження врожайності через ерозію ґрунтів.

R (Responses) – Реакція:

Заходи, які вживає суспільство для вирішення проблеми.

Приклади: Впровадження екологічного податку, будівництво очисних споруд, підписання міжнародних кліматичних угод (Паризька угода).

2.3. Модель DERR (спрощена форма)

У деяких вітчизняних методиках використовується аббревіатура DERR (Driving forces – Exposure – Resource – Response): D – Рушійні сили, E – Експозиція (рівень впливу на організм), R – Ресурс (стан природного ресурсу), R – Реакція аббревіатура DERR набуває «українського колориту»: Джерело – Експозиція – Ресурс – Реакція, проте така розшифровка призведе до плутанини тому що модель є лінійною і логічним продовженням концепції «джерело – вплив – об'єкт», де акцент зміщується з опису стану природи на управлінську дію.

Порівняння моделей DPSIR та DERR наведено в таблиці

Модель	Основний фокус	Для кого призначена
DPSIR	Екологічна політика та загальний стан біосфери	Екологи, державні управлінці
DERR	Техногенна безпека та захист конкретних ресурсів	Інженери, фахівці з безпеки праці, аудиторі

Таким чином модель DPSIR перетворює моніторинг із процесу «замірів» на процес «управління», дозволяючи обирати найефективнішу точку прикладання зусиль для покращення стану довкілля, натомість модель DERR зручна тим, що вона є лінійною. Вона дозволяє побудувати чітку схему, наприклад, взяли завод (D) - вирахували його викиди (E) - оцінили шкоду лісу поруч (R) - запропонували модернізацію очищення (R).

3. Методологія розрахунку та агрегування інтегральних екологічних індексів

3.1. Необхідність агрегування даних: від вимірювань до індексів

На станції моніторингу ми отримуємо масив даних: концентрації SO₂, NO_x, пилу, важких металів тощо. Для фахівця це інформативно, але для управлінця або громадянина потрібна єдина оцінка: «екологічний стан задовільний» або «критичний».

Інтегральний індекс – це відносна величина, що характеризує сукупний вплив групи чинників на стан довкілля.

3.2. Алгоритм розрахунку інтегрального індексу

Процес розрахунку складається з чотирьох обов'язкових етапів:

1. Нормування (Стандартизація):

Оскільки різні речовини мають різні одиниці виміру та рівні токсичності, їх не можна просто додавати. Використовується відношення фактичної концентрації (C_i) до гранично допустимої (ГДК_{*i*}):

$$q_i = \frac{C_i}{ГДК_i}$$

Це робить усі показники безрозмірними.

2. Вагування (Присвоєння вагових коефіцієнтів w_i):

Не всі речовини однаково небезпечні. Наприклад, ртуть значно токсичніша за пил. Експертним шляхом або за класом безпеки кожному компоненту присвоюється «вага». Сума всіх ваг має дорівнювати одиниці

$$\sum w_i = 1.$$

3. Агрегування (Згортання):

Найчастіше використовується метод середньозваженої арифметичної:

$$I = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot q_i)$$

Або метод кореневого згортання (якщо потрібно виділити найбільш критичний показник).

4. Інтерпретація:

Отримане число порівнюється зі шкалою (наприклад: 0-1 – норма; 1-5 – підвищений ризик; >5 – надзвичайна ситуація).

3.3. Приклади найбільш вживаних індексів

ІЗА (Індекс забруднення атмосфери): Враховує концентрації 5-ти найбільш пріоритетних домішок, приведених до шкідливості діоксиду сірки.

ІЗВ (Індекс забруднення води): Розраховується за 6-ма обмеженими показниками (зазвичай БСК₅, нафтопродукти, азот амонійний та ін.).

EPI (Environmental Performance Index): Глобальний індекс, за яким складається рейтинг країн світу за екологічною ефективністю (розробляється Єльським та Колумбійським університетами).

ІЗА/ІЗА – це класичний комплексний показник, який використовується в Україні та країнах СНД для оцінки якості повітря в містах. Він враховує

концентрацію n речовин (зазвичай 5 найбільш пріоритетних для даного міста), приведених до шкідливості діоксиду сірки.

$$IZA = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{ГДК_i} \right)^{a_i},$$

де a_i – коефіцієнт, що залежить від класу небезпеки речовини. Інтерпретація: < 5 – низьке; $5-7$ – підвищене; $7-14$ – високе; > 14 – дуже високе забруднення. Дані за цим індексом [публікує](#) Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського.

ІЗВ / ІЗВ – це базовий гідрохімічний показник, який десятиліттями був основним в українській системі моніторингу водних ресурсів. Він дозволяє звести багатокомпонентний хімічний аналіз проби води до одного числа.

Методика розрахунку

Для розрахунку ІЗВ обов'язково беруться 6 показників: розчинений кисень (критично важливий для життя водних біоресурсів), БСК₅ (Біологічне споживання кисню за 5 діб – показник органічного забруднення) та 4 найбільш пріоритетні для даної водойми забруднювачі (наприклад, нафтопродукти, феноли, азот амонійний, важкі метали).

$$IZV = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{C_i}{ГДК_i}$$

Важливо: Для розчиненого кисню розрахунок зворотний (чим його менше, тим гірший індекс).

Класифікація якості води за ІЗВ

Отримане значення дозволяє віднести водний об'єкт до одного з класів якості:

Значення ІЗВ	Клас якості	Характеристика стану
≤ 0.3	I	Дуже чиста
0.3 – 1.0	II	Чиста
1.0 – 2.5	III	Помірно забруднена
2.5 – 4.0	IV	Забруднена
4.0 – 10.0	V	Брудна
> 10.0	VI	Надзвичайно брудна

Сьогодні в Україні відбувається перехід від системи ІЗВ до оцінки за Водною рамковою директивою ЄС (ВРД).

ІЗВ оцінює лише хімічний склад («хімічний статус»). ВРД ЄС вимагає оцінки «екологічного статусу», куди входять не тільки хімікати, а й стан риб, макрофітів (рослин) та безхребетних.

Офіційні дані щодо ІЗВ річок України публікує Державне агентство водних ресурсів (Держводагентство). У них є [інтерактивна карта](#)

EPI – Environmental Performance Index) – це головний глобальний рейтинг країн, що розробляється науковцями Єльського ([Yale](#)) та Колумбійського університетів. Він оцінює держави за 40 показниками у 11 категоріях (життєздатність екосистем, зміна клімату, здоров'я населення).

Суть: Країни отримують бал від 0 до 100. Це дозволяє порівняти, наприклад, екологічну політику України та Швеції на макрорівні.

Значення: ЕРІ використовується інвесторами та міжнародними організаціями (ООН, Світовий банк) для оцінки сталого розвитку регіону., де можна побачити стан води в різних басейнах.

Європейський індекс якості повітря (European Air Quality Index) – це сучасний динамічний індекс, розроблений Європейським екологічним агентством (ЕЕА). На відміну від ІЗА, він відображає ситуацію в реальному часі на основі даних автоматизованих станцій моніторингу. Показники: Базується на 5 ключових забруднювачах: PM10, PM2.5, O₃, NO₂, SO₂.

Візуалізація: Використовує кольорову шкалу (від бірюзового – "Good" до темно-червоного – "Extremely Poor").

Порівняльна таблиця індексів

Назва	Середовище / Сфера	Масштаб	Періодичність	Головне призначення
ІЗА (ІЗА)	Атмосферне повітря	Місто / Регіон	Місяць / Рік	Статистична звітність, аналіз багаторічних трендів забруднення міст.
ІЗВ (ІЗВ)	Поверхневі води	Річковий басейн / Ствол	Квартал / Рік	Оцінка гідрохімічного стану водойм, класифікація придатності води для використання.
AQI (EU)	Атмосферне повітря	Станція / Місто	Щогодини (Real-time)	Оперативне інформування населення, прийняття термінових заходів (обмеження руху авто тощо).
ЕРІ	Комплексна (Біосфера)	Країна / Світ	2 роки	Політичне стратегування, порівняння екологічної ефективності держав, залучення інвестицій.

Важливе зауваження («Пастка агрегування»):

Якщо один показник перевищує норму в 20 разів, а десять інших – у нормі, середній індекс може вийти «позитивним». Тому в моніторингу завжди діє принцип лімітуючого фактора: критичне перевищення навіть одного параметра має ставати сигналом тривоги.

Таким чином інтегральні індекси – це мова спілкування еколога з політиком та суспільством. Вони спрощують складність природи до зрозумілих індикаторів, на основі яких виділяються кошти на екологічні програми.

4. Застосування результатів моніторингу в екологічному управлінні

Інтегрований моніторинг (ІМД) є фундаментом для прийняття управлінських рішень на всіх рівнях: від окремого підприємства до національної стратегії. Результати аналізу за моделлю DPSIR та значення інтегральних індексів використовуються у наступних сферах:

4.1. Основні напрями застосування

Стратегічне планування: Визначення пріоритетних екологічних цілей країни (наприклад, перехід до "Кліматичної нейтральності").

Дозвільна діяльність: Обґрунтування видачі (або відмови) у дозволах на викиди та спеціальне водокористування на основі кумулятивного ефекту забруднення.

Територіальний розвиток: Гігієнічне обґрунтування розміщення нових промислових зон та житлової забудови.

Інформування та безпека: Оперативне попередження населення про смог, аварійні викиди або забруднення джерел питного водопостачання.

4.2. Сводна таблиця: Від даних моніторингу до управлінської дії

Рівень управління	Що аналізуємо (Інструмент)	Управлінська дія (Результат)	Приклад (Кейс)
Локальний	Показник Експозиції (Е в DERR)	Впровадження очисних технологій	Встановлення електрофільтрів на трубах ТЕС при перевищенні ГДК.
Регіональний	Індекси ІЗА / ІЗВ	Зміна просторових планів (Генпланів)	Заборона будівництва житла в зонах з "Високим" рівнем забруднення повітря.
Національний	Модель DPSIR	Зміна законодавства та податків	Введення податку на CO ₂ для стимулювання декарбонізації промисловості.
Глобальний	Індекс EPI	Міжнародні інвестиції та рейтинги	Надання зелених кредитів від ЄБРР для модернізації муніципального транспорту.

4.3. Цифрові інструменти інтегрованого моніторингу в Україні

Для практичного ознайомлення рекомендую студентам використовувати наступні офіційні ресурси, де дані інтегрованого моніторингу представлені у форматі "Open Data":

[ЕкоСистема](#) (Міндовкілля України): Єдина екологічна платформа, що об'єднує всі державні реєстри та дані моніторингу.

[SaveEcoBot](#): Перший в Україні екологічний бот та карта, що агрегує дані з державних та громадських постів моніторингу повітря в реальному часі.

[EcoCity](#): Найбільша мережа громадського моніторингу якості повітря в Україні з можливістю перегляду детальних індексів (AQI).

[OpenData.Gov.Ua](#) (Набір даних про довкілля): Портал відкритих даних, де можна скачати масиви вимірювань для наукової обробки.

Контрольні питання

1. У чому полягає принципова відмінність інтегрованого моніторингу довкілля від традиційного відомчого (галузевого) підходу?

2. Охарактеризуйте три рівні інтеграції моніторингових даних (об'єктний, територіальний, інформаційний). На якому з них приймаються стратегічні державні рішення?

3. Розкрийте зміст кожного елемента ланцюга DPSIR на прикладі проблеми забруднення міського повітря автомобільним транспортом.

4. Поясніть специфіку моделі DERR. Чому ланка «Exposure» (Експозиція) є критично важливою для оцінки екологічної безпеки?

5. Опишіть алгоритм згортання екологічної інформації. Навіщо потрібен етап нормування показників перед їх агрегуванням? враховується клас небезпеки забруднюючої речовини при розрахунку Індексу забруднення атмосфери?

6. Які два гідрохімічні показники є обов'язковими (константними) для розрахунку Індексу забруднення води, незалежно від типу водойми?

7. Поясніть ризики використання середньозважених інтегральних індексів. Як принцип «лімітуючого фактора» допомагає уникнути помилкових висновків?

8. Для яких цілей використовується Індекс екологічної ефективності (ЕРІ) і чим він відрізняється від оперативних індексів на кшталт AQI?

9. Наведіть приклади того, як дані інтегрованого моніторингу впливають на економічну політику держави (податки, інвестиції, дозволи).

10. Проаналізуйте роль інформаційного рівня інтеграції даних у системі державного моніторингу: як створення єдиного екологічного інформаційного простору впливає на ефективність екологічної політики держави?

11. Опишіть методологію вибору вагових коефіцієнтів при агрегуванні екологічних показників в єдиний індекс: як суб'єктивність експертних оцінок може вплинути на підсумковий результат моніторингу?

12. Проаналізуйте практичне застосування Індексу забруднення атмосфери (ІЗА) для порівняльної оцінки екологічного стану різних промислових центрів України, враховуючи специфіку локальних викидів.

13. Обґрунтуйте необхідність використання принципу «лімітуючого показника» при розрахунку комплексних індексів якості вод: чому середньоарифметичне значення може приховувати реальну екологічну небезпеку?

15. Розкрийте механізм використання інтегральних екологічних індексів у стратегічному плануванні розвитку територій та при проведенні процедури Стратегічної екологічної оцінки (СЕО).

Лекція 7

ЕКОЛОГІЧНИЙ АУДИТ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ (ISO 14001). ОСНОВИ, ЕТАПИ, ВИМОГИ ДО ЕКОЛОГІЧНОЇ ЗВІТНОСТІ

Мета лекції: формування системних знань щодо методології побудови та функціонування систем екологічного управління (СЕУ) на підприємствах відповідно до міжнародного стандарту ISO 14001:2015. Вивчення етапів планування, операційного контролю та внутрішнього аудиту відповідності, а також засвоєння нормативних вимог до підготовки державної та корпоративної екологічної звітності для забезпечення прозорості та екологічної безпеки господарської діяльності.

План лекції:

1. Концептуальні засади та структура стандарту ISO 14001
2. Планування системи екологічного управління (СЕУ)
3. Впровадження та функціонування операційних процесів
4. Моніторинг, оцінювання та внутрішній аудит
5. Вимоги до екологічної звітності та процедура сертифікації

1. Концептуальні засади та структура стандарту ISO 14001

1.1. Еволюція підходів до екологічного управління

Розвиток методів управління взаємодією промисловості та довкілля пройшов через кілька принципово різних стадій, кожна з яких відображала тогочасний рівень наукових знань та суспільних вимог. На ранніх етапах індустріалізації панувала стратегія повного ігнорування екологічних наслідків, коли природні ресурси вважалися невичерпними, а здатність екосистем до самовідновлення – безмежною. У цей період жодних управлінських механізмів не існувало, а реакція на забруднення виникала лише у випадках масштабних катастроф або явного виснаження локальних ресурсів.

Ситуація почала змінюватися у 1960-х роках після низки резонансних екологічних криз, що призвело до появи концепції «контролю на кінці труби» (end-of-pipe). Управління зосереджувалося виключно на очищенні вже сформованих потоків відходів, викидів та скидів перед їх потраплянням у навколишнє середовище. Хоча цей підхід дозволив знизити гостроту забруднення в промислових зонах, він виявився економічно обтяжливим для бізнесу через високу вартість очисних споруд та не вирішував проблему суті утворення відходів. Фактично відбувалося лише переміщення забруднювачів з одного середовища до іншого: наприклад, очищення повітря фільтрами створювало проблему утилізації зібраного пилу.

Якісний стрибок відбувся у 1990-х роках, коли світова спільнота усвідомила переваги стратегії запобігання забрудненню (pollution prevention). Замість боротьби з наслідками акцент змістився на джерела виникнення проблем – технологічні процеси. Це стало підґрунтям для розробки серії

міжнародних стандартів ISO 14000, перший з яких був опублікований у 1996 році. Основною ідеєю стала інтеграція екологічних цілей у загальний менеджмент підприємства. Тепер екологічна ефективність розглядається не як додаткові витрати, а як спосіб підвищення конкурентоспроможності через економію сировини та енергії.

Сучасний етап еволюції характеризується переходом до циклічної економіки та концепції життєвого циклу продукції. Сьогодні екологічне управління не обмежується територією заводу, а охоплює весь шлях продукту: від видобутку сировини до остаточної утилізації споживачем. Стандарт ISO 14001 у редакції 2015 року закріплює цей підхід, вимагаючи від організацій враховувати ризики та можливості, пов'язані із зовнішнім середовищем та зміною клімату.

Етапи трансформації екологічного менеджменту наведено таблиці 1.

Таблиця 1. Етапи розвитку екологічного управління

Період	Домінуюча концепція	Основний інструмент управління	Характер дій
До 1960-х рр.	Повне ігнорування	Відсутній	Реактивний (відсутність реакції)
1960–1980 рр.	Контроль на «кінці труби»	Очисні споруди, фільтри, нормування викидів	Реактивний (боротьба з наслідками)
1990–2010 рр.	Запобігання забрудненню	Системи екологічного управління (ISO 14001), еко-аудит	Превентивний (вплив на процеси)
З 2015 р.	Сталий розвиток	Аналіз життєвого циклу, декарбонізація, ESG-стратегії	Проактивний (стратегічне планування)

Наступним кроком у вивченні стандарту є аналіз його технічної структури та термінологічного апарату, що забезпечує єдність розуміння вимог на міжнародному рівні.

1.2. Сфера застосування, термінологія та нормативні посилання стандарту ISO 14001:2015

Стандарт ISO 14001:2015 є універсальним інструментом, оскільки його вимоги не залежать від розміру організації, форми власності, географічного розташування чи специфіки галузі (промисловість, послуги, державне управління). Сфера застосування стандарту охоплює всі екологічні аспекти діяльності, продукції або послуг, які організація може контролювати або на які вона може впливати з урахуванням концепції життєвого циклу. Важливо зауважити, що стандарт не встановлює абсолютних показників екологічної результативності (наприклад, конкретних лімітів на викиди), а вимагає від організації зобов'язання щодо дотримання відповідного законодавства та постійного вдосконалення власної системи.

Для забезпечення єдиного розуміння вимог на міжнародному рівні стандарт впроваджує чітко регламентований термінологічний апарат. Центральне місце займає поняття «екологічного аспекту» – це елемент діяльності або продукції, який взаємодіє з довкіллям. Саме аспекти є причиною виникнення «екологічних впливів» – будь-яких змін у

навколишньому середовищі (негативних чи позитивних). Наприклад, споживання електроенергії є аспектом, а виснаження природних ресурсів та викиди парникових газів при її генерації – пов'язаним впливом. Розуміння цього причинно-наслідкового зв'язку є критичним для проведення екологічного аудиту.

Нормативною основою стандарту є так звана Структура високого рівня (High Level Structure – HLS), яка забезпечує повну сумісність ISO 14001 з іншими стандартами менеджменту, зокрема ISO 9001 (якість) та ISO 45001 (охорона праці). Це дозволяє підприємствам створювати інтегровані системи управління, уникаючи дублювання документації. Основним нормативним посиленням для впровадження CEY є настанови ISO 14004, які надають детальні рекомендації щодо реалізації кожної вимоги основного стандарту.

Особливе місце в термінології займає поняття «ризиків та можливостей». Стандарт вимагає від керівництва враховувати не лише внутрішні виробничі процеси, а й зовнішні чинники, такі як зміна клімату, зміна законодавства чи очікування громади. Таким чином, CEY перетворюється з технічного інструменту екологічного контролю на стратегічний механізм забезпечення життєздатності організації в умовах мінливих екологічних вимог.

1.3. Функціонування моделі PDCA (Plan-Do-Check-Act)

Методологічною основою стандарту ISO 14001:2015 є циклічна модель PDCA (Плануй – Роби – Перевірйай – Дій), також відома як цикл Демінга-Шухарта. Впровадження цієї моделі дозволяє організації не просто підтримувати систему екологічного управління в робочому стані, а забезпечувати її безперервний розвиток та адаптацію до нових викликів. На відміну від статичних інструкцій, модель PDCA створює динамічний механізм, де кожен завершений етап стає підґрунтям для наступного, більш якісного циклу управління.

Етап «Плануй» (Plan) є фундаментальним і охоплює встановлення екологічних цілей та процесів, необхідних для отримання результатів, що відповідають екологічній політиці організації. На цій стадії проводиться аналіз поточного стану довкілля, ідентифікуються законодавчі вимоги та оцінюються ризики. Важливим елементом планування є визначення ресурсів (людських, фінансових, технічних), які будуть задіяні для реалізації поставлених завдань.

Етап «Роби» (Do) передбачає практичне впровадження запланованих процесів. Це охоплює навчання персоналу, встановлення операційного контролю над виробничими лініями та налагодження систем комунікації. Важливо, щоб кожен працівник розумів свій внесок у систему екологічного управління, оскільки ефективність стандарту ISO 14001 залежить від скоординованих дій на всіх рівнях ієрархії підприємства.

Етап «Перевірйай» (Check) полягає у проведенні моніторингу та вимірюванні процесів відповідно до екологічної політики та цілей. Саме на цій стадії здійснюється збір даних, проводяться внутрішні аудити та оцінюється відповідність фактичних показників (наприклад, реального обсягу викидів)

запланованим нормативам. Результати перевірки документуються та передаються керівництву для аналізу.

Етап «Дій» (Act) замикає цикл і спрямований на вжиття заходів для постійного поліпшення результативності СЕУ. Якщо під час перевірки було виявлено відхилення або невідповідності, розробляються та впроваджуються коригувальні дії. Навіть за умови досягнення всіх цілей, організація шукає можливості для подальшої оптимізації процесів, що стає початком нового циклу планування.

Для візуалізації взаємодії елементів системи екологічного управління в межах стандарту нижче наведено таблицю 2 взаємозв'язку етапів моделі PDCA з розділами стандарту ISO 14001.

Таблиця 1.2. Структура циклу PDCA в контексті стандарту ISO 14001:2015

Фаза циклу PDCA	Розділ стандарту	Зміст діяльності
P – Plan (Планування)	Розділи 4, 5, 6	Визначення контексту, екологічних аспектів, ризиків та встановлення цілей.
D – Do (Виконання)	Розділи 7, 8	Забезпечення ресурсами, навчання, операційне управління та реагування на аварії.
C – Check (Перевірка)	Розділ 9	Моніторинг, вимірювання, внутрішній аудит та аналіз з боку керівництва.
A – Act (Покращення)	Розділ 10	Усунення невідповідностей та впровадження заходів із постійного вдосконалення.

Застосування моделі PDCA гарантує, що екологічні питання розглядаються не як окремі випадки, а як постійний процес, інтегрований у стратегічне управління бізнесом.

2. Планування системи екологічного управління (СЕУ)

2.1. Контекст організації та визначення потреб зацікавлених сторін

Визначення контексту організації є відправною точкою розробки СЕУ згідно з вимогами розділу 4 стандарту ISO 14001:2015. Під контекстом розуміється сукупність зовнішніх та внутрішніх чинників, які можуть впливати на здатність підприємства досягати запланованих екологічних результатів. Внутрішній контекст охоплює корпоративну культуру, наявні технології, фінансові можливості та рівень компетентності персоналу. Зовнішній контекст включає законодавче середовище, кліматичні умови регіону, економічну ситуацію та технологічні тренди в галузі. Системний аналіз цих чинників дозволяє керівництву зрозуміти, в яких умовах функціонує підприємство та які ризики виникають поза межами виробничих цехів.

Невід'ємною частиною аналізу контексту є ідентифікація зацікавлених сторін (стейкхолдерів) та їхніх очікувань. До зацікавлених сторін належать державні контролюючі органи, місцеві громади, інвестори, клієнти, постачальники та власні працівники підприємства. Очікування стейкхолдерів можуть бути як обов'язковими (виконання норм законодавства), так і

добровільними (наприклад, запит інвесторів на прозору звітність про викиди парникових газів). Важливим управлінським завданням є ранжування цих потреб та їх інтеграція в екологічну політику організації, оскільки ігнорування запитів громади або інвесторів може призвести до репутаційних втрат або фінансових санкцій.

Оцінка контексту не є одноразовою акцією; вона потребує періодичного перегляду в межах внутрішнього аудиту. Зміна політичної ситуації, підписання нових міжнародних екологічних угод (наприклад, Паризької угоди щодо клімату) або поява нових очисних технологій на ринку безпосередньо змінюють контекст організації. Такий проактивний підхід дозволяє підприємству не просто адаптуватися до змін, а використовувати їх як можливість для покращення екологічного іміджу та оптимізації витрат. Таким чином, чітке розуміння контексту стає фундаментом для наступного етапу планування – ідентифікації екологічних аспектів.

2.2. Методологія ідентифікації екологічних аспектів

Процес ідентифікації екологічних аспектів є найбільш відповідальним етапом планування СЕУ, оскільки помилки на цій стадії призводять до невірної визначення пріоритетів природоохоронної діяльності. Згідно з вимогами стандарту, організація повинна розглядати не лише штатні режими роботи, а й умови пуску, зупинки обладнання, технічного обслуговування, а також потенційні аварійні ситуації. Методологія ідентифікації базується на комплексному аналізі вхідних та вихідних потоків кожного виробничого процесу.

Для систематизації процесу ідентифікації зазвичай використовується поопераційний підхід. Виробничий цикл розбивається на окремі етапи (наприклад, приймання сировини, механічна обробка, фарбування, пакування), для кожного з яких складається перелік аспектів за наступними категоріями:

- викиди в атмосферне повітря (організовані та неорганізовані);
- скиди у водні об'єкти або системи водовідведення;
- утворення, збирання та зберігання відходів;
- забруднення земель та підземних вод;
- використання природних ресурсів та енергії;
- фізичні впливи (шум, вібрація, випромінювання).

Важливим аспектом методології є врахування принципу життєвого циклу. Це означає, що організація повинна ідентифікувати аспекти, на які вона може безпосередньо впливати через свої управлінські рішення, навіть якщо вони виникають за межами промислового майданчика. Прикладом є екологічні характеристики сировини від постачальників або можливість переробки продукції після завершення терміну її експлуатації споживачем. Такий підхід стимулює підприємства до співпраці з екологічно відповідальними контрагентами та розробки продукції, що легко утилізується.

Результатом цього етапу є Реєстр екологічних аспектів. Це живий документ, який потребує актуалізації при будь-яких змінах у технології,

розширенні асортименту або зміні законодавчих вимог. Реєстр слугує базою для подальшої оцінки впливів, оскільки кожен виявлений аспект повинен бути співвіднесений із конкретною зміною в довкіллі, яку він спричиняє. Наприклад, аспект «викиди діоксиду сірки» відповідає вплив «погіршення якості повітря та ризик виникнення кислотних дощів».

В таблиці 3 наведено приклад структуризації даних під час ідентифікації аспектів для умовного цеху металообробки:

Таблиця 3. Приклад ідентифікації аспектів та впливів

Виробнича операція	Екологічний аспект	Екологічний вплив	Тип умови
Механічна обробка	Утворення металевої стружки	Виснаження ресурсів (при втраті вторинної сировини)	Штатна
Охолодження інструменту	Використання мастильно-охолоджувальних рідин	Ризик забруднення ґрунту та вод при проливах	Аварійна
Фарбування	Викиди летких органічних сполук (ЛОС)	Погіршення стану атмосферного повітря	Штатна
Зварювання	Споживання електроенергії	Виснаження невідновлюваних енергоресурсів	Штатна

2.3. Критерії визначення суттєвості екологічних аспектів

Процес оцінки суттєвості екологічних аспектів є центральним етапом аналітичної роботи при побудові СЕУ. Оскільки велике підприємство може ідентифікувати сотні аспектів, ресурсне обмеження не дозволяє однаково інтенсивно керувати кожним із них. Стандарт ISO 14001 вимагає розроблення чіткої методики, яка дозволяє виокремити «суттєві» аспекти – ті, що спричиняють або можуть спричинити значний вплив на довкілля. Саме на ці аспекти спрямовуються основні фінансові та управлінські ресурси, встановлюються екологічні цілі та розробляються програми моніторингу.

Методологія оцінки зазвичай базується на системі бальних оцінок за визначеними критеріями. Найбільш поширеним є метод множення показників, де підсумковий ранг аспекту (R) розраховується як добуток декількох факторів. Основними критеріями оцінювання є:

- масштаб впливу: територія поширення (локальний, регіональний чи глобальний рівень);
- інтенсивність: ступінь порушення компонентів довкілля (наприклад, перевищення ГДК у декілька разів);
- ймовірність виникнення: частота прояву аспекту (постійно під час техпроцесу, періодично або лише при аваріях);
- тривалість: час, протягом якого діє вплив, та швидкість відновлення екосистеми.

Окрім суто екологічних критеріїв, організація повинна враховувати ділові та законодавчі чинники. Навіть якщо з технічного погляду вплив аспекту є незначним, він може бути визнаний суттєвим, якщо його регулювання жорстко закріплене в законодавстві (наприклад, обов'язковість ліцензування небезпечних відходів) або якщо цей аспект є критичним для зацікавлених сторін. Недотримання вимог громади щодо рівня шуму може

призвести до блокування роботи підприємства, що автоматично підвищує статус суттєвості даного аспекту для менеджменту.

Нижче наведено приклад матриці оцінювання, яка використовується для ранжування аспектів (табл.4).

Таблиця 4. Матриця оцінки суттєвості екологічних аспектів (приклад)

Критерій	Опис (1 бал)	Опис (3 бали)	Опис (5 балів)
Законодавство	Вимоги відсутні	Рекомендаційні норми	Суворі законодавчі ліміти
Частота	Рідко (раз на рік)	Періодично (раз на місяць)	Постійно (щозміни)
Вплив на довкілля	Легко відновлюваний	Потребує часу на відновлення	Незворотні зміни
Репутація	Не викликає зацікавленості	Зауваження від громадськості	Судові позови, протести

Підсумкова оцінка розраховується як сума або добуток балів. Організація встановлює «пори́г суттєвості» (наприклад, усі аспекти, що набрали понад 15 балів). Усі аспекти, що перевищили цей поріг, офіційно визнаються суттєвими, і для них обов'язково розробляються заходи з операційного контролю або стратегічні цілі щодо їх зниження. Такий підхід забезпечує наукову обґрунтованість екологічного аудиту та раціональне використання коштів на природоохоронні заходи.

2.4. Встановлення екологічних цілей та розробка програм їх досягнення

Після ідентифікації та ранжування екологічних аспектів наступним етапом планування СЕУ є визначення конкретних екологічних цілей для тих аспектів, які були визнані суттєвими. Згідно з вимогами стандарту ISO 14001:2015, екологічна ціль – це загальна мета організації, яка узгоджується з екологічною політикою та має бути досягнута протягом певного періоду. Встановлення цілей перетворює декларативні наміри керівництва на вимірювані завдання для виробничих підрозділів.

Для того щоб екологічні цілі були ефективними, вони повинні відповідати критеріям методики SMART:

– конкретність (Specific): чітке визначення того, що саме має бути покращено (наприклад, не «зменшити викиди», а «знизити викиди діоксиду азоту від котельні»);

– вимірюваність (Measurable): наявність показників, які дозволяють зафіксувати прогрес у кількісному або якісному вираженні (відсотки, тони, концентрації);

– досяжність (Achievable): ціль повинна бути реалістичною, враховуючи наявні технологічні можливості та фінансові ресурси підприємства;

– релевантність (Relevant): узгодженість із екологічною політикою та загальною стратегією розвитку бізнесу;

– визначеність у часі (Time-bound): встановлення конкретних термінів виконання (квартал, рік, п'ятирічна програма).

Реалізація встановлених цілей здійснюється через розробку «Програм екологічного управління» (або планів заходів). Програма є внутрішнім документом, який деталізує шлях до досягнення цілі. Вона обов'язково повинна містити опис технічних заходів, призначення відповідальних осіб за кожен етап, графік фінансування та очікувані результати. Наприклад, якщо ціллю є зниження обсягу утворення відходів на 10%, програма може передбачати заміну пакувальної лінії, навчання персоналу правилам сортування та укладання договорів із новими підприємствами-утилізаторами.

Важливою вимогою стандарту є періодичний перегляд цілей. Якщо в процесі моніторингу виявляється, що ціль недосяжна через зміну обставин (наприклад, через економічну кризу або зміну технології), вона повинна бути скоригована. Результати виконання екологічних програм є основним об'єктом перевірки під час зовнішнього сертифікаційного аудиту, оскільки саме вони демонструють реальну результативність системи екологічного управління, а не лише її документальну наявність.

3. Впровадження та функціонування операційних процесів

3.1. Розподіл ролей, відповідальності та повноважень

Ефективність системи екологічного управління безпосередньо залежить від чіткої організаційної структури та розподілу функцій між персоналом. Згідно з вимогами стандарту ISO 14001, вище керівництво повинно не лише затверджувати екологічну політику, а й забезпечувати наявність ресурсів та призначати відповідальних осіб за впровадження СЕУ. Важливою умовою є інтеграція екологічних обов'язків у посадові інструкції працівників усіх рівнів – від головного інженера до оператора виробничої лінії.

У межах функціонування системи зазвичай виділяють наступні рівні відповідальності:

- вище керівництво: визначає стратегічні цілі, проводить аналіз результативності системи та забезпечує фінансування природоохоронних заходів;

- представник керівництва з СЕУ (еколог-менеджер): координує розробку документації, організовує навчання та звітує перед директором про функціонування системи;

- керівники підрозділів: відповідають за дотримання технологічних регламентів та екологічних норм безпосередньо на робочих місцях;

- виконавці: зобов'язані дотримуватися інструкцій з поводження з відходами, енергозбереження та реагування на аварійні ситуації.

Такий ієрархічний підхід дозволяє уникнути ситуацій, коли відповідальність за екологічні порушення покладається виключно на екологічну службу, тоді як фактичний вплив на довкілля здійснюється виробничим персоналом.

3.2. Регламентація операційного контролю

Операційний контроль є практичним механізмом управління суттєвими екологічними аспектами, визначеними на етапі планування. Його сутність

полягає у встановленні та підтримці задокументованих процедур (регламентів, інструкцій), які дозволяють мінімізувати відхилення від екологічних норм під час виконання робіт. Операційний контроль охоплює не лише виробничі операції, а й процеси закупівлі сировини, пакування, транспортування та управління підрядниками.

Основними інструментами операційного контролю є:

- технологічні регламенти: встановлення оптимальних параметрів роботи обладнання (температура, тиск, витрата палива), за яких забезпечується мінімальний викид забруднюючих речовин;
- інструкції з поводження з відходами: чіткий опис процедур збирання, маркування, тимчасового зберігання та передачі відходів на утилізацію;
- екологічні критерії закупівель: вибір постачальників сировини з урахуванням її токсичності та можливості вторинної переробки пакування.

Особлива увага приділяється операціям, де ризик впливу на довкілля є найбільш високим. Для таких процесів розробляються контрольні карти, де фіксуються допустимі межі відхилень показників. У разі виходу за межі встановлених критеріїв персонал повинен діяти за заздалегідь затвердженим алгоритмом коригувальних дій.

3.3. Забезпечення компетентності та обізнаності персоналу

Успіх СЕУ неможливий без належного рівня компетентності персоналу, чия робота може спричинити суттєвий вплив на довкілля. Стандарт ISO 14001 вимагає від організації визначення необхідного рівня кваліфікації для таких працівників та забезпечення його досягнення через навчання, стажування або залучення кваліфікованих фахівців. Компетентність повинна підтверджуватися відповідними дипломами, сертифікатами або результатами внутрішньої атестації.

Окрім професійної компетентності, важливим є рівень загальної екологічної обізнаності всіх працівників. Кожен співробітник повинен усвідомлювати:

1. Зміст екологічної політики підприємства.
2. Суттєві екологічні аспекти, пов'язані з його безпосередньою діяльністю.
3. Свій внесок у результативність системи та переваги від покращення екологічних показників.
4. Наслідки недотримання встановлених процедур СЕУ.

Програми обізнаності можуть включати регулярні інструктажі, публікацію екологічних бюлетенів, проведення тематичних тренінгів та семінарів. Такий підхід формує внутрішню корпоративну культуру, де екологічна безпека сприймається як невід'ємна частина професійної відповідальності, а не як зовнішній примус.

4. Моніторинг, оцінювання та внутрішній аудит

4.1. Процедури оцінювання результативності СЕУ та дотримання законодавчих вимог

Оцінювання результативності є критичним етапом, що дозволяє визначити фактичну ефективність системи екологічного управління. Згідно з вимогами розділу 9 стандарту ISO 14001:2015, організація повинна встановити об'єкти моніторингу, методи вимірювання та періодичність аналізу даних. Основна увага приділяється порівнянню реальних екологічних показників (обсяги викидів, енергоефективність, кількість відходів) із встановленими екологічними цілями.

Окремим обов'язковим елементом є процедура оцінювання відповідності законодавчим та іншим вимогам. Організація зобов'язана не лише знати чинне природоохоронне законодавство, а й документально підтверджувати його виконання. Результати таких оцінок фіксуються у звітах, які слугують доказовою базою під час проведення екологічного аудиту. Якщо виявляється невідповідність (наприклад, перевищення лімітів на скиди), організація повинна негайно розпочати процес вжиття коригувальних дій.

4.2. Методика проведення внутрішнього екологічного аудиту

Внутрішній аудит – це систематичний, незалежний та задокументований процес отримання доказів аудиту та їх об'єктивного оцінювання для визначення ступеня відповідності критеріям СЕУ. На відміну від зовнішньої перевірки, внутрішній аудит проводиться силами спеціально навчених працівників організації або залучених консультантів з метою самоперевірки та підготовки до сертифікації.

Методологія проведення внутрішнього аудиту охоплює три основні стадії:

1. Підготовка: розробка програми аудиту, визначення об'єктів перевірки (цехи, відділи) та формування чек-листів (контрольних списків питань).

2. Збір доказів: проведення інтерв'ю з персоналом, огляд робочих місць, перевірка журналів первинного обліку та результатів інструментальних вимірювань.

3. Оформлення результатів: порівняння зібраних фактів із вимогами стандарту. У разі виявлення відхилень оформлюється «Протокол невідповідності», де вказується суть порушення та встановлюються терміни його усунення.

Ефективний внутрішній аудит дозволяє виявити слабкі місця в системі до того, як вони призведуть до екологічних інцидентів або штрафних санкцій з боку державних органів.

5. Вимоги до екологічної звітності та процедура сертифікації

5.1. Види та структура державної екологічної звітності в Україні

Державна екологічна звітність є інструментом статистичного та податкового контролю за використанням природних ресурсів та обсягами

забруднення. В Україні основними формами звітності, які зобов'язані подавати підприємства-забруднювачі, є:

– Звіт про викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря (форма № 2-ТП (повітря)): містить дані про фактичні маси викидів від стаціонарних джерел у розрізі кожної речовини;

– Звіт про використання води (форма № 2-ТП (водгосп)): відображає обсяги забраної води, її використання та обсяги скидання зворотних вод у водні об'єкти.

– Звіт про відходи (форма № 1-відходи): включає інформацію про утворення, поводження та передачу відходів спеціалізованим підприємствам.

Дані цих звітів повинні суворо відповідати записам у журналах первинного обліку (наприклад, форма ПОД-1, ПОД-2). Достовірність звітності є критичною, оскільки на її основі розраховується екологічний податок. Подання недостовірних даних або порушення термінів подачі тягне за собою адміністративну відповідальність.

5.2. Стандарти корпоративної нефінансової звітності (ESG, GRI)

Окрім обов'язкової державної звітності, сучасні підприємства все частіше впроваджують добровільну корпоративну звітність. Найбільш поширеними є стандарти GRI (Global Reporting Initiative) та концепція ESG (Environmental, Social, and Governance). Такі звіти демонструють інвесторам та партнерам стратегічний підхід компанії до сталого розвитку. Екологічний блок у таких звітах зазвичай включає показники вуглецевого сліду (викиди CO₂), питомих споживання води на одиницю продукції та інвестиції в «зелені» технології.

5.3. Етапи зовнішнього сертифікаційного аудиту за стандартом ISO 14001

Зовнішній аудит проводиться незалежним акредитованим органом із сертифікації для підтвердження того, що СЕУ організації відповідає вимогам міжнародного стандарту. Процедура зазвичай складається з двох етапів:

1. Перший етап (Audit Stage 1): аналіз документації (екологічна політика, реєстр аспектів, процедури). Аудитор перевіряє готовність організації до повної перевірки.

2. Другий етап (Audit Stage 2): перевірка впровадження системи на місцях. Аудитори відвідують виробничі майданчики, перевіряють роботу очисних споруд та спілкуються з рядовим персоналом.

За результатами аудиту приймається рішення про видачу сертифіката відповідності терміном на 3 роки. Протягом цього періоду орган із сертифікації проводить щорічні наглядові аудити для підтвердження того, що система продовжує ефективно функціонувати та розвиватися.

Контрольні питання

1. Проаналізуйте історичну трансформацію підходів до охорони довкілля: у чому полягає економічна та екологічна перевага стратегії запобігання забрудненню над стратегією «контролю на кінці труби»?

2. Розкрийте зміст та призначення Структури високого рівня (HLS) у стандартах ISO. Яким чином вона сприяє інтеграції системи екологічного управління з іншими системами менеджменту підприємства?

3. Дайте детальну характеристику циклу PDCA. Поясніть, як взаємозв'язок етапів «Перевірка» (Check) та «Дія» (Act) забезпечує динамічний розвиток системи екологічного управління.

4. Обґрунтуйте важливість аналізу внутрішнього та зовнішнього контексту організації при розробці CEY. Які чинники контексту можуть стати критичними для підприємства енергетичної галузі?

5. Поясніть різницю між поняттями «екологічний аспект» та «екологічний вплив». Наведіть 5 прикладів таких пар для промислового об'єкта, враховуючи штатні та аварійні умови.

6. Опишіть методика оцінки суттєвості екологічних аспектів. Чому важливо використовувати не лише екологічні, а й юридичні та репутаційні критерії при їх ранжуванні?

7. Сформулюйте вимоги до екологічних цілей за методикою SMART. Наведіть приклад некоректно сформульованої цілі та запропонуйте її правильний варіант відповідно до стандарту ISO 14001.

8. Розкрийте роль вищого керівництва у функціонуванні CEY. Які обов'язки лідера не можуть бути делеговані екологічній службі підприємства?

9. Проаналізуйте механізм реалізації операційного контролю на підприємстві. Яким чином екологічні критерії інтегруються в технологічні регламенти виробництва?

10. Опишіть процедуру забезпечення компетентності персоналу. Як екологічна обізнаність рядових працівників впливає на результативність сертифікаційного аудиту?

11. Розкрийте методологію проведення внутрішнього екологічного аудиту. Які типи доказів вважаються найбільш вагомими при перевірці відповідності системи встановленим вимогам?

12. Дайте характеристику державній статистичній звітності у сфері охорони повітря та води в Україні. Які первинні документи є базою для заповнення форм № 2-ТП?

13. Проаналізуйте значення корпоративної нефінансової звітності (ESG, GRI) для сучасного бізнесу. Чим така звітність відрізняється від обов'язкових державних звітів?

14. Опишіть алгоритм підготовки та проведення зовнішнього сертифікаційного аудиту. У чому полягає головна відмінність між першим та другим етапами сертифікації?

15. Обґрунтуйте необхідність врахування концепції життєвого циклу продукції при впровадженні CEY. Як організація може впливати на екологічні аспекти своїх постачальників та споживачів?

Лекція 8, 9

ЕКОЛОГІЧНА ПАСПОРТИЗАЦІЯ ТЕРИТОРІЙ ТА ПІДПРИЄМСТВ. РОЛЬ ПАСПОРТИЗАЦІЇ У СИСТЕМІ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ

Частина 1

Мета лекції: формування системних знань щодо правових, теоретичних та методичних засад екологічної паспортизації промислових об'єктів як інструменту державного обліку техногенного навантаження. Передбачається вивчення структури, порядку розробки та актуалізації екологічних паспортів підприємств, а також опанування нормативних вимог до спеціалізованої паспортизації у сфері поводження з відходами.

План лекції

1. Теоретико-правові основи екологічної паспортизації
2. Екологічний паспорт промислового підприємства
3. Спеціалізована паспортизація у сфері поводження з відходами

Частина 2

Мета лекції: вивчення методологічних засад складання екологічних паспортів адміністративно-територіальних одиниць та об'єктів природно-заповідного фонду. Розглядаються механізми інтеграції паспортних даних у державні геоінформаційні системи, а також визначається роль паспортизації як інформаційного фундаменту для систем екологічного моніторингу та державного контролю.

План лекції

1. Екологічна паспортизація адміністративно-територіальних одиниць
2. Специфіка паспортизації особливих природних територій
3. Інтеграція паспортизації в систему екологічного моніторингу
4. Роль паспортизації у системі державного та внутрішнього контролю

Ч.1.1. Теоретико-правові основи екологічної паспортизації

1.1. Поняття, сутність та завдання екологічної паспортизації в системі природокористування

Екологічна паспортизація є комплексним науково-технічним та управлінським інструментом, спрямованим на фіксацію та аналіз кількісних і якісних показників взаємодії об'єкта господарювання з навколишнім природним середовищем. Сутність процесу полягає у зведенні розрізнених технологічних, сировинних, енергетичних та природоохоронних параметрів підприємства в єдиний нормативно-технічний документ – екологічний паспорт.

Основним завданням екологічної паспортизації в системі природокористування є створення верифікованого інформаційного фундаменту для прийняття управлінських рішень як на рівні самого

підприємства, так і на рівні державних органів контролю. Паспорт дозволяє вирішувати наступні завдання:

- оцінка відповідності фактичних технологічних процесів чинним екологічним стандартам та нормативам найкращих доступних технологій;
- визначення реальної структури та обсягів споживання природних ресурсів (водних, земельних, мінерально-сировинних) на одиницю випущеної продукції;
- виявлення прихованих резервів виробництва для впровадження маловідхідних та енергоефективних технологічних рішень;
- забезпечення прозорості та порівнянності екологічних даних підприємства при проведенні процедур екологічного аудиту, страхування або сертифікації.

В ієрархічній системі управління природокористуванням екологічний паспорт виконує роль сполучної ланки між етапом проектування (оцінки впливу на довкілля) та етапом безпосередньої експлуатації об'єкта. Завдяки наявності чітко зафіксованих паспортних характеристик стає можливим прогнозування поведінки підприємства при зміні режимів роботи, збільшенні виробничих потужностей або виникненні аварійних ситуацій.

Паспортизація також виступає засобом превентивного контролю. Регулярний аналіз паспортних даних дозволяє відстежувати тенденції зміни техногенного навантаження, виявляти процеси морального та фізичного зносу очисного обладнання, а також своєчасно коригувати екологічну стратегію підприємства для запобігання критичному забрудненню навколишнього середовища.

1.2. Нормативно-правове регулювання паспортизації об'єктів господарювання в Україні

Нормативно-правова база екологічної паспортизації в Україні базується на комплексі законодавчих актів та технічних стандартів, які регламентують обов'язковість обліку техногенного впливу на довкілля. Правою основою цього процесу є [Закон України](#) «Про охорону навколишнього природного середовища». Згідно зі статтями цього закону, суб'єкти господарської діяльності зобов'язані вести первинний облік та мати екологічні паспорти, що підтверджують відповідність їхньої діяльності вимогам екологічної безпеки.

Технічним фундаментом для розробки екологічного паспорта промислового об'єкта є міждержавний стандарт ДСТУ 3149-95 «Охорона природи. Екологічний паспорт підприємства. Основні положення. Знаки та коди». Цей стандарт чітко визначає типову форму документа, вимоги до його наповнення, а також правила кодування інформації для забезпечення сумісності екологічних даних на загальнодержавному рівні. Крім загального екологічного паспорта, діяльність підприємств регулюється пооб'єктними нормативними актами, зокрема Водним кодексом та Законом України «Про охорону атмосферного повітря», які вимагають наявності спеціалізованих паспортів для водозабірних споруд, очисних систем та пилогазоочисних установок (ПГУ).

Сучасний етап розвитку законодавства України характеризується активною адаптацією до норм Європейського Союзу, зокрема в межах імплементації Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди (інтегроване запобігання та контроль забруднення). Це призводить до поступової трансформації класичних паперових паспортів у цифрові інтегровані бази даних. Процес паспортизації тісно пов'язаний із процедурою отримання Інтегрованого довкільного дозволу для великих підприємств-забруднювачів. Відсутність затвердженого екологічного паспорта або наявність у ньому недостовірних даних унеможлиблює проходження державної екологічної експертизи та ОВД (оцінки впливу на довкілля) при модернізації виробництва.

За порушення вимог щодо ведення екологічних паспортів, невиконання умов паспортизації або подання викривленої інформації керівництво підприємства несе адміністративну відповідальність згідно з Кодексом України про адміністративні правопорушення (КУпАП). Контроль за наявністю, актуальністю та правильністю ведення паспортів покладено на Державну екологічну інспекцію України, яка здійснює планові та позапланові перевірки суб'єктів

1.3. Принципи формування інформаційної бази для екологічного паспорта

Формування інформаційної бази екологічного паспорта є багатокомпонентним процесом, який базується на зборі, систематизації та верифікації первинних даних про виробничу діяльність підприємства. Якість і достовірність наповнення цього документа визначають його практичну цінність для систем внутрішнього менеджменту та державного екологічного контролю. Побудова інформаційного масиву здійснюється на основі ряду обов'язкових методологічних принципів, що забезпечують системність та об'єктивність відображених показників.

Основними принципами формування інформаційної бази є:

Принцип вірогідності та інструментальної підтверженості: усі кількісні показники викидів, скидів, обсягів утворення відходів та витрат сировини повинні базуватися на результатах прямих інструментальних вимірювань, сертифікованих методиках розрахунку або даних комерційного обліку. Використання приблизних або експертних оцінок без належного обґрунтування не допускається.

Принцип системності та матеріального балансу: інформаційна база розглядає підприємство як єдину геотехнічну систему. Будь-який вхідний потік матеріальних ресурсів (сировина, вода, паливо) має бути чітко простежений через виробничий цикл до вихідних потоків.

Принцип безперервності та актуалізації даних: інформація, що вноситься до паспорта, підлягає регулярному щорічному перегляду та оновленню. У разі реконструкції цехів, заміни технологічного устаткування або зміни складу сировини відповідні коригування мають бути внесені до бази даних негайно, щоб відображати реальний поточний стан об'єкта.

Принцип порівнянності та уніфікації: усі технічні, економічні та екологічні параметри наводяться в єдиній системі одиниць вимірювання (згідно з міжнародною системою SI) та кодуються відповідно до державних класифікаторів, що дозволяє інтегрувати паспорт у загальнодержавні інформаційні мережі.

Джерелами формування інформаційної бази слугують форми первинної документації (ПОД), матеріали інвентаризації джерел викидів забруднюючих речовин, звіти про науково-дослідні роботи з визначення технологічних нормативів, а також карти технологічних процесів. Крім того, до бази інтегруються картографічні матеріали – генплан підприємства з нанесеними джерелами техногенного навантаження, схемами мереж водопостачання, водовідведення та місцями тимчасового зберігання відходів. Такий комплексний підхід дозволяє виключити суперечності між екологічною документацією та фактичним станом виробництва.

1.4. Класифікація екологічних паспортів за об'єктами обліку та рівнями управління

Для забезпечення ефективного контролю та систематизації даних у масштабах держави екологічні паспорти класифікують за двома основними критеріями: за об'єктами обліку (що саме паспортизується) та за рівнями управління (на якому рівні узагальнюється інформація). Така структуризація дозволяє створити наскрізну систему екологічної інформації від конкретного верстата чи джерела викиду до великого промислового регіону.

За об'єктами обліку екологічні паспорти поділяються на три основні групи:

1. Паспорти технологічних процесів та обладнання: вузькоспеціалізовані документи, що складаються на конкретні агрегати – вони містять детальні технічні характеристики, показники проектної та фактичної ефективності роботи обладнання.

2. Паспорти підприємств (природокористувачів): комплексні документи, які узагальнюють техногенне навантаження всього промислового майданчика (включаючи всі цехи, допоміжні виробництва та очисні споруди) і відображають сумарний вплив суб'єкта господарювання на довкілля.

3. Паспорти відходів та об'єктів їх видалення: спеціалізовані документи, що фіксують фізико-хімічні властивості, клас небезпеки відходів, а також характеристики місць їх накопичення та захоронення.

За рівнями управління в системі природоохоронного менеджменту виділяють ієрархію паспортів наведену у таблиці 1.

Таблиця 1. Ієрархічна структура екологічної паспортизації

Рівень управління	Об'єкт паспортизації	Основні завдання рівня
Локальний (об'єктовий)	Окреме підприємство, цех, установка, полігон відходів.	Внутрішній операційний контроль, облік витрат ресурсів, дотримання встановлених підприємству лімітів.
Регіональний (територіальний)	Район, місто, область, басейн річки, об'єкт ПЗФ.	Аналіз сумарного техногенного навантаження на екосистеми регіону, ланування природоохоронних програм.

Національний (державний)	Галузь промисловості, державні кадастри природних ресурсів.	Стратегічне планування екологічної політики держави, ведення загальнонаціональних реєстрів забруднювачів.
--------------------------	---	---

Така класифікація забезпечує послідовну трансформацію первинних технічних даних локального рівня в узагальнені екологічні показники, на основі яких приймаються стратегічні рішення державного та міжнародного значення.

Ч.1.2. Екологічний паспорт промислового підприємства

Історично екологічна паспортизація підприємств в Україні базувалася на положеннях ГОСТ 17.0.0.04-90 «Охорона природи. Екологічний паспорт промислового підприємства». У сучасних умовах цей стандарт втратив практичне значення внаслідок реформування системи стандартизації та гармонізації екологічного законодавства України з нормами ЄС.

Нині екологічний облік і контроль діяльності підприємств здійснюються через систему спеціалізованої документації, до якої належать технічні паспорти відходів (ДСТУ 2195-99), паспорти пилогазоочисних установок, матеріали інвентаризації викидів, технологічні баланси та інші документи природоохоронного призначення. Зазначені документи використовуються під час екологічного контролю та оформлення інтегрованого довкіллевого дозволу.

2.1. Загальні відомості про підприємство та його виробнича структура в паспорті

Попри трансформацію нормативної бази, фундаментальний принцип побудови екологічної документації залишається незмінним: будь-який облік починається з чіткої ідентифікації суб'єкта господарювання та аналізу його внутрішньої побудови. Розділ загальних відомостей є юридично та технічно значущим етапом, оскільки він пов'язує масиви екологічних даних із конкретним промисловим майданчиком, його географічними координатами та правовим статусом.

У сучасній практиці екологічного проектування та підготовки документів для інтегрованого дозволу цей блок містить наступну обов'язкову інформацію:

– адміністративно-правова ідентифікація: повна та скорочена назва компанії, форма власності, реєстраційні коди у загальнодержавних реєстрах (ЄДРПОУ), коди видів економічної діяльності (КВЕД), а також точна прив'язка до кодифікатора адміністративно-територіальних одиниць (КАТОТТГ);

– просторово-географічні параметри: фізична адреса промислового майданчика, його геодезичні координати (для точного моделювання розсіювання викидів у геоінформаційних системах), загальна площа земельної ділянки та межі нормативної і фактичної санітарно-захисної зони (СЗЗ).

В описі виробничої структури у межах сучасного обліку підприємство розглядається не як єдине джерело забруднення, а як структурована геотехнічна система, розділена на три основні категорії підрозділів:

1. Основне виробництво: цехи та технологічні лінії, де відбувається безпосередній випуск цільової продукції (наприклад, плавильні печі, конвеєрні лінії, гальванічні ділянки). Для кожного з них фіксується проектна та фактична потужність.

2. Допоміжне виробництво: об'єкти, що забезпечують життєдіяльність підприємства (власні котельні, компресорні станції, ремонтні майстерні, гаражі та транспортні цехи). Часто саме допоміжні підрозділи є прихованими джерелами значних обсягів токсичних відходів (відпрацьовані мастила, акумулятори, шини).

3. Інфраструктура природоохоронного призначення: споруди оборотного водопостачання, локальні очисні споруди виробничих стічних вод, пилогазоочисні установки (ПГУ) та спеціально обладнані майданчики для тимчасового зберігання відходів.

Графічним ядром цього розділу є деталізований генеральний план підприємства. На ньому обов'язково експлікуються всі будівлі, вказуються внутрішні транспортні шляхи, а головне наносяться точки інструментального контролю: організовані джерела викидів (димарі, вентиляційні шахти), випуски стічних вод та контрольні точки на межі санітарно-захисної зони. Така структуризація дозволяє перейти від загального юридичного опису компанії до детального аналізу її матеріальних і технологічних потоків.

2.2. Порядок збору та верифікації вихідних даних для складання документа

Збір та верифікація вихідних даних є найбільш трудомістким етапом формування екологічної документації підприємства. Оскільки зібрані показники згодом лягають в основу розрахунків податкових зобов'язань (екологічного податку) та визначають умови майбутнього інтегрованого довкілльового дозволу, процес збору регламентується чітким алгоритмом. Будь-які неточності на цьому етапі можуть призвести до юридичних санкцій або заниження/завищення реальних обсягів екологічного навантаження.

Процедура збору вихідних даних складається з трьох послідовних стадій:

1. Етап ретроспективного аналізу документації: на цій стадії піднімаються та аналізуються наявні акти інвентаризації джерел викидів, матеріали гідрогеологічних вишукувань, технологічні паспорти наявного обладнання та звіти про результати раніше проведених виробничих інспекцій.

2. Етап натурних обстежень та вимірювань: проводиться безпосередній інструментальний контроль на промисловому майданчику. Залучені акредитовані лабораторії здійснюють заміри концентрацій забруднюючих речовин у газоходах, відбирають проби стічних вод до і після очисних споруд, а також фіксують рівні фізичного впливу (шум, вібрація) на межі санітарно-захисної зони.

3. Етап експлуатаційно-балансового обліку: здійснюється збір даних про фактичні витрати матеріальних ресурсів за звітний період (рік). Для цього аналізуються дані комерційних вузлів обліку води, газу та електроенергії, а також товарно-транспортні накладні на закупівлю сировини та передачу відходів контрагентам.

Ключовим елементом цього підрозділу є процедура верифікації даних. Отримані результати не можуть бути внесені до звітності без підтвердження їхньої логічної та математичної узгодженості. Верифікація здійснюється шляхом перехресного аналізу: наприклад, обсяг утворених золошлакових відходів перевіряється через математичний розрахунок виходячи з маси спаленого вугілля та його зольності, зафіксованої в сертифікатах якості палива.

Якщо результати прямих лабораторних замірів суттєво відхиляються від балансових розрахунків, це свідчить або про похибку вимірювальних приладів, або про наявність прихованих (неорганізованих) втрат сировини. У такому випадку призначається повторний аудит конкретного технологічного вузла. Лише після проходження всіх етапів верифікації сформований масив даних вважається легітимним і переноситься до профільних еколого-технологічних розділів.

2.3. Характеристика еколого-технологічних показників виробництва та матеріального балансу

Оцінка екологічної досконалості підприємства не може обмежуватися лише констатацією фінальних обсягів викидів чи скидів. Сучасний підхід, орієнтований на вимоги інтегрованого довкіллявого дозволу, вимагає детального аналізу взаємозв'язку між технологією виробництва та її екологічними наслідками за допомогою еколого-технологічних показників та побудови матеріального балансу.

Еколого-технологічні показники поділяються на дві основні групи:

1. Питомі показники утворення забруднюючих речовин та відходів: розраховуються як відношення маси утвореного забруднювача до одиниці випущеної продукції або переробленої сировини (наприклад, кг оксидів азоту на тонну виплавленої сталі, або кубічні метри стічних вод на тонну переробленого молока). Саме питомі показники дозволяють порівняти екологічну ефективність різних підприємств однієї галузі незалежно від їхніх масштабів.

2. Коефіцієнти ефективності очисних систем: показують ступінь уловлювання або нейтралізації шкідливих речовин пилогазоочисними установками (ПГУ) або локальними очисними спорудами (ЛОС). Розраховуються за формулою:

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

де C_{in} та C_{out} – концентрації забруднювача відповідно до і після очисної установки.

Методологічною основою для перевірки та зведення цих показників є матеріальний баланс виробничого процесу. Він базується на фундаментальному законі збереження маси: сумарна маса всіх речовин, що надходять у технологічну систему (вхідні потоки), повинна дорівнювати сумарній масі речовин, що виходять із неї (вихідні потоки), з урахуванням накопичення всередині системи.

При складанні екологічної документації матеріальний баланс розраховується як для підприємства в цілому, так і для окремих етапів (цехів, установок). Спрощена структура матеріального балансу промислового вузла має наступний вигляд (табл. 2):

Таблиця 2. Структура матеріального балансу технологічного процесу

Вхідні потоки (Маса, т/рік)	Вихідні потоки (Маса, т/рік)
1. Основна сировина та матеріали	1. Цільова (корисна) продукція
2. Допоміжні матеріали (реагенти, каталізатори)	2. Побічна продукція та супутні товари
3. Паливо та енергоносії (тверді, рідкі)	3. Технологічні втрати (випаровування, усушка)
4. Вода, що безпосередньо бере участь у реакціях	4. Екологічні втрати (викиди в атмосферу, скиди стічних вод, утворення щільних відходів)
РАЗОМ ВХІД: $\sum M_{in}$	РАЗОМ ВИХІД: $\sum M_{out}$

Обов'язковою умовою є дотримання рівності $\sum M_{in} = \sum M_{out}$. Якщо виникає дисбаланс (невідповідність мас), це свідчить про наявність неврахованих джерел витоків, прихованих аварійних втрат або про похибки інструментального контролю. Наявність деталізованого матеріального балансу дозволяє екологу чітко визначити, на якому саме етапі технологічного циклу виникають найбільші втрати сировини та утворюється токсичний надлишок, що є базою для розробки заходів із модернізації виробництва.

2.4. Облік використання земельних, водних та енергетичних ресурсів

Екологічна паспортизація сучасного підприємства передбачає детальний аудит обсягів та ефективності споживання природних ресурсів. Цей розділ є базою для розрахунку рентних платежів, екологічного податку та оцінки загальної еко-ефективності (ресурсомісткості) виробництва в рамках підготовки до отримання інтегрованого довкілцевого дозволу.

Облік ведеться за трьома основними природно-ресурсними компонентами:

1. Земельні ресурси та стан ґрунтового покриву

У цьому блоці фіксується правовий та екологічний статус території, що перебуває у користуванні підприємства:

- загальна площа промислового майданчика, розподіл земель за функціональним призначенням (виробничі зони, капітальна забудова, проїзди, внутрішні склади, зелені насадження);

- наявність, площа та стан об'єктів порушених земель (кар'єри, хвостосховища, відвали), а також накопичений обсяг знятого родючого шару ґрунту;

- характеристика покриття промислових майданчиків (асфальтобетон, бетонні плити, відкритий ґрунт), що безпосередньо впливає на коефіцієнт стоку дощових вод та ризик інфільтрації забруднюючих речовин у підземні водоносні горизонти.

2. Водні ресурси: водоспоживання та водовідведення

Облік водного господарства базується на побудові балансової схеми водоспоживання та водовідведення. Фіксації підлягають такі параметри:

- джерела водозабору: обсяги води, що вилучаються з поверхневих водних об'єктів, підземних свердловин або комунальних водомереж (на основі лімітів дозволу на спеціальне водокористування);

- якість води: технологічні вимоги до води на різних етапах виробництва та її фактичні фізико-хімічні показники;

- виробниче використання: розподіл води на господарсько-питні потреби, охолодження обладнання, безпосереднє використання в технологічних процесах та безповоротні втрати (випаровування);

- схеми повторного використання: обсяги води, які задіяні в системах оборотного та послідовного водопостачання, що демонструє ступінь замкненості водного циклу підприємства.

3. Енергетичні ресурси та паливний баланс

Оскільки споживання енергії опосередковано визначає обсяг викидів парникових газів (CO₂), в екологічній документації відображається детальна структура енергоспоживання:

- споживання первинного палива: обсяги використання природного газу, мазуту, вугілля, дизельного палива з обов'язковим зазначенням їхніх якісних характеристик (зольність, вміст сірки, вологість), що необхідно для розрахунку викидів в атмосферу;

- вторинні енергоресурси: обсяги спожитої електричної та теплової енергії, що надходять від зовнішніх мереж;

- енергоефективність: розрахунок питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів на одиницю готової продукції та порівняння їх із показниками найкращих доступних технологій (НДТ).

Дані цього розділу щорічно звіряються з показниками комерційних вузлів обліку (лічильників) та первинними журналами обліку водоспоживання (форма ПОД-11) та використання палива. Отримані матриці даних дозволяють встановити критичні точки перевитрат ресурсів та розробити інженерні заходи щодо зниження ресурсомісткості виробництва.

2.5. Регламентация розділів щодо джерел викидів забруднюючих речовин в атмосферу

Паспортизація та облік джерел викидів в атмосферне повітря є одним із найскладніших етапів екологічного нормування підприємства. Головна мета цього розділу – зафіксувати всі точки виходу забруднюючих речовин, визначити їхні фізичні параметри та встановити точний якісний і кількісний склад викидів. Ці дані є базою для розрахунку розсіювання забруднення в приземному шарі атмосфери та нарахування екологічного податку.

Усі джерела викидів підприємства, які підлягають обов'язковій регламентації, класифікують за двома ознаками:

1. За типом конструкції:

Організовані джерела: викиди відходять через спеціально споруджені газовідводи, димарі або вентиляційні шахти. Такі джерела дозволяють точно виміряти швидкість, температуру та об'єм газоповітряної суміші інструментальними методами, а також встановити на них пилогазоочисне обладнання.

Неорганізовані джерела: забруднюючі речовини надходять в атмосферу у вигляді ненаправлених потоків. Прикладами є відкриті склади сировини (вугілля, пісок), автозаправні станції, зварювальні майданчики на відкритому повітрі, або негерметичності технологічного обладнання (фланцеві з'єднання, засувки). Обсяг викидів від таких джерел розраховується виключно за питомими галузевими методиками.

2. За характером геометрії: точкові (поодинокі димарі), лінійні (аераційні ліхтарі цехів, відкриті вікна вздовж однієї стіни) та площинні (ставки-накопичувачі стічних вод, кар'єри, терикони).

Для кожного організованого джерела викидів в екологічній документації складається індивідуальна технічна картка, яка містить таку обов'язкову матрицю параметрів:

- координати джерела на генплані підприємства та його унікальний реєстраційний номер;

- висота джерела над рівнем землі (Н м) та внутрішній діаметр гирла труби (D, м);

- параметри газоповітряної суміші: температура (Т, °С), швидкість виходу (w, м/с) та об'ємна витрата (V, м³/с).

Ключовою частиною розділу є таблиця інвентаризації викидів, де для кожного джерела прописується повний перелік речовин, що викидаються (оксиди азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, пил, важкі метали тощо). Кількість викидів фіксується у двох величинах:

1. Грам за секунду (г/с): максимальна потужність викиду, яка використовується для розрахунку приземних концентрацій та перевірки недопущення перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) на межі санітарно-захисної зони.

2. Тонн за рік (т/рік): валовий викид, який відображає інтегральне навантаження на атмосферу за рік і є основою для розрахунку екологічного податку.

Якщо джерело обладнане пилогазоочисною установою (ПГУ), у цьому ж розділі фіксується її технічний паспорт: тип установки (циклон, рукавний фільтр, скруббер), її проектна та фактична ефективність очищення, а також графік планово-попереджувальних ремонтів. Первинною основою для заповнення цього розділу є дані журналів обліку за формою ПОД-1 (щоденний облік роботи ПГУ) та ПОД-2 (облік виконання заходів з охорони атмосферного повітря).

2.6. Порядок погодження, затвердження та актуалізації паспорта промислового об'єкта

Оскільки сучасна екологічна документація підприємства (що трансформувалася з класичного єдиного паспорта в пакет технологічних балансів, матеріалів інвентаризації та технічних паспортів відходів) є правовою основою для нарахування податків та легітимізації діяльності, процедура її введення в дію та супроводу суворо регламентована. Цей процес координується службою охорони навколишнього середовища підприємства (або залученими сертифікованими експертами) і складається з трьох послідовних юридично-технічних етапів.

1. Етап внутрішнього затвердження

Сформований пакет екологічної документації, що містить загальні відомості, схеми матеріальних балансів, інвентаризацію викидів та ресурсні профілі, проходить внутрішню перевірку. Документ візується головним інженером (як особою, відповідальною за технологічний регламент) та керівником фінансово-економічної служби (для звірки балансових даних із даними бухгалтерського обліку). Остаточо документ затверджується підписом генерального директора та скріплюється печаткою підприємства.

2. Етап зовнішнього погодження та реєстрації

Залежно від специфіки конкретного документа у складі екологічного профілю підприємства, він підлягає верифікації та реєстрації в уповноважених державних органах.

3. Етап актуалізації та перегляду даних

Екологічна документація не є безстроковою чи незмінною. Вона відображає поточний технологічний статус підприємства, тому стандартний термін чинності базових матеріалів інвентаризації та паспортів (за умови стабільності виробництва) зазвичай становить 5 або 10 років (залежно від класу об'єкта та ступеня його екологічної небезпеки).

Проте законодавством передбачено перелік умов, за яких позачергова актуалізація та переоформлення документів є обов'язковими:

- зміна профілю підприємства, реструктуризація виробничих потужностей або заміна понад 20% технологічного обладнання;

- перехід на нові види сировини або палива, що докорінно змінює якісний склад викидів чи відходів;.

– виявлення під час державного екологічного контролю нових, раніше не врахованих джерел забруднення або суттєвих розбіжностей у матеріальному балансі;

– зміна нормативно-правової бази України або введення в дію більш жорстких державних санітарно-гігієнічних та екологічних нормативів.

Своєчасна актуалізація паспортних даних та спеціалізованої звітності дозволяє підприємству уникати штрафних санкцій за роботу за недійсними документами та забезпечує безперервність дії природоохоронних дозволів.

3. Спеціалізована паспортизація у сфері поводження з відходами

3.1. Нормативні вимоги до паспортизації відходів на підприємстві

Паспортизація відходів є ключовим елементом системи екологічного обліку та операційного контролю будь-якого промислового підприємства. Головна мета цього процесу ідентифікація фізико-хімічних, токсикологічних та технологічних властивостей відходів для забезпечення їхнього безпечного збирання, перевезення, утилізації або видалення. Нормативно-правове регулювання цього процесу в Україні базується на профільному законодавстві та національних стандартах, які зазнали суттєвого реформування з метою гармонізації з Рамковою директивою ЄС про відходи (Directive 2008/98/EC).

Основним нормативним документом, який регламентує обов'язковість та методологію паспортизації відходів суб'єктами господарювання, є: закон України «[Про управління відходами](#)».

Згідно з нормативними вимогами, паспортизації підлягають усі види відходів, що утворюються в процесі виробничої діяльності підприємства, для яких встановлено клас небезпеки (небезпечні та безпечні відходи). Процедура ідентифікації та присвоєння коду здійснюється на основі Державного класифікатора відходів.

Обов'язковий нормативний обсяг відомостей, який має бути зафіксований у процесі паспортизації, включає:

1. Походження відходу: чітке визначення технологічного процесу, цеху чи установки, внаслідок роботи яких утворився відхід (наприклад, залишки гальванічного шламу при зачистці ванн хромування).

2. Склад та властивості: кількісний вміст основних хімічних компонентів, агрегатний стан (твердий, рідкий, пастоподібний, шламopodobний), а також специфічні небезпечні властивості (токсичність, вибухонебезпечність, пожежонебезпечність, корозійна активність).

3. Клас небезпеки: визначається за результатами лабораторних досліджень або розрахунковим методом відповідно до токсикологічних критеріїв.

4. Логістичні вимоги: спосіб пакування (контейнери, мішки, цистерни), умови безпечного зберігання на території підприємства (ліміти накопичення) та рекомендовані методи подальшого поводження (рециклінг, спалювання, захоронення на полігоні).

Наявність належним чином оформлених паспортів відходів є обов'язковою умовою для укладання юридичних договорів із ліцензованими підприємствами, що здійснюють збирання та утилізацію небезпечних відходів, а також є об'єктом першочергової перевірки органами Державної екологічної інспекції.

3.2. Методика розробки та ведення технічних паспортів відходів

Розробка технічного паспорта відходу здійснюється індивідуально на кожен окремий вид відходу. Методика розробки базується на послідовному заповненні уніфікованих інформаційних блоків на основі первинної технологічної та лабораторної документації.

Процедура складання технічного паспорта відходу передбачає наповнення таких ключових розділів (рис. 1):

1. Код та найменування відходу за класифікатором	
2. Відомості про виробника та технологічне походження	
3. Компонентний склад (за даними лаб. аналізу, %)	
4. Показники небезпеки та токсикологічні властивості	
5. Рекомендовані методи утилізації / видалення	

Рис. 1. Типова структура паспорта відходів

1. Найменування та кодування відходу: вказується офіційна назва відходу, яка має суворо відповідати чинному державному класифікатору, а також його унікальний цифровий код.

2. Відомості про підприємство-утворювач: юридичні реквізити, адреса та коди організації, на території якої утворився відхід.

3. Хімічний склад та фізико-хімічні характеристики.

4. Показники небезпеки: описуються специфічні екологічні та санітарно-токсикологічні характеристики: клас небезпеки для довкілля, екотоксичність (вплив на гідробіонтів чи мікрофлору ґрунту), здатність до біоаккумуляції та ступінь пожежної або вибухової загрози.

5. Рекомендації щодо поводження та утилізації: вказуються обмеження та вимоги до сумісного зберігання з іншими відходами, типи рекомендованої тари (наприклад, герметичні сталеві бочки), а також пріоритетні технологічні методи переробки (рециклінг, регенерація, нейтралізація чи захоронення).

Ведення паспортів відходів вимагає їхньої щорічної верифікації. Якщо технологічний процес, у якому утворюється відхід, зазнав змін (наприклад, відбулася заміна марки сировини, що вплинуло на хімічний склад шламу), паспорт підлягає обов'язковому переоформленню з проведенням нових лабораторних аналізів. Затверджені технічні паспорти зберігаються на

підприємстві у паперовому та електронному вигляді і є базою для заповнення щорічної державної статистичної звітності за формою № 1-відходи.

3.3. Паспортизація місць видалення відходів (МВВ): структура та вимоги

Паспортизація місць видалення відходів (МВВ) є обов'язковою процедурою для всіх суб'єктів господарювання, які здійснюють експлуатацію інженерних споруд та об'єктів, призначених для постійного захоронення або тривалого зберігання відходів (полігони, хвостосховища, шламонакопичувачі, терикони, відвали). На відміну від технічного паспорта конкретного відходу, паспорт МВВ характеризує об'єкт як комплексну інженерно-технічну споруду та оцінює ступінь його потенційної небезпеки для навколишнього середовища.

Порядок паспортизації МВВ регламентується постановою Кабінету Міністрів України. Затверджений паспорт є юридичним документом, який підтверджує право підприємства на розміщення відходів у визначених межах та обсягах.

Паспорт МВВ має уніфіковану структуру і містить такі обов'язкові блоки:

- загальні відомості про об'єкт;
- техніко-технологічна характеристика;
- характеристика відходів, що видаляються;
- система екологічного моніторингу об'єкта.

Паспорт МВВ підлягає обов'язковому погодженню з територіальними органами Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів і Держпродспоживслужби, після чого відомості про об'єкт вносяться до державного Реєстру місць видалення відходів. Актуалізація паспорта здійснюється щорічно в частині фіксації залишку вільної місткості об'єкта та обсягів накопичених за рік відходів.

3.4. Реєстрові карти об'єктів утворення, оброблення та утилізації відходів

Реєстрові карти є інструментом державного обліку та первинного декларування у сфері управління відходами. На відміну від внутрішньовиробничих технічних паспортів, реєстрова карта є формалізованим документом суворої звітності, який подається в електронному вигляді до державних інформаційних систем (зокрема, через ЕкоСистему) для внесення об'єкта до загальнонаціонального реєстру.

Залежно від специфіки діяльності підприємства, розробляються та реєструються два типи карт:

1. Реєстрова карта об'єкта утворення відходів (ОУВ)

Складається підприємствами, діяльність яких призводить до утворення відходів, якщо їхні річні обсяги перевищують встановлені законодавством граничні ліміти (критерій ПЗУ – показник загального утворення відходів).

Карта фіксує сумарну динаміку накопичення відходів на промисловому майданчику. У ній відображається баланс відходів за звітний рік: скільки

утворилося, скільки було тимчасово розміщено у внутрішніх сховищах, скільки передано іншим організаціям для переробки чи видалення.

2. Реєстрова карта об'єкта оброблення та утилізації відходів (ООУВ)

Є обов'язковою для спеціалізованих підприємств, які безпосередньо приймають, сортують, рециклірують, спалюють або нейтралізують відходи.

Окрім інформації про типи відходів, карта містить детальні відомості про наявні технологічні потужності (назва та характеристики ліній сортування, піролізних установок, інсинераторів тощо). У документі фіксується обсяг отриманої вторинної сировини чи енергії, що утворилися в результаті утилізації.

Порівняння реєстрових карт ОУВ та ООУВ наведено на рисунку 2.

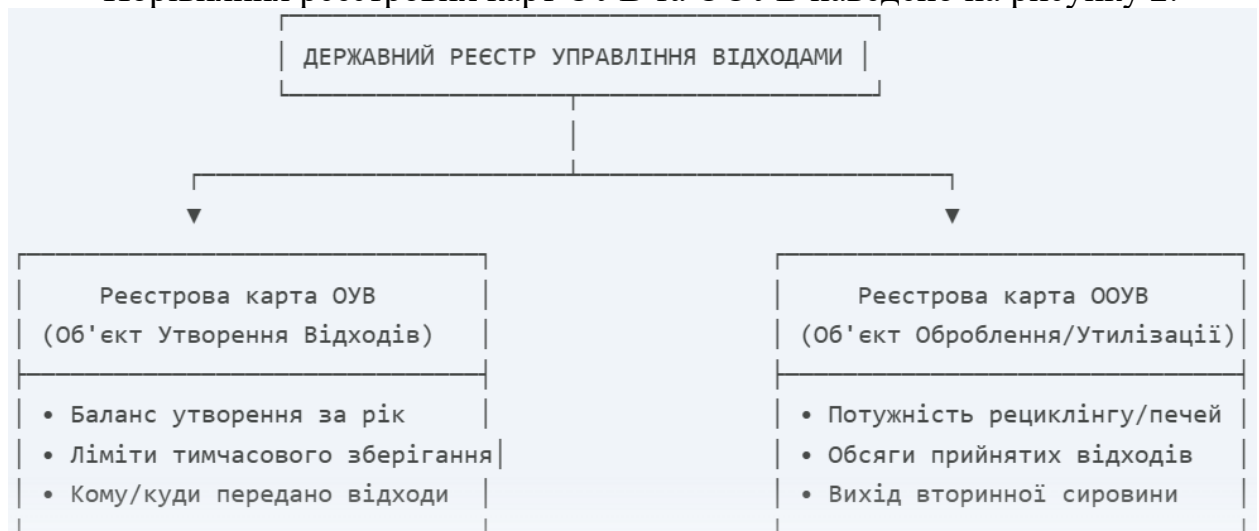


Рис. 2. Ієрархія та наповнення реєстрових карт ОУВ та ООУВ

Математична логіка реєстрових карт базується на принципі повної простежуваності. Усі дані, внесені у карту ОУВ одного підприємства, повинні дзеркально збігатися з даними у звітності ООУВ спеціалізованого контрагента, який ці відходи прийняв. Державна інформаційна система автоматично проводить перехресну верифікацію цих показників. При виявленні розбіжностей система блокує звітність, що стає підставою для проведення позапланової перевірки Держекоінспекцією.

Реєстрові карти оновлюються щорічно. Вони є основою для формування загальнодержавного балансу матеріальних ресурсів та оцінки ефективності переходу України до моделі циркулярної економіки.

Ч.2.1. Екологічна паспортизація адміністративно-територіальних одиниць

1.1. Методологія складання екологічних паспортів областей та великих промислових міст

Перехід від локального рівня (окремого підприємства) до регіонального вимагає принципово іншої методології агрегації даних. Екологічний паспорт адміністративно-територіальної одиниці (області, району, великого промислового міста) – це геоінформаційно прив'язаний масив даних, який

інтегрує показники природно-ресурсного потенціалу території та сумарного антропогенного навантаження. На відміну від технологічно орієнтованої документації підприємств, паспорт території розробляється з метою оцінки інтегральної екологічної ємності регіону та моделювання його сталого розвитку.

Методологія складання регіональних екологічних паспортів базується на чотирьох послідовних етапах:

1. Просторово-географічне та кліматичне районування: фіксація меж території, рельєфу, гідрографічної сітки, пануючого напрямку вітрів (рози вітрів) та кліматичних аномалій (інверсій температур, зон застою повітря), які визначають здатність атмосфери до самоочищення.

2. Синтез даних макроекономічного профілю: збір статистичних даних щодо структури промислового виробництва, густоти населення, протяжності транспортних артерій та структури землекористування (урбанізовані, аграрні, заповідні території).

3. Агрегація потоків забруднення (інвентаризація екологічного тиску): математичне зведення даних усіх суб'єктів господарювання, що діють на території. На цьому етапі сумуються стаціонарні викиди заводів, дифузні викиди міського транспорту, обсяги скидів у комунальні системи каналізації та маси накопичених у регіоні відходів.

4. Розрахунок інтегральних індексів екологічного стану: обчислення комплексних показників, таких як індекс забруднення атмосфери (ІЗА), індекс забрудненості води (ІЗВ) та коефіцієнт техногенного навантаження на ґрунти.

Основним джерелом інформації для складання паспорта території є щорічні екологічні декларації підприємств, звіти басейнових управлінь водних ресурсів, дані регіональних управлінь статистики та результати спостережень мереж моніторингу Гідрометцентру. Головна методична складність полягає в уніфікації даних, що надходять від різних відомств, та їх коректній прив'язці до географічних координат для формування цифрових карт екологічного стану регіону.

1.2. Структура географічних та кліматичних блоків у паспорті території

Географічні та кліматичні характеристики регіону складають базовий матричний блок екологічного паспорта території. Вони визначають природний фон та природну стійкість екосистем до зовнішнього техногенного тиску – один і той самий обсяг викидів промислового підприємства матиме абсолютно різні наслідки в умовах степової зони з постійними вітрами та в міжгірній улоговині з частими туманами й температурними інверсіями.

У структурі географічного та кліматичного блоків паспорта території детально регламентуються такі компоненти:

- географічне положення та геоморфологічна характеристика:
- загальна площа, адміністративні межі, середня висота над рівнем моря,
- опис рельєфу,

- характеристика гідрографічної мережі: перелік річкових басейнів, озер, водосховищ, їхня протяжність та водність;
 - кліматичні та метеорологічні умови:
- температурний режим: середньомісячні та екстремальні температури повітря, тривалість безморозного періоду,
- режим опадів: річна кількість опадів, їх розподіл за сезонами, товщина та тривалість снігового покриву,
- вітровий режим (роза вітрів): повторюваність напрямків вітру та його середня швидкість; особлива увага приділяється повторюваності штилів (швидкість вітру 0-1 м/с), за яких самоочищення повітря припиняється;
 - аерокліматичний потенціал та умови розсіювання забруднювачів:
- потенціал забруднення атмосфери (ПЗА): комплексний кліматичний показник, який розраховується на основі частоти штилів, туманів та температурних інверсій,
- визначення періодів несприятливих метеорологічних умов (НМУ), під час яких промислові підприємства міста зобов'язані знижувати потужність своїх викидів.

Фіксація цих параметрів у паспорті території дозволяє органам містобудування та архітектури коректно здійснювати функціональне зонування міст, наприклад, розміщувати житлові масиви виключно з навітряного боку відносно головних промислових зон з урахуванням панівної рози вітрів.

1.3. Облік інтегрального техногенного навантаження на компоненти довкілля регіону

Матриця техногенного навантаження в паспорті території відображає сумарний тиск усіх антропогенних джерел на природні депонуючі середовища (атмосферу, гідросферу, літосферу). На відміну від локального моніторингу, регіональний облік оперує поняттями валового надходження та площинної щільності забруднення. Це дозволяє виявити зони екологічного дисбалансу та встановити критичні ліміти розвитку промислових вузлів.

Облік інтегрального навантаження структурується за трьома основними напрямками:

1. Інтегральний тиск на атмосферне повітря:
 - стаціонарний масив: зведені дані про сумарні валові викиди (т/рік) від усіх промислових об'єктів регіону. Виділяються пріоритетні забруднювачі (наприклад, діоксид сірки, мікрочастинки пилу PM2.5 та PM10, оксиди азоту);
 - пересувний масив: розрахункові дані щодо викидів від автотранспорту, залізничного та авіаційного секторів. У великих містах частка пересувних джерел часто досягає 70–80% від загального обсягу навантаження.
 - показник щільності викидів: розраховується як відношення сумарного валового викиду до площі регіону.
2. Інтегральний тиск на водні екосистеми (гідросферу):

- фіксація сумарних обсягів скидання стічних вод у поверхневі водні об'єкти, із обов'язковим розподілом на нормативно-очищені, забруднені (без очищення) та недостатньо очищені.

- облік маси скидання лімітованих токсикантів (важких металів, нафтопродуктів, фенолів, фосфатів);

- розрахунок коефіцієнта антропогенного навантаження на річковий стік (відношення об'єму зворотних вод до природного об'єму річкового стоку в маловодний рік).

3. Техногенний пресинг на ґрунти та геологічне середовище:

- облік площ, зайнятих під санкціоновані та несанкціоновані сміттєзвалища, хвостосховища та промислові майданчики;

- оцінка щільності накопичення відходів на душу населення та на одиницю площі регіону;

- Розрахунок пестицидного та агрохімічного навантаження на сільськогосподарські угіддя.

Для узагальнення цих даних у методології паспортизації використовується матричний метод або розрахунок Модуля техногенного навантаження (МТН). МТН дозволяє ранжувати райони області чи квартали міста за ступенем екологічної напруженості (від умовно чистих до зон екологічної кризи). Ці карти-матриці є основою для прийняття рішень щодо обмеження видачі нових дозволів на викиди в перевантажених промислових районах.

1.4. Оцінка природно-заповідного фонду та біорізноманіття в межах паспорта території

Оцінка стану біотичних компонентів (флори, фауни) та фіксація меж територій, що охороняються, є компенсаційним та балансуєчим блоком екологічного паспорта території.

У цьому підрозділі паспорта території відображається детальна інформація за трьома структурними напрямками:

1. Кількісна та категоріальна характеристика Природно-заповідного фонду (ПЗФ):

- перелік усіх об'єктів ПЗФ на території із розподілом на об'єкти загальнодержавного та місцевого значення;

- показник заповідності регіону: відношення сумарної площі об'єктів ПЗФ до загальної площі адміністративно-територіальної одиниці;

- експлікація меж охоронних та буферних зон навколо заповідних об'єктів для запобігання їхньої фрагментації промисловим чи житловим будівництвом.

2. Стан біорізноманіття та наявність реліктових видів:

- списки видів судинних рослин, хребетних та безхребетних тварин, які постійно проживають або мігрують через територію регіону;

- окремий реєстр видів, занесених до Червоної книги України та міжнародних охоронних списків (Бернська конвенція, СІТЕS), із зазначенням їхнього соціологічного статусу (зникаючі, вразливі, рідкісні);

– ідентифікація та картизація критичних оселищ: місць гніздування птахів, книгарень лісових масивів чи нерестилищ риб.

3. Структура екологічної мережі (Екомережі):

Відображення просторового зв'язку між ізольованими заповідними об'єктами. Паспорт території фіксує природні ядра (основні заповідні масиви), екологічні коридори (лінійні елементи, наприклад, долини річок чи лісосмуги, якими мігрують тварини) та буферні зони (території, що захищають ядра від антропогенного впливу).

Аналіз стану ПЗФ та біорізноманіття в паспорті території дозволяє розрахувати біоекологічний потенціал регіону. Ці дані є юридичною підставою для відмови у виділенні земельних ділянок під розробку корисних копалин чи будівництво промислових ліній, якщо вони порушують цілісність екологічної мережі або загрожують знищенням червонокнижних популяцій.

1.5. Роль паспорта території в розробці програм соціально-економічного розвитку та регіональної екологічної політики

Екологічний паспорт території є не просто статичним збірником статистичних та аналітичних даних, а стратегічним інструментом управління на регіональному та муніципальному рівнях. Він виступає інформаційним містком між екологічним моніторингом та макроекономічним плануванням, дозволяючи органам місцевого самоврядування та державної влади приймати управлінські рішення на основі концепції сталого розвитку.

Практичне застосування паспорта території в системі регіонального управління реалізується за такими стратегічними напрямками:

1. Проведення Стратегічної екологічної оцінки (СЕО):

Згідно із законодавством України, будь-які державні програми, генеральні плани міст та стратегії регіонального розвитку підлягають обов'язковій процедурі СЕО до моменту їх затвердження. Дані екологічного паспорта території використовуються як базовий фон (зі зрізом поточного стану довкілля). Це дозволяє оцінити, як реалізація нової програми (наприклад, будівництво нового логістичного хабу чи розширення промислової зони) вплине на вже навантажені екосистеми регіону.

2. Розробка Регіональних програм охорони довкілля:

Показники паспорта (зокрема, карти інтегрального техногенного навантаження) чітко вказують на «гарячі екологічні точки» – райони з критичним рівнем забруднення атмосферного повітря або дефіцитом якісної питної води. На основі цих даних формуються цільові екологічні програми, під які виділяються кошти з місцевих та державного екологічних фондів.

3. Просторове планування та інвестиційний менеджмент:

Паспорт території дозволяє оцінити асиміляційний потенціал регіону – його здатність приймати нові антропогенні навантаження без незворотної деградації природи.

4. Забезпечення екологічної безпеки та реагування на надзвичайні ситуації:

Наявність у паспорті детальних гідрографічних, кліматичних та промислових профілів дозволяє моделювати сценарії можливих техногенних аварій. Це дозволяє регіональним підрозділам ДСНС завчасно розробляти ефективні плани евакуації населення та мінімізації наслідків.

Таким чином, екологічний паспорт території трансформує розрізнені природно-ресурсні та токсикологічні метрики у чітку систему координат для довгострокового екологічно безпечного планування регіону.

1.6. Транскордонні аспекти екологічної паспортизації та міжнародні формати обміну даними

В умовах глобалізації та транскордонного характеру екологічних проблем (рух повітряних мас, спільні басейни транскордонних річок) екологічна паспортизація територій виходить за межі національних кордонів. Україна, виконуючи зобов'язання в межах інтеграції до ЄС, гармонізує свої системи екологічного обліку з міжнародними стандартами. Це необхідно для запобігання міжнародним екологічним конфліктам та координації дій під час ліквідації масштабних аварій.

Міжнародний та транскордонний контекст екологічної паспортизації базується на кількох фундаментальних елементах:

1. Конвенція Еспо (ЄЕК ООН):

Регламентує оцінку впливу на навколишнє середовище у транскордонному контексті. Дані екологічних паспортів прикордонних областей (наприклад, Закарпатської, Волинської чи Одеської) використовуються для оцінки того, як будівництво чи модернізація великих промислових об'єктів в Україні може вплинути на екосистеми сусідніх держав (Польщі, Румунії, Молдови, Словаччини, Угорщини).

2. Басейновий принцип управління водними ресурсами (Водна рамкова директива ЄС):

Паспортизація територій у частині гідросфери здійснюється не за адміністративними кордонами областей, а за межами річкових басейнів (наприклад, басейни Дніпра, Дунаю, Дністра). Дані екологічних профілів цих басейнів узгоджуються з міжнародними басейновими комісіями. Це дозволяє здійснювати спільний моніторинг якості води та транскордонного перенесення забруднюючих речовин із сусідніми країнами.

3. Формати обміну даними та Директива INSPIRE:

Для того, щоб дані українських екологічних паспортів територій могли бути інтегровані в європейські системи, вони перераховуються та структуруються за міжнародними стандартами:

1. Геоінформаційна сумісність: всі екологічні карти, просторові дані про джерела забруднення, межі ПЗФ та моніторингові пости створюються відповідно до вимог Директиви INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe).

2. Європейські класифікатори: оцінка біорізноманіття в паспортах територій синхронізується з класифікацією оселищ Європейської екологічної

мережі (Emerald Network / Смарагдова мережа) та критеріями Міжнародного союзу охорони природи (IUCN).

3. Синхронізація з SEIS (Shared Environmental Information System): спільна екологічна інформаційна система ЄС вимагає, щоб екологічні дані територій були відкритими, доступними в режимі реального часу та структурованими у вигляді онлайн-сервісів (еко-паспортів у форматі інтерактивних дашбордів).

Узгодження екологічних паспортів територій із міжнародними форматами дозволяє Україні залучати грантові європейські кошти для реалізації масштабних транскордонних екологічних проектів (наприклад, з очищення спільних річок або відновлення заповідних водно-болотних угідь) та забезпечує прозорість екологічної політики нашої держави на міжнародній арені.

Ч.2.2. Специфіка паспортизації особливих природних територій

2.1. Правовий статус, категорійність та функціональне зонування об'єктів ПЗФ у структурі паспорта

Екологічна паспортизація об'єктів Природно-заповідного фонду (ПЗФ) України є першоосною для їхнього юридичного захисту та екологічного менеджменту. Паспорт об'єкта ПЗФ – це державний документ, який чітко засвідчує межі, склад, наукову цінність та правовий режим заповідної території. Без належним чином оформленого паспорта неможливо внести відомості про заповідник чи національний парк до Державного земельного кадастру, що створює ризики незаконного відчуження земель.

Перший та базовий блок паспорта присвячений визначенню правового статусу та категорійності об'єкта відповідно до Закону України «Про природно-заповідний фонд». Об'єкти класифікуються на категорії (біосферні заповідники, природні заповідники, національні природні парки, заказники, пам'ятки природи, ботанічні сади тощо) та за статусом (загальнодержавного або місцевого значення). Від цього залежить рівень суворості охоронного режиму та орган, який затверджує паспорт (Міністерство захисту довкілля чи обласна державна адміністрація).

Центральною та найскладнішою частиною цього підрозділу в паспорті є диференціація території за функціональними зонами. Для комплексних об'єктів (наприклад, національних природних парків або біосферних заповідників) паспорт законодавчо закріплює поділ на чотири зони, кожна з яких має свій чіткий просторовий контур та регламент:

1. Заповідна зона: призначена для повного збереження еталонних природних комплексів, генофонду флори і фауни, проведення наукових досліджень. У цій зоні заборонена будь-яка господарська діяльність, будівництво, полювання, рибальство, збір рослин і навіть масовий прохід людей.

2. Зона регульованої рекреації: у її межах проводиться екологічна просвітницька робота та короткочасний відпочинок населення. Паспорт

дозволяє тут облаштування екологічних стежок, оглядових майданчиків, організацію пішохідних екскурсій, але забороняє розведення багатьох поза відведеними місцями, рух механізованого транспорту та капітальне будівництво.

3. Зона стаціонарної рекреації: виділяється для розміщення об'єктів обслуговування відвідувачів (мотелі, кемпінги, туристичні бази, інформаційні центри). Паспорт чітко лімітує площу цієї зони для запобігання надмірній урбанізації заповідної території.

4. Господарська зона: у ній проводиться господарська діяльність, спрямована на виконання покладених на об'єкт завдань, а також традиційне природокористування місцевого населення (випасання худоби, сінокосіння, збір грибів та ягід, санітарні рубки лісу під контролем науковців).

Паспорт містить детальний картографічний матеріал (план-схему) екологічного зонування з нанесенням координат кожної поворотної точки меж кожної зони. Будь-яке порушення встановленого паспортного режиму тягне за собою кримінальну відповідальність.

2.2. Созологічна характеристика території: інвентаризація біорізноманіття та реєстри Червоної книги

Созологічний блок (від грец. *sozo* – рятувати, охороняти) є науковим ядром екологічного паспорта особливої природної території. Він містить вичерпний, верифікований провідними науковцями реєстр біологічного різноманіття, який є головною підставою для створення та збереження цього об'єкта. Мета цього розділу паспорта – зафіксувати «стартовий» стан екосистеми та встановити об'єкти особливої уваги, динаміка популяцій яких буде відстежуватися протягом десятиліть.

Структура созологічної характеристики в паспорті поділяється на кілька детальних реєстрів:

1. Флористичний реєстр: повний систематичний список судинних рослин, мохоподібних, водоростей та лишайників. Особливо описується структура лісових насаджень, лучної або степової рослинності.

2. Фауністичний реєстр: список усіх видів хребетних (ссавці, птахи, плазуни, земноводні, риби) та безхребетних тварин, які постійно проживають, гніздуються або мігрують через територію.

3. Міжнародні та національні охоронні списки: найважливіша з юридичної точки зору частина розділу. У ній чітко кодуються та виділяються:

– види, занесені до Червоної книги України (із зазначенням їхнього статусу: вразливі, рідкісні, зникаючі);

– види, що підлягають охороні на європейському рівні відповідно до Бернської та Боннської конвенцій;

– рослинні угруповання, занесені до Зеленої книги України.

Для кожного червонокнижного виду в паспорті фіксуються:

– орієнтовна чисельність або щільність популяції на одиницю площі;

– точні місця локалізації (картосхеми гніздувань хижих птахів, місця виходу підземних вод, де проживають рідкісні амфібії, або ділянки зростання ендемічних орхідей);

– критичні лімітуючі фактори (наприклад, чутливість до зміни рівня ґрунтових вод чи фактора неспокою в період розмноження).

Ці дані є динамічними й оновлюються на основі щорічних спостережень, які заносяться до «Літопису природи» – головного наукового документу заповідника. Якщо під час моніторингу виявляється, що чисельність паспортизованого виду стрімко падає, це є підставою для негайної зміни меж функціональних зон (наприклад, розширення заповідної зони за рахунок рекреаційної) або введення додаткових сезонних заборон на відвідування території.

2.3. Розрахунок гранично допустимого рекреаційного навантаження та екологічної місткості

Паспортизація територій, що мають не лише природоохоронне, а й високе рекреаційне значення (національні парки, біосферні заповідники, курортні та лікувально-оздоровчі зони), обов'язково включає розрахунок екологічної місткості. Антропогенний пресинг від масового туризму (витоптування ґрунту, ущільнення лісової підстилки, занепокоєння тварин, утворення сміття, шум) може завдати природі не меншої шкоди, ніж промислові викиди. Тому паспорт виступає інструментом жорсткого нормування туристичних потоків.

Методологія розрахунку, яка фіксується в паспорті, базується на визначенні трьох типів стійкості:

1. Екологічна місткість території: гранична кількість відвідувачів, яка може перебувати на об'єкті одночасно (або за сезон) без запуску процесів незворотної деградації природних комплексів. Розраховується за формулою екологічного навантаження з урахуванням типу ландшафту (наприклад, хвойні ліси на піщаних ґрунтах мають значно меншу стійкість до витоптування, ніж широколистяні ліси на глинистих субстратах).

2. Психологічна (соціальна) місткість: кількість людей на туристичному маршруті, за якої ще зберігається комфортність сприйняття дикої природи та не виникає відчуття перевантаженості простору.

3. Технологічна місткість: визначається спроможністю інфраструктури (наявність облаштованих парковок, місткість контейнерів для сміття, кількість еко-туалетів, міцність настилів на екологічних стежках).

У паспорті території за результатами розрахунків прописуються конкретні ліміти та експлуатаційні вимоги:

– максимальна кількість екскурсійних груп та людей у групі на кожній конкретній екологічній стежці за добу (наприклад, «екостежка X – не більше 3 груп по 15 осіб на день»);

– заборона на відвідування окремих зон у «період тиші» (під час масового гніздування птахів чи отелення ссавців у травні-червні);

– максимальні обсяги вилучення природних лікувальних ресурсів (для курортних зон) – добовий дебіт мінеральних вод чи об'єм видобутку лікувальних грязей, які гарантують їхнє природне відновлення.

Ці паспортні обмеження є основою для розробки планів управління територій ОПТ. При досягненні лімітів адміністрація об'єкта має законне право закривати маршрути на рекультивацію або обмежувати продаж вхідних квитків, захищаючи природне середовище від екологічного колапсу.

Ч.2.3. Інтеграція паспортизації в систему екологічного моніторингу

3.1. Паспорт як інформаційне джерело для формування баз даних державного моніторингу довкілля

Екологічна паспортизація та державний моніторинг довкілля є взаємопов'язаними елементами єдиної системи екологічного управління. Моніторинг здійснює безперервне або періодичне інструментальне спостереження за станом природних компонентів, тоді як екологічний паспорт виступає вихідною точкою, інформаційним фундаментом та головним інтегратором цих даних. Паспорт трансформує розрізнені вимірювання у структуровані бази даних, які використовуються для стратегічного аналізу на загальнодержавному рівні.

Роль екологічного паспорта як первинного інформаційного джерела реалізується через такі механізми:

– формування «нульового зрізу» (базової лінії): при розгортанні системи моніторингу на новій території або навколо промислового об'єкта саме з паспорта беруться вихідні фонові показники. Без цієї прив'язки неможливо оцінити, чи є поточні концентрації забруднюючих речовин результатом свіжого антропогенного викиду, чи вони зумовлені природними геохімічними особливостями регіону;

– синхронізація з інформаційними підсистемами: дані екологічних паспортів промислових об'єктів та територій автоматично імпортуються до відповідних галузевих баз даних Державної системи екологічного моніторингу (ДСЕМ). Цей масив інформації розподіляється за профільними суб'єктами моніторингу:

– підсистема «Атмосферне повітря» (Міндовкілля, Гідрометцентр) – отримує з паспортів точні координати, висоту димарів, об'єми та температуру газоповітряної суміші організованих джерел викидів,

– підсистема «Водні ресурси» (Держводагентство) – акумулює дані паперових та електронних балансів водоспоживання, лімітів скидів та параметрів очисних споруд,

– підсистема «Ґрунти та відходи» (Держгеокадастр, Міндовкілля) – оперує даними технічних паспортів відходів та реєстрових карт ОУВ/ООУВ;

– уніфікація та стандартизація метаданих: однією з головних проблем моніторингу є те, що різні відомства (наприклад, Міністерство охорони здоров'я контролює атмосферу в житлових зонах, а Гідрометцентр – на стаціонарних постах) використовують власні методики. Екологічний паспорт

території виступає єдиним стандартизованим шаблоном, який змушує всі суб'єкти моніторингу подавати інформацію в уніфікованих одиницях вимірювання (мг/м³, г/с, т/рік) та з обов'язковою географічною прив'язкою у форматі ГІС.

Завдяки такій інтеграції державні бази даних отримують не просто сухі цифри концентрацій речовин, а причинно-наслідкові зв'язки: інформаційна система може автоматично зіставити зафіксоване постом моніторингу перевищення норми забруднення в повітрі з переліком підприємств, які мають аналогічні речовини у своїх екологічних паспортах.

3.2. Матричний підхід до оцінки якості довкілля на основі паспортних даних та розрахунків комплексних індексів

Для перетворення масиву первинних моніторингових та паспортних даних у зрозумілу форму, придатної для прийняття управлінських рішень, використовується матричний підхід. Він полягає у побудові багатокритеріальних матриць, де по одній осі відображаються компоненти довкілля або джерела впливу, а по іншій – кількісні та якісні показники їхнього стану. Результатом такого зведення є розрахунок комплексних (інтегральних) екологічних індексів.

Матричний аналіз у межах паспортизації території чи великого промислового вузла реалізується за такою схемою:

1. Побудова матриці екологічного тиску (матриця Леопольда або її модифікації): у клітинках матриці на перетині технологічних процесів (наприклад, спалювання вугілля, рух транспорту) та компонентів природи (повітря, підземні води, рослинність) виставляються бали, що відображають масштаб, тривалість та інтенсивність впливу.

2. Переведення абсолютних значень у відносні: оскільки неможливо безпосередньо порівняти тонни викидів дизельного палива з кубометрами брудних стічних вод, усі показники нормуються відносно їхніх екологічних еталонів – Гранично Допустимих Концентрацій (ГДК). Отримується безрозмірна величина (коэф. концентрації К):

$$K = \frac{C_{\text{факт}}}{\text{ГДК}}$$

На основі нормованих матричних даних у паспортному аналізі розраховуються такі загальноприйняті комплексні індекси:

1. Індекс забруднення атмосфери (ІЗА): комплексний показник, який враховує декілька пріоритетних забруднюючих речовин, що зафіксовані в паспорті міста, з урахуванням класу їхньої небезпеки.

2. Індекс забрудненості води (ІЗВ): використовується для гідрохімічного блоку паспорта водного об'єкта. Зазвичай розраховується за 6–4 пріоритетними показниками (обов'язково включаючи розчинений кисень, біохімічне споживання кисню – БСК₅, та головні токсиканти регіону).

3. Комплексний індекс антропогенного навантаження (КІАН): інтегральна матрична оцінка, яка математично підсумовує індекси забруднення повітря, води та деградації ґрунтів, дозволяючи присвоїти

території певний екологічний статус (нормальний, задовільний, напружений, критичний, зона екологічної кризи).

Внесення цих індексів до фінальних таблиць екологічних паспортів дозволяє здійснювати порівняльний аналіз (ранжування) міст та областей України між собою, чітко демонструючи динаміку покращення або погіршення екологічної ситуації в часі.

3.3. Принципи верифікації моніторингових вимірювань та виявлення прихованих джерел забруднення

Однією з найважливіших аналітичних функцій екологічного паспорта в системі моніторингу є верифікація отриманих вимірювань та детектування несанкціонованих джерел екологічної загрози. У практичній діяльності інспекційних органів часто виникає ситуація, коли датчики моніторингу фіксують різкий стрибок концентрації токсикантів, але жодне з місцевих підприємств не звітує про аварію. У таких випадках паспорт стає інструментом інженерного розслідування.

Процес верифікації та пошуку базується на трьох фундаментальних принципах:

1. Метод матеріально-сировинного балансу:

Паспорт кожного промислового об'єкта містить чітку матрицю: «кількість зайшлої сировини/палива – об'єм готової продукції – маса утворених відходів та викидів». Якщо підприємство заявляє у звітності про зниження викидів на 50%, екологічний інспектор звіряє ці дані з паспортним витратами палива. Якщо обсяги споживання газу чи вугілля залишилися незмінними, а очисне обладнання не модернізувалося – моніторингові заяви підприємства визнаються неверифікованими (фальсифікованими).

2. Принцип хімічної ідентифікації:

Багато промислових процесів мають унікальний хімічний склад викидів, який фіксується в технічних паспортах джерел. Наприклад, якщо пост моніторингу повітря фіксує появу специфічного спектра органічних розчинників або специфічних ізотопів важких металів, аналітична система піднімає екологічні паспорти всіх заводів у радіусі поширення хмари (рис. 3).

Схема алгоритму графічно ілюструє покроковий процес інженерно-екологічного розслідування за допомогою аналітичних інструментів екологічної паспортизації та систем моніторингу. Процес розподілений на чотири послідовні етапи:

1. Етап ініціації – «Датчик спостереження фіксує перевищення ГДК по хрому». Суть: початковою точкою стає об'єктивна фіксація екологічного порушення автоматизованим або стаціонарним постом моніторингу (у даному випадку – виявлення токсичного важкого металу в депонуючому середовищі).

2. Етап просторово-аналітичного аналізу: «ПОШУК. Пошук в електронній базі еко-паспортів у зоні вітру». Суть: на основі метеорологічних даних (напрямок і швидкість вітру) автоматизована система визначає вектор та конус поширення забруднення і робить вибірку з ГІС-баз даних

екологічних паспортів усіх підприємств, що географічно знаходяться в цій зоні.

3. Етап верифікації та ідентифікації: Порівняльний аналіз двох суб'єктів: завод А (паспорт) та завод Б (паспорт). Суть: відбувається звірка «хімічного відбитка» забруднювача з технологічними картами та реєстрами екологічних паспортів підприємств. Профіль заводу А дозволяє виключити його з кола підозрюваних. Натомість технічний паспорт заводу Б підтверджує, що хром є базовим лімітованим компонентом його гальванічного виробництва.

4. Етап прийняття управлінських/контрольних рішень: «Направлення інспекції на Завод Б для перевірки ПГУ». Суть: на основі аналітично доведеної підозри державний орган контролю приймає юридичне рішення про проведення позапланової перевірки пиловловлюючого та газоочисного устаткування (ПГУ) конкретного порушника для фіксації факту наднормативного або аварійного викиду.

МОНІТОРИНГОВИЙ СКРИНІНГ ТА ПАСПОРТНА ВЕРИФІКАЦІЯ

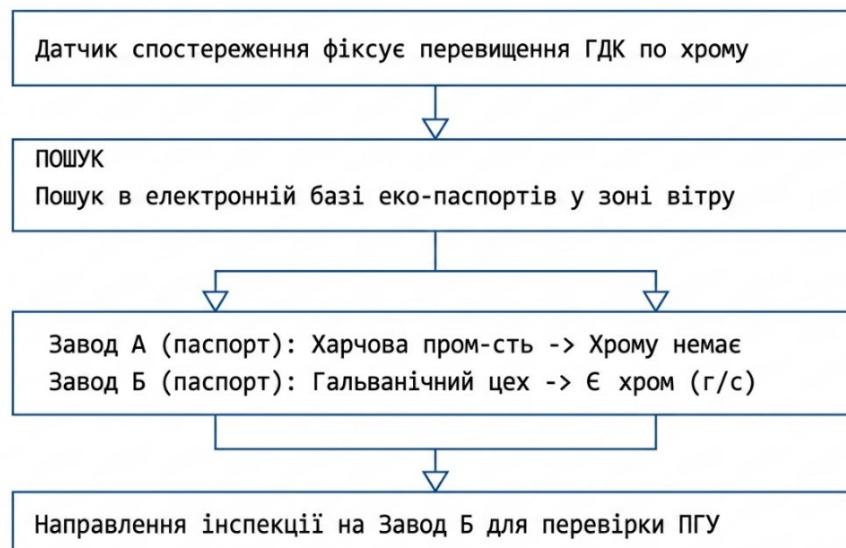


Рис. 3. Алгоритм взаємодії інструментального моніторингу та бази екологічних паспортів підприємств при виявленні правопорушень

3. Зворотне математичне моделювання розсіювання:

При виявленні забруднення за допомогою метеорологічних даних (напрямок та швидкість вітру на момент фіксації, температура повітря), які також є частиною кліматичного блоку паспорта території, запускається програма зворотного розрахунку («скерінг-модель»). Програма вираховує траєкторію руху повітряної маси і будує конус, у вершині якого знаходиться потенційне джерело. Зіставлення цього конуса з картою організованих та неорганізованих джерел із паспортів підприємств дозволяє з точністю до конкретного цеху виявити порушника.

Таким чином, інтеграція паспортних даних у систему моніторингу перетворює пасивне фіксування екологічного стану на активну систему виявлення екологічних правопорушень та верифікації промислової звітності.

Ч.2.4. Роль паспортизації у системі державного та внутрішнього контролю

4.1. Використання паспортних даних органами Державної екологічної інспекції при проведенні планових та позапланових перевірок

Екологічний паспорт підприємства є основним юридичним та доказовим документом, з якого починається будь-який захід державного екологічного контролю. Органи Державної екологічної інспекції (ДЕІ) використовують паспортні дані як нормативний еталон, порівняння з яким дозволяє оперативно виявити склад екологічного правопорушення. Без попереднього аналізу екопаспорта інспектор не має права здійснювати інструментально-лабораторні заміри на промисловому майданчику.

У процесі інспекційного контролю екологічний паспорт виконує три ключові функції:

1. Документальний скринінг (передперевірочний аналіз): до виїзду на об'єкт інспектори вивчають електронну копію паспорта підприємства. Вони аналізують перелік дозволених джерел викидів, установлені ліміти на утворення та розміщення відходів, а також регламент роботи очисних споруд. Це дозволяє сформулювати чіткий план перевірки та визначити, які саме цехи та технологічні лінії потребують особливої уваги.

2. Інструментальне зіставлення під час планових перевірок:

Під час обстеження промислового майданчика інспектори порівнюють фактичну інженерну схему заводу з її паспортним описом. Головними критеріями перевірки є:

– виявлення неврахованих (незаконних) джерел впливу: якщо на підприємстві виявлено димар, вентиляційну шахту або випуск стічних вод, який не внесено до екологічного паспорта, це автоматично кваліфікується як грубе порушення законодавства (робота без дозвільних документів);

– контроль ефективності ПГУ: інспектори звіряють паспортні технічні характеристики газоочисного устаткування з їхнім фактичним станом і заміряють ефективність очищення на відповідність паспортним показникам.

3. Доказова база при позапланових перевірках за скаргами громадян:

Якщо мешканці прилеглих зон скаржаться на специфічний запах або задимлення, ДЕІ проводить позаплановий виїзд. У цьому випадку екологічний паспорт є інструментом швидкої ідентифікації порушення. Наприклад, якщо підприємство перевищило ліміт використання певної сировини (що зафіксовано в журналах первинного обліку), але намагається це приховати, інспектор доводить провину через математичний перерахунок балансу матеріалів, який жорстко закріплений у технологічній частині паспорта.

Таким чином, для Держекоінспекції екологічний паспорт є точкою відліку: будь-яке відхилення від зафіксованих у ньому параметрів, технологічних схем або обсягів потоків забруднення трактується як потенційне джерело надзвичайного стану або правопорушення, що тягне за собою нарахування збитків, штрафів або зупинку виробництва через суд.

4.2. Внутрішній екологічний аудит та виробничий контроль на підприємстві: актуалізація паспорта як елемент ISO 14001

Для самого підприємства екологічний паспорт є не лише інструментом звітності перед державою, а й базовим елементом функціонування Системи екологічного менеджменту (СЕМ) відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 14001. Внутрішній контроль та регулярний екологічний аудит спрямовані на те, щоб підприємство функціонувало в межах правового поля, мінімізувало ризики аварійних штрафів та постійно покращувало свої екологічні показники.

Інтеграція паспортизації у внутрішні процеси управління за стандартом ISO 14001 базується на таких засадах:

- ідентифікація та оцінка екологічних аспектів: згідно з ISO 14001, підприємство зобов'язане вести чіткий реєстр усіх своїх екологічних аспектів. Матрична структура екологічного паспорта підприємства є готовою інженерною основою для цього реєстру. Внутрішні аудитори використовують паспорт для оцінки значущості екологічних аспектів та розробки екологічних цілей підприємства на поточний рік;

- процедура регулярної актуалізації даних: екологічний паспорт є «живим» документом. Будь-яка внутрішня модернізація (заміна пальника в котлі, перехід на інший тип лакофарбових матеріалів, зміна постачальника сировини) змінює параметри впливу на довкілля. Внутрішній виробничий екологічний контроль зобов'язує службу еколога підприємства своєчасно вносити зміни до паспорта. Якщо зміни суттєві (наприклад, зміна обсягів викидів чи поява нового класу відходів), підприємство ініціює процедуру офіційного переоформлення або внесення змін до державного паспорта. Це запобігає ризикам виявлення розбіжностей під час державних перевірок.

- мінімізація операційних ризиків та внутрішній аудит: під час проведення внутрішнього екологічного аудиту (який здійснюється або силами власної екологічної служби, або залученими сертифікованими аудиторами) перевіряється відповідність поточних виробничих журналів (форми ПОД-1, ПОД-2, ПОД-3) паспортним даним. Аудитори аналізують:

- чи не наближається підприємство до граничних паспортних лімітів розміщення відходів на внутрішніх майданчиках;

- чи дотримуються графіки планово-попереджувальних ремонтів очисних споруд, що вказані в паспорті;

- чи відповідає кваліфікація персоналу, який обслуговує ПГУ, вимогам технічного паспорта устаткування.

Своєчасна актуалізація екологічного паспорта в межах СЕМ ISO 14001 дозволяє підприємству успішно проходити щорічні сертифікаційні та наглядові аудити, підтверджуючи свій статус екологічно відповідального бізнесу на міжнародному та внутрішньому ринках.

Контрольні питання

1. У чому полягає принципова методологічна відмінність між екологічним паспортом конкретного промислового підприємства та екологічним паспортом адміністративно-територіальної одиниці?
2. Які чотири послідовні етапи включає в себе методологія складання регіональних екологічних паспортів?
3. Що таке Потенціал забруднення атмосфери (ПЗА) і які метеорологічні явища безпосередньо впливають на його розрахунок у кліматичному блоці паспорта території?
4. Які критерії та показники використовуються в екологічному паспорті території для обліку інтегрального техногенного навантаження на водні екосистеми регіону?
5. Що таке «показник заповідності регіону», як він розраховується і для чого фіксується в паспорті території?
6. Опишіть структуру та просторовий зв'язок між елементами екологічної мережі (екомережі), які відображаються в екологічному паспорті.
7. Яким чином дані екологічного паспорта території використовуються під час проведення процедури Стратегічної екологічної оцінки (СЕО)?
8. Які міжнародні стандарти та директиви (зокрема, Директива INSPIRE) регламентують формати обміну просторовими екологічними даними при транскордонній паспортизації?
9. Які екологічні параметри та показники біопродуктивності обов'язково фіксуються в паспорті лісогосподарського підприємства згідно з ДСТУ 7886:2015?
10. Опишіть режим охорони та обмеження, які паспорт об'єкта ПЗФ накладає на «Заповідну зону» та «Зону регульованої рекреації» національних природних парків.
11. Які три типи стійкості екосистем враховуються при розрахунку гранично допустимого рекреаційного навантаження в паспортах особливих природних територій?
12. Яким чином екологічний паспорт території та підприємства взаємодіє з підсистемами Державної системи екологічного моніторингу довкілля (ДСЕМ)?
13. Опишіть математичну логіку розрахунку Комплексного індексу забруднення атмосфери (ІЗА), який вноситься до паспортних матриць міст.
14. Які методи (зокрема, метод матеріально-сировинного балансу та Chemical Fingerprinting) дозволяють верифікувати дані моніторингу та виявляти приховані джерела забруднення за допомогою екопаспортів?
15. Яким чином процедура регулярної актуалізації екологічного паспорта підприємства інтегрується у Систему екологічного менеджменту (СЕМ) відповідно до вимог стандарту ISO 14001?

Лекція 10, 11
ЕКОЛОГІЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ:
ПРИНЦИПИ, КЛАСИФІКАЦІЯ, ЕТАПИ, МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ
МОДЕЛЮВАННЯ

Частина 1 (Екологічне прогнозування)

Мета заняття: сформувати у студентів цілісну систему знань про теоретико-методологічні основи екологічного прогнозування. Розкрити роль наукового передбачення у запобіганні екологічним кризам, вивчити термінологічний апарат, класифікацію прогнозів та інструментарій, що необхідний для оцінки майбутнього стану біосфери під впливом антропогенного навантаження.

План лекції:

1. Об'єкт, предмет та завдання екологічного прогнозування
2. Наукові принципи та методологія прогнозування
3. Класифікація екологічних прогнозів
4. Методичні підходи: від експертних оцінок до екстраполяції
5. Джерела похибок та верифікація прогнозів

1. Об'єкт, предмет та завдання екологічного прогнозування

1.1. Концептуальний апарат екологічного прогнозування: об'єкт, предмет, мета та завдання

Екологічне прогнозування – це спеціальна наукова дисципліна та вид практичної діяльності, спрямований на виявлення імовірнісних станів природно-антропогенних систем у майбутньому. В основі лежить аналіз причинно-наслідкових зв'язків між господарською діяльністю людини та реакцією біосфери.

Термінологічна диференціація

Для професійного еколога важливо розрізнити три споріднені, але не тотожні поняття:

Прогноз – імовірнісне наукове судження про майбутній стан об'єкта. Він завжди має багатоваріантний характер.

Гіпотеза – наукове припущення про закономірності розвитку, що має нижчий ступінь достовірності та потребує подальшої верифікації.

План – директивний документ, що визначає цілі, ресурси та терміни.

Ключова теза: Прогнозування є «передплановою» стадією. План відповідає на питання «Що ми хочемо зробити?», а прогноз – «Що станеться, якщо ми це зробимо (або не зробимо)?».

Об'єкт та предмет дослідження

Об'єктом екологічного прогнозування виступають складні, відкриті та динамічні системи. Їх класифікують за ієрархією:

Локальний рівень: окремі екосистеми (біогеоценози), ділянки річок, санітарно-захисні зони підприємств.

Регіональний рівень: басейни великих річок, промислові райони, адміністративні області.

Глобальний рівень: біосфера в цілому, озоновий шар, світовий океан.

Предметом прогнозування є процеси трансформації цих об'єктів під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів. Це включає:

Зміни структури екосистем (видовий склад, біомаса).

Динаміку забруднення компонентів довкілля (повітря, води, ґрунту).

Прямі та опосередковані наслідки антропогенного тиску (наприклад, вторинне забруднення).

Стратегічна мета та дерево завдань

Головна мета: забезпечення наукового підґрунтя для прийняття екологічно безпечних управлінських рішень та мінімізація ризиків виникнення екологічних катастроф.

Для досягнення мети вирішуються наступні завдання:

Ретроспективний аналіз (Ретроспекція): вивчення історії розвитку об'єкта, пошук закономірностей у минулому для виявлення інерційних процесів.

Діагноз стану: комплексна оцінка поточної ситуації. На цьому етапі визначається, чи знаходиться система в межах «екологічного благополуччя» чи вже наближається до точки біфуркації (критичного зламу).

Прогнозний синтез (Проспекція): розробка сценаріїв майбутнього на основі екстраполяції трендів або моделювання нових впливів.

Корекція та верифікація: постійне порівняння реальних даних моніторингу з прогнозними показниками для уточнення методики.

Принципова схема прогностичної діяльності

Процес прогнозування базується на трьох «китах»:

Інформаційна база: дані моніторингу та статистична звітність.

Методологія: сукупність математичних та логічних методів обробки даних.

Сценарний підхід: формування набору альтернатив (наприклад: «базовий сценарій», «сценарій інтенсивного розвитку», «екологічно орієнтований сценарій»).

1.2. Теоретичні концепції розвитку екосистем як база для прогнозування

Прогнозування в екології неможливе без розуміння фундаментальних властивостей живих систем. Якщо в техніці ми прогнозуємо знос деталі, то в екології ми прогнозуємо реакцію живої матерії на стрес.

Концепція гомеостазу та механізми саморегуляції

Гомеостаз – це здатність екосистеми підтримувати стабільність своїх основних показників (чисельність популяцій, енергетичний баланс, колообіг речовин) у відповідь на зовнішні збурення.

Для прогнозіста це означає:

Принцип зворотного зв'язку: Більшість екосистем мають «негативні зворотні зв'язки», які гасять відхилення. Наприклад, збільшення кількості шкідників призводить до росту чисельності хижаків, що повертає систему в норму.

Прогнозний аспект: Поки вплив не перевищує компенсаторних можливостей гомеостазу, система буде стабільною. Завдання прогнозу – знайти межу, за якою ці механізми відмовляють.

Резистентність та пружність (Resilience)

При побудові прогнозів екологі оперують двома типами стійкості:

Резистентна стійкість: здатність системи чинити опір змінам (залишатися незмінною під тиском).

Пружна стійкість (Resilience): здатність системи швидко повертатися до початкового стану після того, як тиск припинився.

Приклад: Хвойний ліс має високу резистентність (його важко змінити), але низьку пружність (якщо він згорів, він відновлюється десятиліттями). Степова екосистема, навпаки, легко змінюється, але миттєво відновлюється. Прогноз має враховувати цей "тип характеру" екосистеми.

Екологічна ємність території та критичні пороги

Екологічна ємність – це гранично допустимий рівень антропогенного навантаження, який екосистема може витримати без незворотної деградації.

Важливим поняттям тут є Точка біфуркації (або критичний поріг). Це момент, коли незначне додаткове навантаження призводить до лавиноподібного руйнування системи.

Завдання прогнозу: Визначити "відстань" від поточного стану системи до її критичного порогу.

Принцип емерджентності

Цей принцип стверджує, що ціла система має властивості, яких не мають її окремі частини.

Прогностичне значення: Неможливо спрогнозувати стан лісу, просто вивчивши стан кожного дерева окремо. Потрібно моделювати систему як цілісність, враховуючи синергетичні ефекти (коли $1 + 1 = 3$, тобто сумарний ефект від двох забруднювачів сильніший, ніж їх проста сума).

Сукцесія як вектор розвитку

Будь-яка екосистема знаходиться в процесі розвитку (сукцесії). Прогнозування має враховувати внутрішній "годинник" системи:

Первинна та вторинна сукцесії: Якщо ми прогнозуємо стан покинутого кар'єру, ми маємо спиратися на теорію сукцесій, щоб передбачити, через скільки років там з'явиться чагарник, а через скільки – ліс.

Резюме: Теоретичною базою прогнозу є знання про межі стійкості. Якщо ми знаємо ємність системи та її тип стійкості, ми можемо розрахувати допустимі норми викидів та терміни відновлення ресурсів.

1.3. Функціональна роль прогнозування в системі екологічного моніторингу та управління

Прогнозування не існує ізольовано; воно є сполучною ланкою між збором даних (моніторингом) та прийняттям рішень (менеджментом).

Триада: Моніторинг – Оцінка – Прогноз

В ієрархії екологічної безпеки ці три елементи утворюють нерозривний цикл:

1. Моніторинг: Констатація факту («Що відбувається зараз?»). Збір кількісних показників (ГДК, рівень шуму, концентрація CO₂).

2. Оцінка: Аналіз ситуації («Наскільки це небезпечно?»). Порівняння даних моніторингу з нормативами.

3. Прогноз: Динамічне моделювання («Що буде далі?»). Екстраполяція поточних тенденцій у майбутнє.

Висновок: Без моніторингу прогноз не має бази даних, а без прогнозу моніторинг перетворюється на безглузду фіксацію катастроф, що вже сталися.

Роль у процедурі ОВД та СЕО

На державному рівні прогнозування є обов'язковим елементом двох процедур:

Оцінка впливу на довкілля (ОВД): Проводиться для конкретних об'єктів (завод, ТЕЦ, кар'єр). Прогноз має дати відповідь: як будівництво об'єкта змінить стан повітря чи води через 5–10 років.

Стратегічна екологічна оцінка (СЕО): Прогнозування наслідків виконання цілих державних програм або планів розвитку міст. Це масштабний прогноз розвитку цілих галузей (наприклад, прогноз розвитку енергетики країни до 2050 року).

Прогнозування як інструмент управління ризиками

Управління на основі прогнозу дозволяє перейти від стратегії «реагування на збитки» (ліквідація наслідків) до стратегії «превентивних дій» (запобігання).

Функції прогнозу в управлінні:

Сигнальна: Попередження про наближення до «точок неповернення» (екологічних порогів).

Оптимізаційна: Вибір найбільш екологічно безпечного варіанту серед кількох альтернатив розвитку бізнесу чи регіону.

Коригувальна: Внесення змін у діючі екологічні нормативи, якщо прогноз показує їх недостатність.

Інформаційне забезпечення управління: результати прогнозування оформлюються у вигляді:

- картографічних моделей (карти прогнозного забруднення територій);
- сценарних записок для міністерств та відомств;
- екологічних паспортів територій з урахуванням майбутнього розвитку.

1.4. Історія та еволюція прогностичних досліджень в екології

Щоб розуміти сучасні методи, потрібно розглянути, як людство навчилося «бачити» майбутнє біосфери:

1. Домодельний період (до середини ХХ ст.): Прогнозування базувалося на простому спостереженні та інтуїції. Вважалося, що ресурси природи нескінченні.

2. Етап «Глобальних тривог» (1960–1970-ті рр.): Поява системного аналізу.

Римський клуб: Доповідь Д. Медоуза «Межі росту» (1972). Вперше за допомогою ЕОМ було спрогнозовано колапс цивілізації через вичерпання ресурсів та забруднення. Це був перший масштабний екологічний прогноз, що шокував світ.

3. Етап сталого розвитку (1980–2000-ні рр.): Прогнозування стає частиною міжнародного права. Доповідь «Наше спільне майбутнє» (Г. Х. Брундтланд). Акцент зміщується на прогнозування змін клімату (створення ІРСС).

4. Сучасний етап (Цифрова екологія): Використання Big Data, супутникового моніторингу та штучного інтелекту. Прогнози стають локальними, точними та короткостроковими (наприклад, прогноз розповсюдження смогу в мегаполісі на наступні 2 години).

1.5. Проблема невизначеності та ризиків у прогнозуванні

Екологічні системи належать до класу стохастичних (випадкових) та нелінійних. Це означає, що малий вплив у минулому може призвести до величезних наслідків у майбутньому (так званий «ефект метелика»).

Природа невизначеності

Невизначеність – це невід’ємна характеристика будь-якого екологічного прогнозу. Вона виникає через три групи чинників:

Недостатність знань (Епістемічна невизначеність): ми не до кінця розуміємо всі зв’язки в екосистемі (наприклад, як конкретний хімікат впливає на мікробіом ґрунту в довгостроковій перспективі).

Природна мінливість (Алеаторна невизначеність): природні процеси самі по собі є випадковими (посухи, повені, виверження вулканів), що вносить «шум» у розрахунки.

Антропогенна непередбачуваність: неможливо точно знати, які політичні чи економічні рішення будуть прийняті через 10 років (наприклад, раптова зміна курсу на декарбонізацію).

Поняття екологічного ризику

В прогнозуванні результат часто подається не як доконаний факт, а як ризик.

Екологічний ризик – це добуток імовірності настання несприятливої події на величину її негативних наслідків.

Прогнозист має оцінити:

– яка імовірність аварії на очисних спорудах?

– який збиток це завдає екосистемі річки?

Верифікація та достовірність прогнозів

Щоб перевірити якість прогнозу, використовують методи верифікації:

Пряма верифікація: очікування терміну, на який було зроблено прогноз, і порівняння з реальністю.

Опосередкована верифікація: порівняння результатів, отриманих різними методами (наприклад, коли експертна оцінка збігається з математичною моделлю).

Інверсна верифікація (Ретропрогноз): модель запускають «назад» у часі. Якщо вона правильно «передбачає» те, що вже сталося в минулому, їй можна довіряти в прогнозуванні майбутнього.

Принцип запобіжності (Precautionary Principle)

Це головний етичний та правовий висновок розділу. Якщо прогноз вказує на можливість серйозної або незворотної шкоди, відсутність повної наукової впевненості не повинна бути причиною для відкладання заходів щодо запобігання деградації довкілля.

Висновки до Розділу 1

Прогноз – це імовірнісна модель, а не догма.

Екосистеми мають межі стійкості (пороги), перехід яких веде до катастрофи.

Прогнозування є обов'язковим етапом будь-якого державного управління.

2. Класифікація та методи екологічних прогнозів

2.1. Класифікація екологічних прогнозів

Для наведення порядку в розмаїтті прогнозів їх групують за кількома ключовими ознаками:

За часовим горизонтом (випередженням):

1. Оперативні (до 1 місяця): прогнози погоди, рівнів смогу в містах, розповсюдження раптових розливів нафти.

2. Короткострокові (до 1 року): сезонні зміни, паводкові прогнози, прогнози чисельності шкідників сільського господарства.

3. Середньострокові (1–5 років): оцінка наслідків локальних проектів будівництва, динаміка популяцій тварин.

4. Довгострокові (5–15 років): стратегічне планування розвитку галузей промисловості, зміни лісових масивів.

5. Наддовгострокові (понад 15–20 років): глобальні зміни клімату, деградація ґрунтів, вичерпання природних ресурсів.

За просторовим охопленням:

Локальні: конкретне підприємство, місто, заповідник.

Регіональні: область, басейн річки (наприклад, Дніпра), гірська система.

Глобальні: планетарні процеси (озонові діри, танення льодовиків).

За об'єктом прогнозування:

Природні: прогноз змін лише природних компонентів (рельєф, клімат).

Антропогенні: прогноз змін, викликаних діяльністю людини (забруднення, забудова).

Соціально-екологічні: прогноз впливу змін довкілля на здоров'я та добробут людей.

2.2. Система методів екологічного прогнозування

Методи поділяють на дві великі групи: фактографічні (базуються на цифрах) та ****експертні**** (базуються на знаннях фахівців).

1. Експертні (інтуїтивні) методи

Використовуються, коли даних замало або система занадто нова.

Метод «Дельфі»: анонімне опитування групи експертів у кілька турів з обговоренням результатів. Мета – дійти консенсусу без тиску авторитетів.

Метод сценаріїв: побудова логічно послідовних «картин майбутнього» (що буде, якщо ми запровадимо податок на CO₂, і що – якщо ні).

Метод «Мозкового штурму»: генерація нестандартних ідей для вирішення гострих екологічних проблем.

2. Фактографічні (формалізовані) методи

Екстраполяція: перенесення закономірностей, знайдених у минулому, на майбутнє.

Математична основа: Якщо забруднення річки щороку зростало на 5%, ми припускаємо, що і в наступному році воно зросте на стільки ж (лінійна екстраполяція).

Метод історичної аналогії: якщо в минулому подібна екологічна ситуація призвела до певних наслідків, ми прогнозуємо такі ж наслідки для сучасного схожого об'єкта.

Метод огинаючих кривих: використовується для прогнозування науково-технічного прогресу (наприклад, як швидко відновлювана енергетика витіснить вугілля).

2.3. Специфіка біоіндикаційного прогнозування

Окремий метод в екології – використання «живих приладів».

За станом лишайників можна прогнозувати чистоту повітря на роки вперед.

Зміна видового складу дрібних ракоподібних у водоймі дозволяє спрогнозувати її майбутнє «цвітіння» (евтрофікацію) ще до того, як це зафіксують хімічні аналізи.

2.4. Послідовність етапів розробки прогнозу (Алгоритм)

Важливо зафіксувати етапність:

1. Передпрогнозна орієнтація: визначення об'єкта та мети.
2. Побудова прогнозової моделі: вибір методів та інструментів.
3. Збір даних (Ретроспекція): аналіз минулого.
4. Діагностика: виявлення ключових факторів впливу сьогодні.
5. Розрахунок прогнозу: отримання варіантів майбутнього.
6. Верифікація: оцінка достовірності.
7. Коригування: уточнення моделі за новими даними.

3. Методичні підходи: від експертних оцінок до екстраполяції

3.1. Експертні (інтуїтивні) методи: коли цифр недостатньо

Експертні методи застосовуються в умовах високої невизначеності або при прогнозуванні якісних стрибків (наприклад, поява нової технології очищення).

Метод «Дельфі» (Delphi): Суть: Багаторазове анонімне опитування експертів. Після кожного туру результати обробляються і повертаються учасникам для ознайомлення.

Перевага: Відсутність психологічного тиску «авторитетів» та групового мислення. Дозволяє отримати консенсус у складних екологічних питаннях.

Метод «Мозкового штурму» (Brainstorming): Спрямований на генерацію максимальної кількості ідей за короткий час. Використовується для пошуку нестандартних виходів з екологічних криз.

Морфологічний аналіз:* Розкладання проблеми на складові та побудова матриці всіх можливих комбінацій рішень. Це дозволяє не пропустити жоден сценарій розвитку подій.

3.2. Фактографічні методи: статистика

Екстраполяція трендів:

Це продовження тенденції, що склалася в минулому, на майбутнє.

Математичний нюанс: Може бути лінійною ($y = ax + b$) або експоненційною. Екологічні процеси (наприклад, ріст популяції шкідників) часто йдуть за експонентою, доки не впруться в ліміт ресурсів.

Метод історичної аналогії:

Порівняння поточного об'єкта з іншим, подібним за структурою, який уже пройшов певний етап розвитку. (Наприклад: прогнозування деградації Чорного моря на основі вивчення процесів, що вже відбулися в Азовському).

3.3. Сценарне прогнозування (Scenario Planning)

Це «золотий стандарт» сучасної екології. Прогнозист готує не один варіант, а мінімум три:

1. Песимістичний: «Все залишається як є» (Business as usual) – деградація при максимальних темпах впливу.
2. Оптимістичний: Впровадження найкращих доступних технологій та жорстких еко-стандартів.
3. Найбільш імовірний: Реальний сценарій з урахуванням економічних та політичних гальм.

4. Джерела похибок та верифікація прогнозів

Будь-який прогноз, який не містить оцінки своєї точності, – це просто художня література.

4.1. Класифікація похибок прогнозування

1. Інформаційні похибки: Недостовірність вхідних даних моніторингу, застаріле обладнання, помилки при відборі проб.
2. Методичні похибки: Невірно обрана математична модель (наприклад, спроба описати складний біологічний процес простою прямою лінією).
3. Параметричні похибки: Неправильне визначення коефіцієнтів (наприклад, недооцінка швидкості розчинення забруднювача у воді).

4.2. Чому екологічні системи важко прогнозувати?

Часовий лаг (затримка): Між викидом речовини та реакцією екосистеми можуть пройти роки. Прогнозист може помилково вважати, що все в нормі, поки не накопичиться критична маса змін.

Синергізм: Поєднання двох безпечних факторів може дати смертельний результат ($1+1=10$).

Нелінійність: Природа рідко змінюється рівномірно. Зазвичай це довгий період стабільності, а потім – миттєвий обвал (катастрофа).

4.3. Верифікація

Верифікація – це оцінка достовірності та точності прогнозу.

Ретроспективна перевірка: Модель перевіряється на даних минулих років. Якщо вона «передбачила» вчорашній день правильно, ми довіряємо їй завтрашній.

Паралельний прогноз: Розробка прогнозів різними групами вчених незалежно один від одного. Збіг результатів підвищує довіру до прогнозу.

Висновок: Екологічний прогноз – це не вирок, а інструмент для маневру. Його мета – змінити майбутнє на краще через зміну рішень у сьогодні.

Частина 2 (Екологічне моделювання)

Мета лекції: ознайомити студентів із методологією екологічного моделювання як засобу пізнання та управління екосистемами. Сформуванню розуміння типів моделей, етапів їх розробки, математичного апарату та способів перевірки моделей на адекватність реальним природним процесам.

План лекції

1. Концептуальні засади моделювання в екології
2. Класифікація екологічних моделей
3. Етапи побудови математичної моделі екосистеми
4. Математичний апарат та приклади базових моделей

1. Концептуальні засади моделювання в екології

1.1. Дефініція та сутність екологічного моделювання

Екологічне моделювання – це метод вивчення складних природних та природно-антропогенних систем шляхом побудови та дослідження їхніх моделей (спрощених замінників).

У системі екологічних знань моделювання виконує три фундаментальні функції:

Пізнавальна: дозволяє зрозуміти механізми функціонування систем, які неможливо побачити безпосередньо (наприклад, цикли азоту в океані).

Прогностична: відповідь на запитання «що буде, якщо...?».

Управлінська: вибір оптимального режиму експлуатації природних ресурсів.

Причини необхідності моделювання в екології

Чому ми не можемо обійтися просто спостереженнями?

Унікальність об'єктів: Ми маємо лише одну планету Земля. Ми не можемо провести експеримент із глобальним потеплінням у лабораторії, щоб подивитися, чи виживе людство.

Масштабність процесів: Екологічні процеси охоплюють тисячі кілометрів і тривають десятиліттями. Моделювання дозволяє «стиснути» простір і час.

Етична недопустимість: Прямий експеримент на живій природі, пов'язаний із руйнуванням екосистем або загибеллю видів, заборонений нормами моралі та права.

Велика кількість факторів: У природі все пов'язано з усім. Модель дозволяє виділити 2-3 головні фактори та відсіяти «шум».

Принципи побудови моделей

Для того, щоб модель не була просто набором цифр, вона має базуватися на наукових принципах:

Принцип ізоморфізму (подібності): Модель має бути структурно схожа на оригінал у тих аспектах, що нас цікавлять.

Принцип редукції (спрощення): Ми свідомо ігноруємо деталі. Якщо ми моделюємо розповсюдження диму з труби, нам не важливо, якого кольору ця труба, нам важливо лише її висота, діаметр та швидкість вітру.

Принцип декомпозиції: Складну систему (наприклад, ліс) ми розбиваємо на простіші блоки (грунт, дерева, комахи), моделюємо їх окремо, а потім з'єднуємо.

Принцип ієрархічності: Врахування того, що процеси на мікрорівні (метаболізм бактерій) впливають на макрорівень (очищення всієї річки).

Модель як інформаційний фільтр

Моделювання можна розглядати як процес фільтрації інформації.

На вході: Хаотичний набір даних моніторингу, спостережень, датчиків.

Процес: Відкидання несуттєвого через математичні рівняння.

На виході: Чиста тенденція або закономірність.

Важливо: Модель ніколи не є копією реальності. Як казав відомий статистик Джордж Бокс: "Усі моделі помилкові, але деякі з них корисні". Завдання еколога створити саме таку, «корисну» модель.

1.2. Теоретичні концепції розвитку екосистем як фундамент моделювання

Для того, щоб математичне рівняння мало сенс, воно повинно спиратися на біологічні та фізичні закони. У цьому підрозділі розглянемо основні концепції, які «зашиваються» всередину будь-якої екологічної моделі.

Принцип енергетичного балансу (Термодинамічний підхід)

Будь-яка екосистема – це машина з переробки енергії.

Суть для моделі: Моделювання часто зводиться до розрахунку потоків енергії (калорій або джоулів) від сонця до продуцентів (рослин) і далі по трофічному ланцюгу.

Закон 10% (піраміда Ліндемана): При переході з одного трофічного рівня на інший втрачається близько 90% енергії. Це число є базовою константою для більшості глобальних моделей біосфери.

Концепція «Лімітуючих факторів» (Закон Лібіха)

При моделюванні стану популяції не обов'язково враховувати всі 100 параметрів середовища.

Суть: Ріст системи обмежений тим фактором, який знаходиться в дефіциті (мінімумі).

Застосування: Якщо ми моделюємо врожайність, і рослинам бракує фосфору, то скільки б ми не додавали азоту (інший параметр моделі), результат не зміниться. Модель має ідентифікувати цей «вузький прохід».

Кибернетичний підхід: зворотні зв'язки

Екосистеми моделюються як саморегульовані системи з контурами зв'язку:

Негативний зворотний зв'язок: Стабілізує систему. (Наприклад: зросла кількість жертв → розплодилися хижаки → кількість жертв зменшилася). Це основа динамічної рівноваги.

Позитивний зворотний зв'язок: Веде до катастрофи або вибухового росту. (Наприклад: танення мерзлоти → викид метану → посилення парникового ефекту → ще більше танення). Моделювання таких процесів є критично важливим для прогнозів глобальних змін.

1.3. Об'єкти та рівні моделювання

В екологічному моделюванні чітко розмежовують рівні складності, оскільки для кожного з них потрібен свій математичний апарат:

Аутекологічний рівень (організм): моделювання реакції окремої особини на токсикант або температуру. (Фізіологічні моделі).

Демекологічний рівень (популяція): моделювання чисельності, народжуваності та смертності. (Моделі Мальтуса, Лотки-Вольтерри).

Синекологічний рівень (спільнота/екосистема): моделювання взаємодії багатьох видів, колообігу речовин (азоту, вуглецю) та трансформації енергії.

Біосферний рівень: Моделі глобальних геохімічних циклів та клімату.

1.4. Проблема масштабу та адекватності

Одним із найскладніших аспектів масштабування (scaling).

Проблема: Модель, яка ідеально працює для одного квадратного метра лісу, може дати абсолютно хибні результати для всього лісового масиву.

Адекватність моделі: Це міра відповідності моделі реальному об'єкту. Вона перевіряється через порівняння результатів моделювання з даними натурних спостережень. Якщо розбіжність перевищує допустиму (наприклад, 10–15%), модель вважається неадекватною і потребує перегляду структури.

2. Класифікація екологічних моделей

2.1. Класифікація за способом реалізації (Природа моделі)

Це базова характеристика, яка відповідає на питання: «З чого зроблена модель?».

1. Натурні (фізичні) моделі:

Це зменшені копії реальних об'єктів. Приклад: акваріум – це натурна модель озера; штучний лісовий масив у теплиці – модель екосистеми.

Перевага: Процеси в них справжні (біологічні).

Недолік: Дорого, важко масштабувати, неможливо змоделювати глобальні процеси.

2. Вербальні (описові) моделі:

Це текстовий опис логічних зв'язків. Наприклад: «Якщо температура зросте, то випаровування збільшиться, що призведе до засухи». Це перший крок до будь-якої складної моделі.

3. Математичні моделі:

Це опис системи мовою рівнянь, алгоритмів та цифр. Це основний інструмент сучасної екології.

Перевага: Можна прорахувати мільйони варіантів майбутнього за секунди.

2.2. Класифікація за врахуванням часу та випадковості

Моделі діляться залежно від того, наскільки «рухливим» та «передбачуваним» є світ усередині них.

А. За фактором часу:

Статичні моделі: Відображають стан системи в конкретний момент («фотографія»). Наприклад: карта забруднення міста на сьогодні.

Динамічні моделі: Описують зміни системи у часі («відео»). Наприклад: модель поширення хмари викидів від заводу протягом доби залежно від вітру.

Б. За ступенем визначеності (математична природа):

Детерміновані моделі: Виходять із того, що кожна дія має однозначний наслідок. Якщо ми ввели в рівняння X , на виході завжди отримаємо Y . Вони гарні для простих фізико-хімічних процесів.

Стохастичні (імовірнісні) моделі: Враховують елемент випадковості. Наприклад: ми знаємо, що риба відкладає ікру, але не знаємо точно, скільки мальків виживе (це лотерея). Такі моделі працюють із «діапазонами імовірності».

2.3. Класифікація за просторовою структурою та призначенням

А. За простором:

Точкові (нуль-мірні): Система розглядається як одна точка (наприклад, концентрація кисню в озері вважається однаковою всюди).

Розподілені: Враховують, що в різних точках простору показники різні (наприклад, карта температур океану).

Б. За метою використання:

1. Дослідницькі: Для перевірки наукових теорій (наприклад, як виникло життя).

2. Прогнозні: Для передбачення стану об'єкта в майбутньому.

3. Оптимізаційні: Для пошуку найкращого рішення (наприклад, яку кількість лісу можна вирубати, щоб він встиг відновитися).

4. Навчальні (імітаційні): Віртуальні тренажери для студентів або управлінців.

Резюме: Вибір типу моделі залежить від завдання. Для швидкої оцінки аварії на заводі підійде детермінована динамічна модель, а для стратегії виживання виду протягом 100 років – стохастична дослідницька модель.

3. Етапи побудови та реалізації математичної моделі

Побудова моделі – це ітераційний процес (циклічний). Якщо на останньому етапі виявиться, що модель не працює, ми повертаємося на початок.

3.1. Постановка задачі та концептуалізація (Вербальний етап)

Це найважливіший етап, де визначається доля майбутнього дослідження.

Визначення мети: Для чого нам модель? (Наприклад: спрогнозувати рівень кисню в ставку після скиду стічних вод).

Виділення об'єкта та його меж: Ми моделюємо весь ставок чи лише зону біля труби?

Вербальний опис: Складання логічної схеми зв'язків («якщо – то»). Визначення вхідних параметрів (температура, об'єм викидів) та вихідних (концентрація забруднювача).

3.2. Математична формалізація (Переклад на мову формул)

На цьому етапі логічні зв'язки перетворюються на систему рівнянь.

Вибір математичного апарату: диференціальні рівняння (для опису безперервних процесів) або алгебраїчні рівняння.

Визначення констант та змінних.

Спрощення: Виключення факторів, які мінімально впливають на результат, щоб модель не стала перевантаженою.

3.3. Параметризація та збір даних (Наповнення цифрами)

Модель – це «скелет», а дані – це «м'ясо».

Використання результатів моніторингу або лабораторних експериментів для встановлення конкретних значень коефіцієнтів.

Наприклад: якщо ми моделюємо ріст лісу, нам потрібні реальні цифри швидкості росту сосни в даному кліматичному поясі.

3.4. Програмна реалізація та чисельний експеримент

Створення алгоритму та написання коду (наприклад, на Python або в спеціалізованих середовищах типу STELLA, AnyLogic).

Перевірка внутрішньої логіки програми.

Запуск моделі з різними вхідними даними (сценарний аналіз).

3.5. Верифікація, калібрування та оцінка адекватності

Калібрування: «Підгонка» параметрів моделі так, щоб її результати максимально збігалися з реальними історичними даними.

Верифікація: Перевірка моделі на даних, які НЕ використовувалися при її створенні. Якщо модель правильно «передбачила» те, що вже відомо – вона працює.

Оцінка чутливості: Визначення того, наскільки сильно зміниться результат при невеликій зміні вхідних даних. Якщо зміна температури на 1 °C радикально змінює весь прогноз – модель занадто чутлива або нестабільна.

Резюме: Процес моделювання завершується лише тоді, коли модель доводить свою адекватність. Тільки після цього її можна використовувати для прийняття реальних управлінських рішень.

4. Математичний апарат та приклади базових моделей

Математика в екології – це не просто цифри, а мова, якою ми описуємо динаміку життя. Розглянемо еволюцію математичної думки: від найпростіших описів зростання до складних взаємодій видів.

4.1. Модель необмеженого росту (Експоненціальна модель Томаса Мальтуса)

Це найпростіша і водночас найфундаментальніша модель у демографії та екології, запропонована ще у 1798 році.

Суть: В ідеальних умовах (необмежені ресурси, відсутність ворогів) популяція зростає пропорційно до своєї поточної чисельності.

Математичний вираз:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N$$

де N – чисельність популяції, t – час, а r – коефіцієнт природного приросту (народжуваність мінус смертність).

Результат: Графік такої моделі – це J-подібна крива, що стрімко йде вгору.

Екологічний висновок: У природі такий ріст спостерігається лише короткочасно (наприклад, спалах чисельності сарани або бактерій у свіжому середовищі). Мальтус використовував цю модель, щоб попередити: ресурси зростають в арифметичній прогресії, а люди – в геометричній, що неминуче веде до кризи.

4.2. Модель обмеженого росту (Логістичне рівняння Ферхюльста)

Оскільки ресурси планети скінченні, модель Мальтуса потребувала доопрацювання. У 1838 році П'єр Ферхюльст додав у рівняння фактор «опору середовища».

Поняття ємності середовища (K): Це максимальна кількість особин, яку може прогодувати дана територія без руйнування.

Математичний вираз:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N \cdot \left(1 - \frac{N}{K}\right)$$

Зверніть увагу на дужку $(1 - N / K)$: коли чисельність N наближається до ємності K , вираз у дужках стає близьким до нуля, і ріст зупиняється.

Результат: S-подібна крива (сигмоїда). Популяція спочатку росте швидко, але потім стабілізується на рівні K .

Застосування: Це база для розрахунку норм вилову риби або полювання: щоб не знищити популяцію, можна вилучати лише той обсяг «приросту», який знаходиться на піку швидкості росту.

4.3. Модель взаємодії «Хижак – Жертва» (Модель Лотки – Вольтерри)

Це перехід від моделювання одного виду до моделювання екосистеми. У 1920-х роках Альфред Лотка та Віто Вольтерра незалежно один від одного описали коливання чисельності двох видів, що взаємодіють. Логіка системи:

1. Жертви розмножуються (як у Мальтуса), але їх поїдають хижаки.
2. Хижаки розмножуються лише тоді, коли є їжа (жертви), і вмирають природною смертю.

Математичний апарат: Система з двох диференціальних рівнянь:

$$\text{Для жертви: } \frac{dx}{dt} = ax - bxy$$

$$\text{Для хижака: } \frac{dy}{dt} = cxy - dy$$

(де x – жертви, y – хижаки, а xy – частота зустрічей між ними).

Результат: Автоколивальний процес. Графічно це дві хвилі, що йдуть одна за одною: спочатку зростає кількість жертв, через деякий час «наздоганяє» кількість хижаків, потім жертви виідаються і їх кількість падає, що веде до голоду та падіння кількості хижаків.

Екологічний висновок: Коливання в природі – це ознака здоров'я системи, а не її хвороби. Модель показує, як хижак підтримує стабільність популяції жертви.

4.4. Імітаційне моделювання складних систем

Коли кількість видів у моделі стає більшою за три, а факторів середовища (температура, опади, токсини) – десятки, аналітичні рівняння стають надто складними. Тут на допомогу приходять імітаційне моделювання.

Принцип: Комп'ютер прораховує стан кожного елемента системи через малі проміжки часу.

Метод Монте-Карло: Використання випадкових чисел для моделювання випадкових подій (наприклад, ймовірність того, що саме цього року трапиться масштабна лісова пожежа).

Агентне моделювання: Кожна особина в моделі (наприклад, дерево або олень) розглядається як окремий «агент» зі своїми правилами поведінки.

Контрольні питання

1. У чому полягає принципова відмінність між екологічним прогнозом та екологічним планом?
2. Що є об'єктом, а що – предметом екологічного прогнозування?
3. Поясніть роль ретроспективного аналізу у створенні прогнозу.
4. Як концепція гомеостазу допомагає визначити межі стійкості екосистеми?
5. Що таке «екологічна ємність території» і чому вона є лімітуючим фактором для прогнозу?
6. Дайте визначення поняттю «точка біфуркації» в контексті екологічної деградації.
7. За якими часовими ознаками класифікуються екологічні прогнози?
8. Чим відрізняється фоновий екологічний прогноз від нормативного?
9. У чому полягає суть методу «Дельфі» та коли його доцільно застосовувати?
10. Сформулюйте визначення екологічної моделі та поясніть принцип декомпозиції при її побудові.
11. Яка принципова різниця між натурною та математичною моделями?
12. У чому полягає відмінність між детермінованими і стохастичними, а також між статичними та динамічними моделями?
13. Опишіть умови у природі, за яких спостерігається тип росту популяції Мальтуса.

14. Що означає параметр K у логістичному рівнянні Ферхюльста та як опір середовища змінює характер росту популяції?

15. Опишіть механізм автоколивань у моделі «хижак-жертва» Лотки-Вольтерри і поясніть, чому хвиля чисельності хижака завжди відстає від хвилі жертви.

Лекція 12
МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ
РЕЧОВИН В АТМОСФЕРІ
(Модель Гаусса, програмні комплекси, оцінка ризиків)

Мета лекції: сформувати у студентів системні знання про математичні методи та інструменти моделювання процесів переносу й розсіювання домішок в атмосферному повітрі; навчити принципам роботи з сучасними програмними комплексами та методології оцінки ризиків для здоров'я населення на основі розрахованих полів концентрацій.

План лекції

1. Теоретичні основи атмосферної дифузії та модель Гаусса
2. Сучасні програмні комплекси для моделювання атмосферного розсіювання
3. Оцінка екологічних ризиків та ризиків для здоров'я населення

1. Теоретичні основи атмосферної дифузії та модель Гаусса

1.1. Фізико-метеорологічні фактори розсіювання домішок у приземному шарі атмосфери

Процес розповсюдження та розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері визначається складною взаємодією термодинамічних та гідродинамічних характеристик повітряного середовища. Атмосфера виступає як динамічний сепаратор: залежно від поточних метеорологічних умов вона може як миттєво очистити приземний шар за рахунок інтенсивного перемішування, так і акумулювати токсиканти до критичних концентрацій, створюючи загрозу смогу.

Ключовими фізико-метеорологічними факторами, які визначають траєкторію та швидкість дифузії домішок, є: вітровий режим (транспортний фактор), атмосферна турбулентність, механічна турбулентність, термічна (конвективна) турбулентність, вертикальний температурний градієнт та інверсії, зміна температури повітря з висотою та температурна інверсія.

Для математичного опису здатності атмосфери до перемішування у світовій практиці найчастіше використовують класи стійкості атмосфери за Паскуїлло-Гілфордом. Уся різноманітність метеорологічних станів розподілена на 6 основних класів (від А до F):

Клас А (Крайнє нестійка атмосфера): спостерігається у сонячний літній день при слабкому вітрі. Максимальна термічна турбулентність; факел швидко розсіюється, але сильно коливається.

Клас В (Помірно нестійка): характерна для теплих днів зі слабкою інсоляцією.

Клас С (Слабко нестійка): перехідний денний стан або сильна хмарність.

Клас D (Нейтральна атмосфера): повністю хмарна погода вдень або вночі, а також сильний вітер. Механічна турбулентність переважає над термічною. Сама модель Гаусса працює в цьому класі найбільш стабільно.

Клас Е (Слабко стійка): спостерігається вночі при помірній хмарності.

Клас F (Крайнє стійка атмосфера): ясна, безвітряна ніч, сильне радіаційне охолодження землі, потужна приземна інверсія. Перемішування практично відсутнє, факел забруднення не розсіюється, а тонкою концентрованою стрічкою тягнеться на кілометри.

Розрахунок та верифікація цих параметрів є першим обов'язковим кроком у будь-якій задачі моделювання атмосферного розсіювання домішок.

1.2. Структура та геометрія димового факела від стаціонарного джерела

При безперервному викиді забруднюючих речовин з організованого вертикального джерела (димаря) у рухоме повітряне середовище формується стійка просторова структура, яка називається димовим факелом. Геометрична форма та поведінка цього факела визначають, на якій відстані від джерела та в яких концентраціях шкідливі речовини досягнуть приземного шару атмосфери, де дихає людина.

Динаміка формування факела поділяється на дві послідовні стадії:

1. Динамічна стадія: безпосередньо на виході з гирла труби гази мають власну кінетичну енергію (швидкість виходу) та термічну плавучість (гарячий викид легший за холодну атмосферу). Під дією цих внутрішніх сил факел піднімається вертикально вгору, одночасно відхиляючись під дією поперечного вітру.

2. Дифузійна (метеорологічна) стадія: на певній відстані власна енергія струменя згасає, і подальше розширення факела відбувається виключно за рахунок вихрових турбулентних пульсацій атмосфери. Факел набуває форми конуса, що розширюється за вектором вітру (Рис. 1).

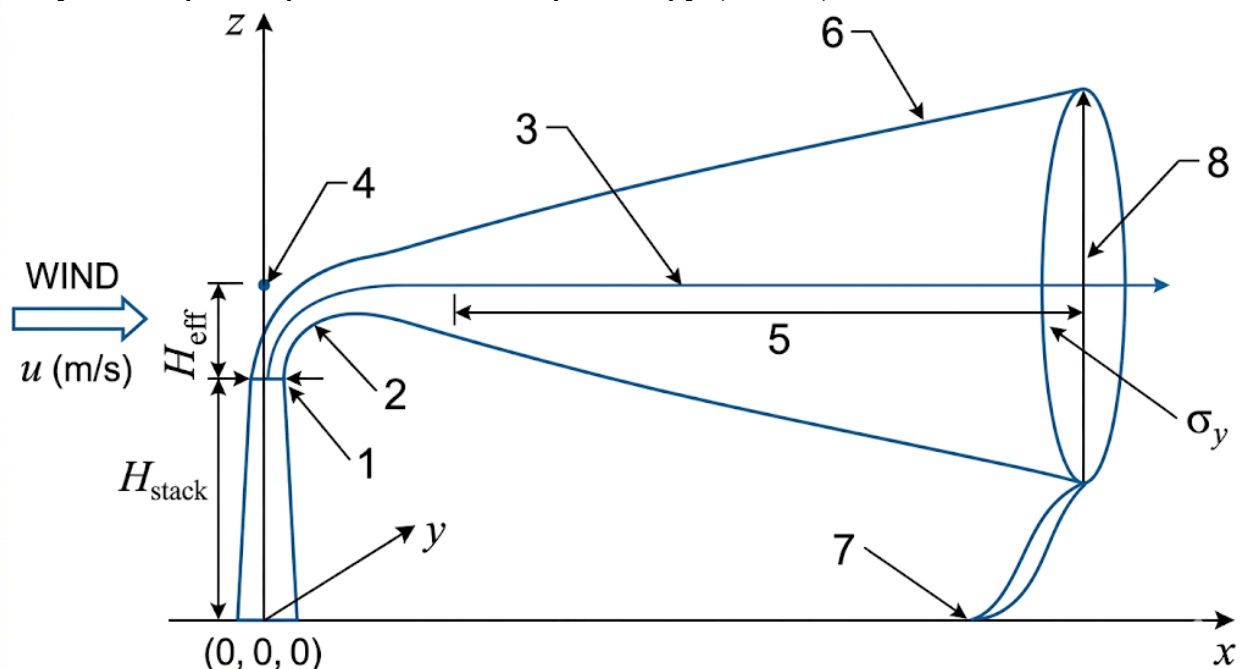


Рис. 1. Принципова схема геометричної структури димового факела
1 – Геометрична висота димаря (h, м): Фізична висота труби над рівнем землі.

- 2 – Початковий підйом факела (Δh , м): Вертикальна відстань, яку домішка долає за рахунок власної швидкості та термічної плавучості.
- 3 – Ефективна висота викиду (H_{eff} , м): Сума геометричної висоти труби та початкового підйому ($H_{\text{eff}} = h + \Delta h$). Саме цей параметр використовується як висота джерела в розрахунках.
- 4 – Вісь факела: Уявна лінія максимальних концентрацій, що збігається з напрямком вітру (x -вісь) на висоті H_{eff} .
- 5 – Профіль розподілу домішки: На схемі видно, що концентрація є максимальною на осі (4) та спадає до країв за законом нормального розподілу (дзвоноподібна крива).
- 6 – Показник горизонтальної дисперсії (σ_y , м): Відстань від осі факела по горизонталі (y -вісь), на якій концентрація зменшується у певну кількість разів. Визначає ширину конуса.
- 7 – Показник вертикальної дисперсії (σ_z , м): Відстань від осі факела по вертикалі (z -вісь), що визначає висоту конуса.
- 8 – Відстань від джерела (x , м): Ключова змінна. Показники дисперсії (σ_y , σ_z) зростають у міру віддалення від труби ($x \rightarrow \infty$).

Важливим практичним аспектом аналізу геометрії факела є його взаємодія з підстильною поверхнею. У міру віддалення від джерела за віссю x конус диму розширюється вертикально вниз і на певній відстані торкається землі. Оскільки ґрунт і споруди є фізичною перешкодою, для більшості неконденсованих газів виникає ефект повного відбиття домішки від поверхні землі. Це призводить до вторинного накопичення токсикантів у приземному шарі атмосфери, що математично враховується в розрахункових рівняннях як дія другого «дзеркального» (уявного) джерела, розташованого під землею.

Також геометрія факела безпосередньо залежить від розглянутих раніше класів стійкості атмосфери. Залежно від температурного градієнта виділяють кілька класичних форм факела:

- хвилеподібний: при сильній конвекції (клас А) факел розпадається на великі пласти й швидко торкається землі великими «порціями»;
- конічний: при нейтральному стані (клас D), що є класичним випадком для розрахунків;
- плаский / стрічковий: при сильних інверсіях (клас F), коли факел майже не розширюється по вертикалі, нагадуючи тонку горизонтальну стрічку.

Розуміння просторових меж факела, його осей та механізму відбиття від землі є інженерною основою для виведення головного розрахункового рівняння атмосферної дифузії.

1.3. Виведення та аналіз класичного рівняння Гауссової моделі розсіювання

Гауссова модель розсіювання домішок є фундаментальною аналітичною базою в інженерній екології, яка описує розподіл концентрацій речовин у просторі від безперервного стаціонарного джерела. Математичний апарат моделі базується на розв'язанні диференціального рівняння атмосферної

дифузії за припущення, що розподіл маси речовини у поперечному перерізі факела підпорядковується закону нормального (гауссового) розподілу ймовірностей.

Класичне тривимірне рівняння Гаусса для розрахунку концентрації домішки C у будь-якій просторовій точці з координатами (x, y, z) має такий вигляд:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z - H_{\text{eff}})^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + H_{\text{eff}})^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

де: $C_{(x,y,z)}$ – концентрація забруднюючої речовини в розрахунковій точці ($\text{г}/\text{м}^3$);

Q – потужність джерела викиду, тобто маса речовини, яка надходить в атмосферу за одиницю часу ($\text{г}/\text{с}$);

u – середня швидкість вітру на висоті гирла джерела ($\text{м}/\text{с}$);

σ_y, σ_z – середньоквадратичні відхилення розподілу домішки (параметри дисперсії) за горизонтальною та вертикальною осями відповідно (м).

Структурно рівняння складається з трьох послідовних мультиплікативних блоків (співмножників):

1. Амплітудний множник: $\frac{Q}{2\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z}$ – визначає максимальний теоретичний рівень концентрації на осі факела для поточної відстані.

2. Горизонтальний Гауссів розкид: $\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$ – описує, як стрімко зменшується концентрація вбік від центральної осі вітру. Якщо розрахункова точка лежить суворо на осі факела ($y = 0$), цей множник перетворюється на $e^0 = 1$.

3. Вертикальний Гауссів розкид з урахуванням відбиття від землі: блок містить суму двох експонент у квадратних дужках.

3.1 $\exp\left(-\frac{(z - H_{\text{eff}})^2}{2\sigma_z^2}\right)$ описує пряме розсіювання від віртуального джерела, піднятого на ефективну висоту H_{eff} .

3.2 $\exp\left(-\frac{(z + H_{\text{eff}})^2}{2\sigma_z^2}\right)$ моделює «дзеркальне відбиття» домішки від поверхні землі, вона математично додає масу відбитого газу назад у приземний шар.

Для практичних екологічних розрахунків найчастіше визначають концентрацію безпосередньо у приземному шарі атмосфери, тобто на рівні дихання людини ($z = 0$). За цієї умови рівняння спрощується, оскільки обидва вертикальні експоненціальні члени стають ідентичними і додаються:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{H_{\text{eff}}^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Аналіз цього рівняння показує, що приземна концентрація критично залежить від квадратів параметрів H_{eff} та σ_z у показнику степеня, що робить правильний розрахунок початкового підйому газів найважливішим етапом екологічного проектування висотних споруд.

1.4. Параметри просторової дисперсії та математичне визначення ефективної висоти викиду

Для практичного застосування повного рівняння Гаусса необхідно кількісно визначити три ключові змінні: коефіцієнти просторового розсіювання (σ_y, σ_z) та ефективну висоту (H_{eff}).

1. Визначення параметрів дисперсії (σ_y, σ_z):

Універсальних констант для цих величин не існує, оскільки вони нелінійно зростають у міру віддалення від джерела за віссю x . Для їхнього розрахунку використовуються емпіричні степеневі функції Бріггса, адаптовані під класи стійкості атмосфери за Паскуїллом: $\sigma_y = ax^b$; $\sigma_z = cx^d$; де a, b, c, d – безрозмірні коефіцієнти, що обираються за спеціальними інженерними таблицями для кожного класу стійкості (А, В, С, D, Е, F).

2. Розрахунок ефективної висоти викиду (H_{eff}):

Як зазначалося, факел піднімається вище гирла труби за рахунок імпульсу та температури газів. Цей додатковий підйом (Δh) розраховується за класичною формулою Холланда:

$$\Delta h = \frac{w \cdot d}{u} \cdot \left[1.5 + 2.68 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \cdot d \right]$$

де: w – швидкість виходу газів з гирла труби (м/с);

d – внутрішній діаметр гирла труби (м);

u – швидкість вітру (м/с);

P – атмосферний тиск (мбар);

T_s – температура газової суміші на виході (К);

T_a – температура навколишнього повітря (К).

Після визначення Δh обчислюється фінальна координата віртуального джерела: $H_{\text{eff}} = h_{\text{геом}} + \Delta h$.

2. Сучасні програмні комплекси для моделювання атмосферного розсіювання

2.1. Еволюція розрахункових методик: від емпіричних моделей (ОНД-86) до чисельних тривимірних систем

Розвиток методів розрахунку розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері пройшов довгий шлях від спрощених емпіричних закономірностей до складних тривимірних гідродинамічних моделей. Ця еволюція була тісно пов'язана зі збільшенням обчислювальних потужностей комп'ютерів та жорсткішанням екологічних стандартів у світі.

Історично та методологічно виділяють три основні етапи розвитку розрахункових комплексів:

1. Радянська емпірична школа (Методика ОНД-86):

Довгий час в Україні та країнах СНД базовим нормативним документом був ОНД-86 («Общесоюзный нормативный документ»). На його основі створювалися перші програми на ЕОМ (наприклад, серія «Еколог», «Ефір»).

Це повністю емпірична модель, яка розраховує не середньорічні чи поточні концентрації, а виключно максимально разові несприятливі концентрації при найгірших метеорологічних умовах.

Недоліки: ОНД-86 не використовує класи стійкості атмосфери, не здатна адекватно прорахувати розсіювання в умовах штилю (при швидкості вітру 0 м/с формула дає математичну невизначеність) та має величезні похибки при моделюванні складного пересіченого рельєфу (гірська місцевість, яри).

2. Аналітичні Гауссові системи нового покоління:

З кінця 1990-х років світовим стандартом стали комп'ютерні комплекси, що базуються на розв'язанні рівняння Гаусса для безперервного струменя (Plume models) або дискретних порцій диму (Puff models). Вони використовують реальні погодинні метеорологічні дані за кілька років, що дозволяє будувати не просто абстрактне максимальне поле, а реальну динаміку забруднення для кожного дня й години.

3. Сучасні CFD-моделі (Computational Fluid Dynamics):

Це тривимірні чисельні моделі гідродинаміки та мікромасштабної турбулентності. Вони безпосередньо розв'язують систему диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для повітряного потоку навколо будівель, конструкцій та елементів міського ландшафту. Вони вимагають значних обчислювальних ресурсів, але дають майже стовідсоткову точність у межах окремого заводського цеху або міського кварталу («вуличні каньйони»).

2.2. Індустріальні стандарти США та ЄС: програмні комплекси AERMOD та ADMS

У сучасній міжнародній екологічній практиці та при проведенні Оцінки впливу на довкілля (ОВД) за європейськими стандартами лідерами серед програмного забезпечення є два індустріальні комплекси: AERMOD та ADMS.

AERMOD (США): розроблений Американським агентством з охорони навколишнього середовища (US EPA) та є обов'язковим для використання у США та багатьох країнах світу для моделювання промислових викидів у радіусі до 50 км.

Математична суть: сучасні моделі AERMOD розраховують вертикальну та поперечну структуру турбулентності не через фіксовані класи Паскуїлла, а безперервно, використовуючи поняття планетарного приземного шару (моніторинг потоків тепла, висоти перемішування, масштабу довжини Моніна-Обухова).

Складові комплексу: включає процесор метеоданих (AERMET), який готує погодинні профілі вітру й температури, та процесор рельєфу (AERMAP), який враховує вплив пагорбів та низовин на траєкторію факела.

Програмний комплекс ADMS (Велика Британія):

Atmospheric Dispersion Modelling System є основним європейським інструментом штучного інтелекту та моделювання для промислового та міського планування (модифікація ADMS-Urban активно застосовується для прорахунку викидів автотранспорту на вулицях міст).

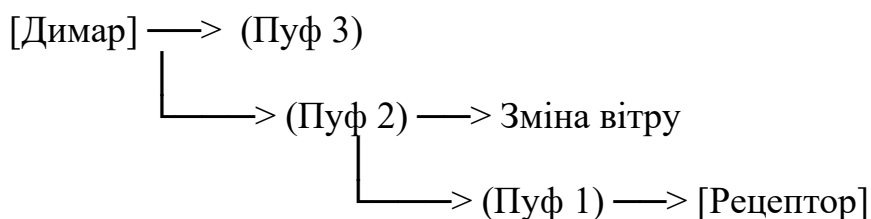
Особливість: це модель «нового покоління», яка використовує інноваційні алгоритми для розрахунку розсіювання всередині міської забудови. Програма здатна моделювати складні фізичні процеси: сухе та вологе вимивання дощом, хімічні реакції трансформації газів у повітрі (наприклад, перетворення NO в NO₂ під дією озону), а також падіння факела за будівлею в зону аеродинамічної тіні (ефект building downwash).

2.3. Лагранжеві пуфові моделі (CALPUFF) для розрахунку транскордонного перенесення

Коли виникає завдання змоделювати поширення забруднюючих речовин на великі відстані (від 50 до кількох сотень або тисяч кілометрів), класичні моделі факела (AERMOD, ADMS) стають неефективними. На таких масштабах напрямок і швидкість вітру встигають кардинально змінитися кілька разів, поки хмара летить від джерела. Для розв'язання таких задач використовують CALPUFF.

Принцип Лагранжевого пуфа (Puff-модель): CALPUFF не моделює безперервний конус диму. Замість цього програма умовно розбиває безперервний викид підприємства на дискретні порції – «пуфи» (газові кулі або пакети). Кожен такий пухф випускається в атмосферу один за одним (наприклад, раз на хвилину) і починає рухатися у просторі як самостійний об'єкт.

МОДЕЛЬ ЛАГРАНЖЕВОГО ПУФА (CALPUFF)



Переваги CALPUFF на великих масштабах:

Нестаціонарність полів: кожен пухф летить суворо за тим вектором вітру, який існує в даній конкретній точці простору в дану хвилину. Якщо вітер розвернувся на 180°, пухф 1 полетить на північ, а випущений за ним пухф 2 – на південь.

Транскордонне забруднення: CALPUFF є офіційно рекомендованою моделлю ЕРА для оцінки довготривалого перенесення речовин через державні кордони та для аналізу утворення вторинних аерозолів (сульфатів і нітратів) у масштабах цілих континентів.

2.4. Інтеграція програмного забезпечення з ГІС та цифровими моделями рельєфу

Сучасне екологічне моделювання немислиме без інтеграції з ГІС. ГІС виступає одночасно і як джерело вхідних просторових даних, і як інструмент візуалізації результатів розрахунку.

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР / DEM):

Програмні комплекси імпортують тривимірні матриці висот земної поверхні (наприклад, радарні дані SRTM). Це дозволяє програмі коригувати вертикальні коефіцієнти дифузії σ_z : коли факел натикається на схил гори, модель прораховує або його механічне підняття потоком, або пряме зіткнення хмари з рельєфом, де виникнуть максимальні приземні концентрації.

ГІС як інструмент фінального аналізу:

Після того, як ядро моделі (наприклад, AERMOD) прорахувало концентрації у тисячах вузлів розрахункової сітки, ці дані експортуються у формі шейп-файлів (shapefiles) або растрових шарів у ГІС (ArcGIS, QGIS).

В ГІС-середовищі еколог будує ізолінії однакових концентрацій (ізоплети) та накладає їх на цифрову карту міста. Це дає змогу миттєво побачити, які саме житлові будинки, школи чи лікарні потрапляють у зону перевищення ГДК.

3. Оцінка екологічних ризиків та ризиків для здоров'я населення

Результати моделювання розсіювання (поля приземних концентрацій) самі по собі є лише технічними показниками. Для оцінки реальних наслідків цього забруднення для людей застосовується Методологія оцінки ризиків для здоров'я населення. Цей підхід був розроблений Національною академією наук США, стандартизований Агентством з охорони навколишнього середовища (US EPA) і рекомендований Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ).

Ризик у даному контексті – це ймовірність розвитку несприятливих ефектів у здоров'ї людини або її нащадків внаслідок впливу факторів довкілля.

Методологія базується на чотирьох послідовних етапах:

1. Ідентифікація небезпеки (Hazard Identification);
2. Оцінка залежності «доза – ефект» (Dose-Response Assessment);
3. Оцінка експозиції (Exposure Assessment);
4. Характеристика ризику (Risk Characterization).

3.1 Специфічні види ризиків для атмосферного середовища

1. Ризики від «невихлопних» емісій транспорту (Non-Exhaust Emissions Risks)

Сучасний автотранспорт зазнає жорсткого екологічного контролю вихлопних газів (стандарти Євро-6/Євро-7), проте математичне моделювання показує стрімке зростання ризиків від невихлопних джерел. Вони формують специфічне аерозольне хмараще вздовж магістралей і включають:

– знос гальмівних колодок та дисків: генерує в атмосферу ультрадисперсні частинки металів. Ризик полягає в інгаляційному надходженні сурми (Sb), міді (Cu) та заліза (Fe), які діють як потужні катализатори окиснювального стресу в легенях.

– знос дорожнього покриття та шин: мікропластик і гумовий пил містять токсичні пластифікатори, такі як BPPD-хинон. Моделювання ризику від емісії шинного пилу зараз є критичним, оскільки ця речовина має надвисоку екотоксичність для водних рецепторів після вимивання опадами з атмосфери.

2. Ризик атмосферних «островів тепла» та синергетичного смогу (Urban Heat Island & Photochemical Synergism)

У великих містах формується феномен Urban Heat Island (UHI) – температурна аномалія, за якої центр міста на 3–8°C тепліший за передмістя через щільну забудову та асфальтове покриття.

Специфіка ризику: ризик тут моделюється як синергетичний ефект. За підвищених температур швидкість утворення вторинного тропосферного озону (O₃) зростає експоненційно.

Моделювання кумулятивного ризику: інженерна модель розраховує сумарний ризик для літнього періоду за формулою комбінованого впливу теплового стресу (температурне навантаження на серцево-судинну систему) та одночасного пікового інгаляційного отруєння озоном. Ці ризики підсилюють один одного, викликаючи стрибкоподібне зростання госпіталізацій.

3. Аеробіологічні та мікробіологічні ризики атмосфери (Aerobiological & Bioaerosol Risks)

Атмосферне повітря розглядається не лише як хімічний розчин, а як транспортне середовище для біоаерозолів:

– ризик мікробіологічного перенесення на пилових матрицях: частинки пилу PM₁₀ та сажі діють як «носії» (carriers) для бактерій, вірусів та спор грибів. Токсичні гази (SO₂, NO₂) пошкоджують слизову оболонку дихальних шляхів людини, роблячи її вразливою до цих біоаерозолів.

– алергенний ризик: моделювання поширення пилку алергенних рослин (наприклад, амброзії) з урахуванням швидкості вітру та кліматичних змін. Розраховується індекс сенсibiliзації населення на основі просторової щільності рослин-джерел та динаміки повітряних мас.

3.2 Методи кількісного розрахунку екологічних ризиків для біоти (Ecological Risk Assessment – ERA)

На відміну від ризиків для здоров'я людини, екологічний ризик для атмосфери оцінює загрозу деградації природних екосистем (лісів, агроценозів, популяцій тварин) під дією хронічних викидів.

Основним інженерним інструментом є розрахунок Коефіцієнта екологічної небезпеки (EEQ – Environmental Exposure Quotient):

$$EEQ = EEC / PNEC$$

де: EEC (Expected Environmental Concentration) – очікувана концентрація забруднюючої речовини в атмосферному повітрі, розрахована за моделлю

розсіювання для конкретної екосистеми (мг/м^3 або мг/кг ґрунту після осадження шлейфу).

PNEC (Predicted No-Effect Concentration) – розрахована концентрація, що не викликає негативних ефектів у біоти. Вона визначається на основі екотоксикологічних тестів (LC_{50} , EC_{50} для тест-об'єктів) із застосуванням факторів невизначеності (Assessment Factors від 10 до 1000).

3.3 Концепція критичних навантажень

Для лісових екосистем ризик транскордонного атмосферного забруднення оцінюється через перевищення критичних навантажень кислотності та азоту:

Критичне навантаження (Critical Load) – це кількісна оцінка впливу однієї або кількох забруднюючих речовин (наприклад, випадіння іонів S та N з кислими дощами), нижче якої, за сучасними науковими знаннями, не виникає шкідливих ефектів на чутливі елементи довкілля у довгостроковій перспективі. Якщо розраховане за допомогою моделей осадження реальне випадіння сірки перевищує критичне навантаження для конкретного типу ґрунту лісу, модель сигналізує про ризик початку масової деградації (всихання крони, вимивання кальцію та магнію з ґрунтової матриці).

Контрольні питання

1. Які три ключові фізико-метеорологічні фактори визначають швидкість та вектор дифузії шкідливих домішок у приземному шарі атмосфери?
2. Що таке температурна інверсія та за яким механізмом вона впливає на накопичення забруднюючих речовин біля землі?
3. На які класи розподіляється стан атмосфери за класифікацією Паскуїлла-Гілфорда?
4. Які дві послідовні стадії виділяють у процесі динаміки формування та підйому димового факела?
5. З якою метою при розрахунках розсіювання вводиться поняття ефективної висоти викиду?
6. За яким фізичним принципом підстильна поверхня землі впливає на концентрацію газів у приземному шарі?
7. Які інженерні та метеорологічні змінні входять до амплітудного множника класичного рівняння Гаусса?
8. Від яких двох факторів нелінійно залежать параметри горизонтальної та вертикальної дисперсії в моделі Гаусса?
9. У чому полягає принципова методологічна відмінність радянської методики ОНД-86 від сучасних аналітичних моделей нового покоління?
10. Для розв'язання яких екологічних задач призначений програмний комплекс AERMOD?
11. Які специфічні фізико-хімічні процеси в міській забудові здатна моделювати європейська система ADMS?

12. У чому полягає математичний принцип Лагранжевого пуфа в моделі CALPUFF та при яких масштабах перенесення його використовують?

13. Яким чином цифрові моделі рельєфу допомагають коригувати точність розрахунку полів концентрацій у ГІС?

14. Назвіть чотири обов'язкові етапи методології оцінки ризиків для здоров'я населення при хімічному забрудненні повітря.

15. Як розраховується коефіцієнт небезпеки для речовин із пороговою дією та за яким критерієм оцінюється величина індивідуального канцерогенного ризику?

Лекція 13
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ГІДРОСФЕРІ
(Моделі Стреттера-Фелпса, моделювання розведення та самоочищення
водних об'єктів)

Мета лекції: сформувати у студентів розуміння фізико-хімічних процесів формування якості води у поверхневих водоймах; навчити математичним методам моделювання розведення стічних вод, динаміки кисневого режиму та процесів самоочищення річок, зокрема за допомогою класичної моделі Стрітера-Фелпса.

План лекції

1. Гідродинамічні основи розведення стічних вод та класифікація моделей
2. Математичне моделювання кисневого режиму: модель Стрітера-Фелпса
3. Моделювання самоочищення та сучасні програмні комплекси для водних екосистем

1. Гідродинамічні основи розведення стічних вод та класифікація моделей

1.1. Механізми переносу домішок у водних об'єктах: адвекція, турбулентна дифузія та гідравлічна дисперсія

Формування якості води у річкових системах та водосховищах після скиду стічних вод визначається сукупністю складних гідродинамічних процесів. Поведінка, траєкторія та швидкість поширення забруднюючої речовини у водному потоці підпорядковуються законам гідравліки та описуються через три основні фізичні механізми переносу маси:

– адвекція (адвективний перенос): це механічне перенесення маси забруднюючої речовини разом із основним потоком води зі середньою швидкістю течії річки (v , м/с). Адвекція визначає головний вектор руху плями забруднення вздовж русла. Якщо уявити ідеальну річку без перемішування, то скинута порція фарби рухалася б у вигляді компактної плями вниз за течією, не змінюючи своїх геометричних розмірів, а лише змінюючи координату свого положення у часі;

– турбулентна дифузія: це процес вирівнювання концентрацій домішки у просторі під дією хаотичних пульсацій швидкостей у турбулентному водному потоці. Турбулентна дифузія діє в усіх трьох напрямках, змушуючи пляму забруднення розширюватися вшир (до берегів) та вглиб (до дна), одночасно знижуючи максимальну концентрацію в центрі вихідного скиду. Швидкість цього процесу на порядки перевищує швидкість молекулярної дифузії;

– гідравлічна (поздовжня) дисперсія: виникає внаслідок нерівномірного розподілу швидкостей течії по перерізу річки. Через тертя води об дно та береги швидкість потоку біля руслових меж є мінімальною (наближається до нуля), тоді як на стрижневій частині річки (на фарватері) та біля поверхні вона є максимальною. Внаслідок цього центральна частина плями забруднення

стрімко летить уперед, а прибережні та придонні шари «відстають». Геометрично пляма забруднення витягується вздовж русла річки, набуваючи еліпсоподібної форми.

Сукупна дія цих трьох чинників зумовлює те, що початковий концентрований скид стічних вод утворює динамічний шлейф (факел забруднення), який у міру руху вниз за течією безперервно розширюється, втрачає пікову концентрацію та прагне до повного змішування з усією масою річкової води. Математичний опис цього балансу є першим кроком до розрахунку самоочищення річки.

1.2. Поняття про початкове, основне та повне розведення стічних вод і коефіцієнт змішування

Процес гідродинамічного змішування стічних вод із річковою водою є просторово неоднорідним. У міру віддалення від місця випуску стічних вод руслом річки виділяють три послідовні стадії (зони) розведення:

– початкове розведення: відбувається безпосередньо у місці випуску стічних вод. Воно зумовлене не гідродинамікою самої річки, а початковою кінетичною енергією струменя (швидкістю виходу з труби) та різницею густин стічної та річкової води (наприклад, якщо стічні води тепліші). Струмінь інтенсивно втягує в себе навколишню воду, утворюючи зону бурхливого турбулентного перемішування;

– основне розведення: починається там, за межами початкового розведення, де власна швидкість струменя згасає, і перенесення домішки повністю підпорядковується законам річкового потоку (турбулентній дифузії та адвекції). Факел забруднення розширюється, доки не досягне берегів або дна річки;

– повне розведення (повне змішування): це теоретичний створ нижче за течією, починаючи з якого концентрація забруднюючої речовини стає практично однаковою по всьому поперечному перерізу річки (від берега до берега і від поверхні до дна). Подальше зниження концентрації можливе лише за рахунок хімічних чи біологічних процесів самоочищення.

Для кількісного опису цих процесів на практиці використовують коефіцієнт змішування (γ). Він показує, яка саме частина річкового потоку встигає повністю змішатися зі стічними водами у конкретному створі річки (наприклад, у створі найближчого водокористування).

Коефіцієнт змішування варіюється в межах $0 < \gamma \leq 1$:

Розрахунок коефіцієнта змішування за класичним методом Родзиллера є обов'язковим етапом для інженерного проектування випусків та визначення нормативів ГДС.

1.3. Класифікація математичних моделей гідросфери за розмірністю та режимом

Для прогнозування якості води та розрахунку полів концентрацій у водних інженерних задачах використовують різні типи математичних моделей. Вибір конкретної моделі залежить від морфометрії водного об'єкта

(велика глибока річка, мілководний струмок, глибоке водосховище) та ступеня деталізації, якого вимагає екологічна експертиза.

За просторовою розмірністю математичні моделі гідросфери поділяються на чотири основні класи:

Нульвимірні моделі (моделі повного змішування):

У таких моделях просторова неоднорідність взагалі не враховується. Припускається, що стічна вода миттєво і рівномірно розподіляється по всьому об'єму водойми. Водойма розглядається як єдиний резервуар (котел) з ідеальним перемішуванням.

Застосування: малі озера, ставки або замкнуті технологічні резервуари.

Одновимірні моделі (1D):

У цих моделях концентрація забруднювальної речовини змінюється лише в одному напрямку – вздовж русла річки (вісь x). Припускається, що за шириною і глибиною річки концентрація домішки вже повністю вирівнялася.

Застосування: довгі, відносно вузькі та мілководні річки на великій відстані від місця скиду. Модель Стрітера-Фелпса, яку ми розглянемо далі, є класичним прикладом одновимірної моделі.

Двовимірні моделі (2D):

Враховують зміну концентрацій у двох координатах. Вони поділяються на два підтипи:

– Планові моделі (x, y): враховують зміну вздовж течії та за шириною річки. Використовуються для широких мілководних річок, де важливо прорахувати притиснення плями забруднення до одного з берегів.

– Профільні моделі (x, z): враховують зміну вздовж течії та за глибиною. Застосовуються для глибоких каналів та водосховищ із вираженою температурною стратифікацією (термокліном).

Тривимірні моделі (3D):

Найбільш повні системи, які розраховують концентрацію речовини як функцію $C(x, y, z, t)$. Вони одночасно враховують поздовжній перенос, поперечну дифузію та вертикальне осідання (седиментацію) частинок домішки.

Застосування: великі глибокі водосховища, морські естуарії, зони поблизу потужних глибоководних випусків.

За режимом часу моделі поділяються на:

Стационарні (статичні): припускають, що витрата річки, об'єм скиду та концентрація речовин є незмінними у часі. Модель розраховує сталий, «застиглий» стан забруднення.

Нестационарні (динамічні): враховують коливання параметрів у часі (наприклад, залповий скид заводу, паводок або добові зміни температури води).

2. Математичне моделювання кисневого режиму: модель Стрітера-Фелпса

2.1. Кінетика споживання розчиненого кисню на біохімічне окиснення органіки (процес БСК)

Найважливішим індикатором екологічного благополуччя та біологічної повноцінності водного об'єкта є концентрація розчиненого у воді кисню (O_2 , мг/л). Коли у річку скидаються стічні води, що містять органічні речовини (господарсько-побутові стоки, відходи харчової чи целюлозно-паперової промисловості), баланс кисню різко порушується.

Аеробні бактерії та мікроорганізми починають активно розкладати (мінералізувати) цю незакріплену органіку, використовуючи розчинений у воді кисень для свого дихання та метаболізму. Цей біохімічний процес споживання кисню описується показником БСК – біохімічне споживання кисню (в англійській літературі – BOD, Biochemical Oxygen Demand).

Кінетика споживання кисню (зменшення концентрації органіки у часі) описується диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 \cdot L$$

де: L – залишкове БСК (кількість органіки, яку ще належить окиснити) на момент часу t , мг/л;

t – час транспортування домішки потоком від місця скиду, доба;

K_1 – константа швидкості біохімічного окиснення (деоксигенації), доба⁻¹.

Інтегрування цього рівняння дає класичну експоненціальну залежність, яка показує, що максимальне споживання кисню відбувається у перші дні після скиду, а у міру виїдання органічного субстрату швидкість процесу затухає:

$$L_t = L_0 \cdot \exp(-K_1 \cdot t)$$

Значення константи K_1 критично залежить від хімічної структури стоків та температури води. Що тепліша вода в річці (наприклад, у літній межень), то вища активність бактерій і то стрімкіше вони виїдають кисень, створюючи загрозу замору риби.

2.2. Процес природної реаерації водного об'єкта та його залежність від гідравлічних параметрів

Паралельно з процесом деоксигенації (заглушенням кисню бактеріями) у річці безперервно протікає протилежний, позитивний процес – атмосферна реаерація. Це фізичний процес дифузії та розчинення кисню повітря через дзеркало води у водну товщу.

Швидкість надходження кисню в річку прямо пропорційна дефіциту кисню (D , мг/л). Дефіцит – це різниця між максимально можливим (насичуючим) вмістом кисню за даної температури (C_s) та його реальним поточним вмістом (C):

$$D = C_s - C.$$

Швидкість зміни дефіциту кисню тільки за рахунок реаерації описується рівнянням:

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 \cdot D$$

де K_2 – константа швидкості реаерації (доба⁻¹). На відміну від біологічної константи K_1 , константа K_2 є чисто гідравлічною і залежить від фізичних параметрів річки – швидкості та глибини

Для інженерних розрахунків K_2 часто визначають за емпіричною формулою О'Коннора-Доббінса:

$$K_2 = \frac{3.93 \cdot v^{0.5}}{H^{1.5}}$$

Таким чином, якість води та кисневий баланс у будь-якій точці річки нижче місця скиду є результатом безперервної «боротьби» двох протилежних процесів: біохімічного споживання (K_1) та атмосферного поповнення (K_2).

2.3. Виведення та аналіз диференціального рівняння кисневого прогину Стрітера-Фелпса

У 1925 році американські інженери Гарольд Стрітер та Ерл Фелпс об'єднали два процеси, біохімічне споживання кисню органікою (K_1) та атмосферну реаерацію (K_2), в єдину математичну систему. Модель Стрітера-Фелпса є класичною одновимірною стаціонарною моделлю, яка описує динаміку дефіциту кисню в річці вздовж її русла.

Швидкість зміни дефіциту кисню (D) у часі транспортування домішки потоком визначається як різниця між швидкістю його споживання бактеріями та швидкістю надходження з повітря:

$$\frac{dD}{dt} = K_1 \cdot L - K_2 \cdot D$$

Підставивши у це рівняння раніше інтегрований вираз для залишкового БСК ($L_t = L_0 \cdot e^{-K_1 \cdot t}$), ми отримуємо лінійне диференціальне рівняння першого порядку. Його розв'язання відносно дефіциту кисню D_t у будь-який момент часу t або на будь-якій відстані x має такий фінальний вигляд:

$$D_t = \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} [\exp(-K_1 t) - \exp(-K_2 t)] + D_0 \exp(-K_2 t)$$

де: D_t – дефіцит розчиненого кисню на момент часу t нижче за течією (мг/л);

L_0 – початкова концентрація органічних речовин у річці одразу після скиду та змішування, виражена через БСК (мг/л);

D_0 – початковий дефіцит кисню в річці у створі змішування (мг/л);

K_1, K_2 – константи швидкості деоксигенації та реаерації (доба⁻¹).

Для аналізу поведінки цієї функції побудуємо графік кривої кисневого прогину, який наочно демонструє динаміку самоочищення річки:

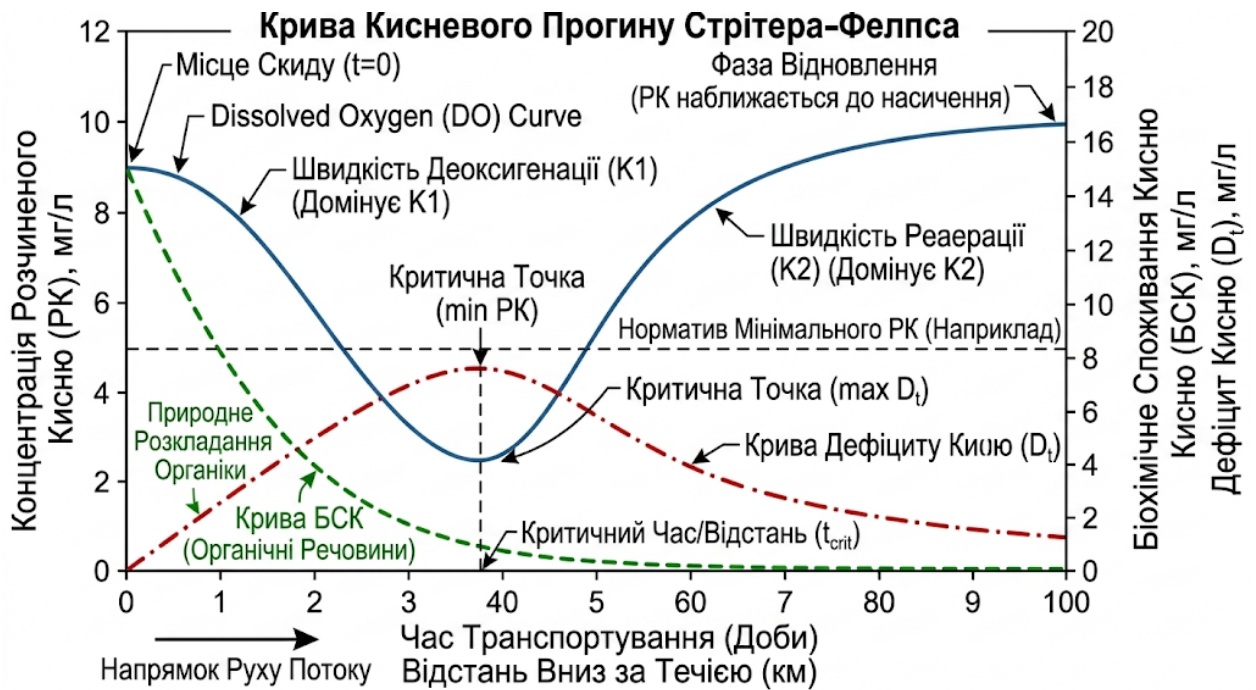


Рис. 1. Динаміка кисневого режиму річки нижче місця скиду стічних вод (Крива Стрітера-Фелпса)

Графік цієї функції має характерну асиметричну дзвоноподібну форму (U-подібну криву, якщо будувати графік концентрації розчиненого кисню, або куполоподібну, якщо будувати графік дефіциту кисню D_t).

Аналіз цієї кривої дозволяє виділити три критичні фази екосистеми річки нижче місця скиду стоків:

1. Фаза деградації (падіння концентрації кисню): одразу після скиду у точці $t = 0$ швидкість споживання кисню бактеріями значно перевищує швидкість реаерації ($K_1 \cdot L > K_2 \cdot D$). Крива дефіциту стрімко йде вгору, а реальний рівень кисню падає.

2. Критична точка прогину (екстремум кривої): точка річки, де дефіцит кисню досягає свого максимуму (D_{crit}), а концентрація розчиненого кисню падає до найнижчого, критичного значення. У цій точці процеси збалансовані: швидкість споживання кисню бактеріями зрівнюється зі швидкістю його надходження з атмосфери ($K_1 \cdot L = K_2 \cdot D$).

3. Фаза відновлення (самоочищення): нижче критичної точки більша частина легкодоступної органіки вже окиснена бактеріями, тому швидкість споживання кисню падає. Атмосферна реаерація починає переважати ($K_2 \cdot D > K_1 \cdot L$), дефіцит кисню зменшується, і річка поступово повертається до свого початкового чистого стану.

Для інженерних розрахунків та екологічного планування найважливішим завданням є визначення координати цієї критичної точки (критичного часу t_{crit}), щоб спрогнозувати, на якій саме відстані від заводу річці загрожує замор риби. Цей час розраховується шляхом взяття похідної від рівняння Стрітера-Фелпса і прирівнювання її до нуля:

$$t_{\text{crit}} = \frac{1}{K_2 - K_1} \cdot \ln \left[\frac{K_2}{K_1} \cdot \left(1 - D_0 \cdot \frac{K_2 - K_1}{K_1 \cdot L_0} \right) \right]$$

Знаючи t_{crit} та швидкість течії річки v , еколог визначає точну географічну відстань до найбруднішої точки русла: $x_{\text{crit}} = v \cdot t_{\text{crit}}$.

3. Моделювання самоочищення та сучасні програмні комплекси для водних екосистем

3.1. Фактори самоочищення водойм: седиментація, біологічна трансформація та сонячна радіація

Процес відновлення початкового стану водного об'єкта після надходження стічних вод є комплексним і не обмежується лише насиченням киснем з атмосфери. Самоочищення – це сукупність взаємопов'язаних гідродинамічних, фізико-хімічних та біологічних процесів, які умовно поділяють на три великі групи:

Фізичні фактори (седиментація та гравітаційне осадження):

Стічні води часто містять значну кількість завислих речовин (дрібнодисперсний пил, органічні та мінеральні суспензії). Зі зниженням швидкості течії (наприклад, при виході річки в розширене русло або водосховище) кінетична енергія потоку падає, і під дією сили тяжіння починається процес седиментації. Важкі частинки осідають на дно, формуючи донні відкладення, що призводить до швидкого освітлення водної товщі.

Біологічна трансформація (біотична деструкція):

Головна роль у руйнуванні розчиненої органіки належить гетеротрофній мікрофлорі (бактеріям, грибам) та гідробіонтам-фільтраторам (молюскам, найпростішим). Вони інкорпують органічні сполуки у свій метаболізм, перетворюючи складні токсичні речовини на прості мінеральні солі, воду та вуглекислий газ. Вища водна рослинність виступає в ролі природного біофільтра, акумулюючи у своїх тканинах сполуки азоту та фосфору.

Фізико-хімічні фактори (фотоокиснення та сонячна радіація):

Ультрафіолетове випромінювання сонячного світла діє як потужний природний дезінфектор, викликаючи руйнування клітинних мембран патогенних мікроорганізмів (бактеріофагів, кишкових паличок). Одночасно під дією світла у верхніх шарах води протікають процеси фотохімічного окиснення стійких органічних ксенобіотиків (наприклад, пестицидів чи нафтопродуктів).

3.2. Огляд індустріальних програмних комплексів: MIKE 11 / MIKE 21 та QUAL2K

Для вирішення реальних інженерних задач та проектування очисних споруд класичних аналітичних моделей типу Стрітера-Фелпса вже недостатньо, оскільки вони не враховують геометрію русла, гідротехнічні споруди та нестационарний режим річок. У сучасній екологічній практиці застосовуються спеціалізовані програмні комплекси:

Програмна система QUAL2K (розробка US EPA, США):

Є сучасним індустріальним стандартом для моделювання якості води в річкових системах середнього масштабу.

Особливості: це одновимірна модель зі стаціонарним гідравлічним режимом, але нестаціонарною кінетикою якості води (враховує добові коливання температури та сонячної радіації).

Функціонал: QUAL2K дозволяє одночасно прораховувати взаємодію понад 15 показників якості води, включаючи повний цикл азоту (амоній → нітрити → нітрати), цикл фосфору, динаміку фітопланктону, затінення русла береговою рослинністю та аноксичний обмін речовинами між водою та донними відкладеннями.

Програмні комплекси MIKE 11 / MIKE 21 (розробка DHI, Данія):

Світовий лідер у сфері професійного гідродинамічного та екологічного моделювання.

MIKE 11 (1D): призначений для моделювання розгалужених річкових мереж, каналів та паводкових ситуацій. Базується на чисельному розв'язанні рівнянь Сен-Венана для потоку води та рівнянь адвекції-дифузії для домішок.

MIKE 21 (2D): двовимірна планова модель, що використовується для моделювання мілководних озер, естуаріїв, лиманів та прибережних морських зон. Програма дозволяє враховувати вітрові нагони води, хвилювання, складну конфігурацію берегової лінії та поширення плями забруднення в плані.

Контрольні питання

1. Проаналізуйте фізичну природу та екологічне значення трьох основних механізмів переносу маси домішок у гідросфері: адвекції, турбулентної дифузії та поздовжньої гідравлічної дисперсії.

2. Опишіть просторову неоднорідність процесу змішування стічних вод із річковим потоком, детально охарактеризувавши кожен з трьох стадій розведення та роль коефіцієнта змішування Родзиллера.

3. Наведіть детальну класифікацію математичних моделей гідросфери за просторовою розмірністю та часовим режимом із обґрунтуванням інженерних критеріїв вибору конкретного типу моделі для різних водних об'єктів.

4. Охарактеризуйте кінетику біохімічного споживання кисню на окиснення органічних сполук у водному середовищі та поясніть фізико-хімічну залежність константи деоксигенації від температурного режиму річки.

5. Розкрийте гідродинамічну суть процесу атмосферної реаерації поверхневих водойм та детально проаналізуйте вплив швидкості течії, глибини русла та морфометрії на константу реаерації.

6. Опишіть історію створення, базові допущення та повний математичний вивід класичного диференціального рівняння кисневого прогину Стрітера-Фелпса.

7. Проведіть детальний поетапний аналіз кривої кисневого прогину Стрітера-Фелпса за фазами деградації, критичної точки та відновлення екосистеми річки.

8. Обґрунтуйте математичний та екологічний алгоритм визначення координати критичної точки кисневого прогину (критичного часу та критичної відстані) для запобігання замору гідробіонтів.

9. Охарактеризуйте комплексний вплив фізичних, хімічних та біологічних факторів на загальну здатність річкових екосистем до природного самоочищення.

10. Проведіть порівняльний аналіз архітектури, математичного апарату та меж застосування програмних комплексів QUAL2K та MIKE 11 при екологічному моделюванні річок.

11. Опишіть специфіку двовимірного планового моделювання гідродинамічних процесів та якості води у прибережних морських зонах та естуаріях за допомогою інструментів MIKE 21.

12. Розкрийте екологічну концепцію та юридичне значення встановлення нормативів Гранично допустимих скидів (ГДС) речовин для промислових підприємств.

13. Проаналізуйте інженерну методику розрахунку концентрації речовини у випуску стічних вод із використанням коефіцієнта кратності розведення та фонового стану водного об'єкта.

14. Поясніть методологічні особливості розрахунку нормативів ГДС для консервативних речовин, що не піддаються розпаду, у порівнянні з речовинами, що трансформуються.

15. Опишіть алгоритм інтеграції гідродинамічних моделей розрахунку розведення стоків із сучасними геоінформаційними системами (ГІС) для управління якістю води на рівні річкового басейну.

Лекція 14

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ЛІТОСФЕРІ (Моделювання міграції забруднюючих речовин у ґрунтах та ґрунтових водах)

Мета лекції: с формувати у студентів комплексне розуміння фізико-хімічних та гідродинамічних закономірностей перенесення екологічних поллютантів у геологічному середовищі; навчити математичним методам моделювання масопереносу в зоні аерації ґрунтів та водоносних горизонтах, а також ознайомити з індустріальними програмними комплексами для прогнозування підземного забруднення.

План лекції

1. Фізико-гідродинамічні основи міграції вологи та домішок у ґрунтовому профілі
2. Математичне моделювання масопереносу поллютантів у підземному середовищі
3. Прикладні методи прогнозування та індустріальне програмне забезпечення

1. Фізико-гідродинамічні основи міграції вологи та домішок у ґрунтовому профілі

1.1. Морфологічна структура геологічного середовища: зона аерації та зона повного насичення

При моделюванні процесів міграції екологічних поллютантів у літосфері підземне середовище розділяють на дві принципово різні за своїми гідродинамічними властивостями вертикальні зони, розмежовані дзеркалом ґрунтових вод (Рис. 1):

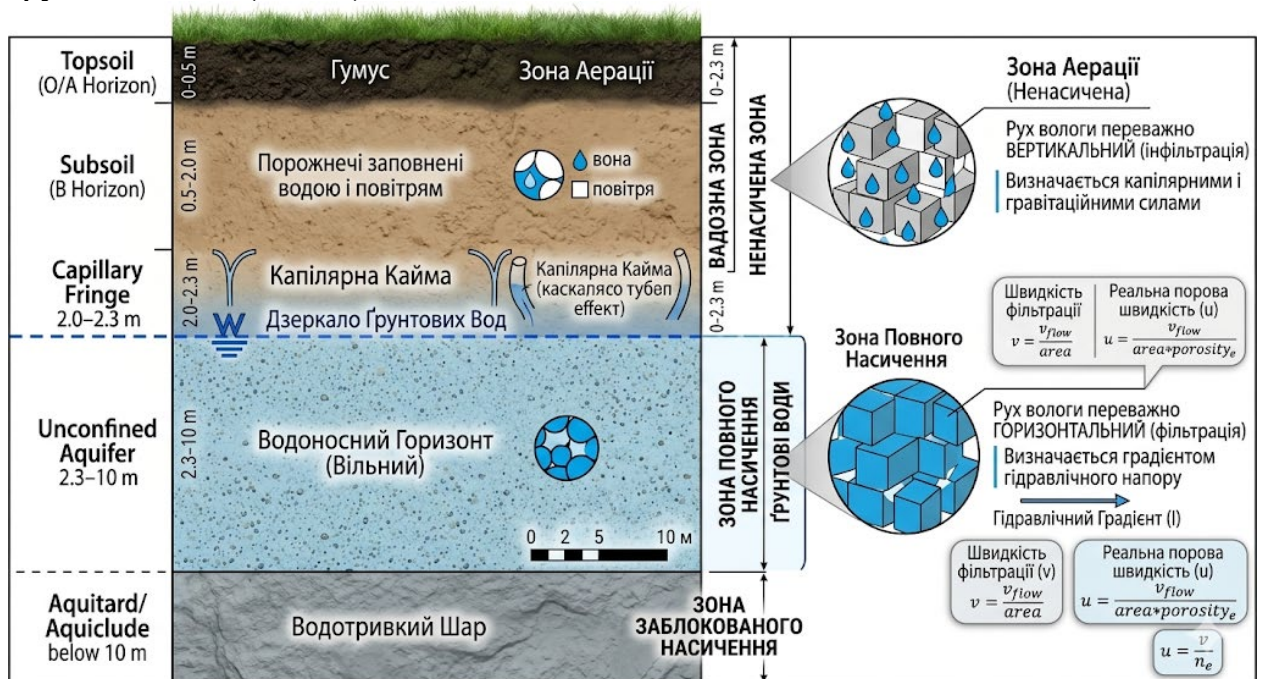


Рис. 1. Морфологічна структура геологічного середовища для моделювання масопереносу

Зона аерації (ненасичена зона): верхня частина геологічного профілю, що простягається від поверхні землі до дзеркала ґрунтових вод. У цій зоні пори між твердими частинками ґрунту заповнені одночасно і водою (зв'язаною, капілярною), і повітрям. Рух вологи тут відбувається переважно вертикально вниз під дією гравітаційних та капілярних сил (процес інфільтрації).

Зона аерації виконує роль першого і найважливішого захисного бар'єра на шляху техногенного забруднення з поверхні. Фізико-хімічні властивості цієї зони (пористість, вологість, наявність гумусу) визначають швидкість проникнення токсикантів до підземних водоносних горизонтів. Безпосередньо над дзеркалом ґрунтових вод виділяють капілярну кайму, де пори заповнені водою за рахунок капілярного підняття, але тиск вологи залишається нижчим за атмосферний.

Зона повного насичення (водоносний горизонт): розташована нижче рівня ґрунтових вод. Усі пори, тріщини, каверни та пустоти геологічної матриці тут повністю заповнені водою під гідростатичним тиском, який перевищує атмосферний. Рух підземних вод у цій зоні є переважно ламінарним і відбувається у горизонтальному напрямку відповідно до загального нахилу водоносного пласта та градієнта гідравлічного напору.

Саме в зоні повного насичення формуються масштабні підземні шлейфи забруднення, які здатні мігрувати на кілометрові відстані, створюючи загрозу для джерел питного водопостачання та транскордонних водних об'єктів. Нижньою межею цієї зони є водотривкий шар (глини, граніти), який практично не пропускає вологу і зупиняє вертикальну міграцію.

1.2. Рівняння фільтрації підземних вод: закон Дарсі та коефіцієнт фільтрації

Рух підземних вод у зоні повного насичення підпорядковується фундаментальному емпіричному закону Дарсі, який встановлює лінійну залежність між швидкістю фільтрації та гідравлічним градієнтом.

Швидкість фільтрації (v , м/доба), яка є фіктивною швидкістю потоку через увесь поперечний переріз пласта (включаючи тверді частинки), розраховується за формулою:

$$v = -K \cdot \frac{dh}{dl} = -K \cdot I$$

де: K – коефіцієнт фільтрації геологічного матеріалу (м/доба), що характеризує його проникність;

h – гідравлічний напір (м);

l – довжина шляху фільтрації (м);

$I = dh / dl$ – гідравлічний градієнт (безрозмірна величина).

Знак «мінус» указує на те, що рух рідини відбувається у напрямку зменшення гідравлічного напору.

Для розрахунку реальної (середньої покрокової) швидкості руху молекул води та поллютантів через порові канали (u , м/доба) використовують співвідношення:

$$u = v / n_e$$

де n_e – ефективна (динамічна) пористість ґрунту (безрозмірна величина, $0 < n_e < 1$).

Типові значення коефіцієнта фільтрації (K) для різних типів літосферних матриць наведено у таблиці 1:

Таблиця 1.

Тип ґрунту / породи	Коефіцієнт фільтрації K (м/доба)	Гідродинамічні властивості
Чистий гравій	100 - 3000	Дуже висока проникність
Середньозернистий пісок	5 - 50	Висока проникність (водоносні пласти)
Супісок	0.1 - 1.0	Слабка проникність
Суглинок	0.001 - 0.1	Напівводотривкі шари
Глина	менше 0.0001	Водотривкий екран (ізолятор)

1.3. Особливості руху вологи в ненасиченій зоні: рівняння Річардса та матричний потенціал

Моделювання переносу вологи у зоні аерації є значно складнішим математичним завданням, оскільки коефіцієнт фільтрації ненасиченого ґрунту не є константою, а нелінійно залежить від поточної вологості.

Рух вологи у ненасиченій зоні описується рівнянням Річардса (у вертикальному одновимірному виконанні):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

де: θ – об'ємна вологість ґрунту ($\text{м}^3/\text{м}^3$);

ψ – матричний (капілярно-сорбційний) потенціал ґрунту (м або Па), який відображає силу утримання вологи менісками в порах;

$K(\theta)$ – ненасичена гідравлічна провідність (м/доба), яка стрімко падає при висиханні ґрунту;

z – вертикальна координата, спрямована вниз (м);

t – час (доба).

Матричний потенціал ψ у сухому ґрунті має великі негативні значення, що створює потужний градієнт, який змушує вологу (і розчинені в ній хімікати) рухатися від більш вологих ділянок до більш сухих, навіть у напрямку, протилежному дії сили тяжіння.

2. Математичне моделювання масопереносу поллютантів у підземному середовищі

2.1. Механізми міграції речовин: конвективний перенос, молекулярна дифузія та механічна дисперсія

Перенесення розчинених хімічних речовин (компонентів забруднення) у пористому середовищі підземних пластів контролюється трьома основними фізико-гідродинамічними механізмами, які діють одночасно:

1. Конвективний (адвективний) перенос:

Процес переміщення частинок розчиненої речовини разом із основним потоком підземних вод зі середньою поровою швидкістю фільтрації u .

Конвекція є головним рушійним фактором, який визначає напрямок та загальну дальність міграції шлейфу забруднення. Масовий потік речовини за рахунок конвекції прямо пропорційний її концентрації C та швидкості потоку.

2. Молекулярна дифузія:

Фізико-хімічний процес перерозподілу маси речовини за рахунок хаотичного теплового руху молекул. Дифузія спрямована у бік зменшення концентрації (від центра шлейфу до периферії) і протікає навіть у абсолютно нерухомій воді. У пористому геологічному середовищі швидкість дифузії нижча, ніж у вільному об'ємі річки, що враховується введенням коефіцієнта звивистості пор.

3. Механічна (гідродинамічна) дисперсія:

Процес поздовжнього та поперечного розсіювання поллютанту, обумовлений мікроскопічною неоднорідністю структури пористого простору. Вода в порах рухається з різною швидкістю: у центрі пори швидше, біля стінок частинок – повільніше; через дрібні пори рух затримується, а через великі тріщини струмені «пролітають» уперед. Це призводить до розтягування та розмивання меж шлейфу забруднення вздовж і впоперек напрямку течії.

У математичних моделях молекулярну дифузію та механічну дисперсію об'єднують в один узагальнений параметр – коефіцієнт гідродинамічної дисперсії (D_L , м²/доба):

$$D_L = a_L \cdot u + D^*$$

де: a_L – поздовжня дисперсивність породи (м), яка відображає ступінь геолого-структурної неоднорідності пласта;

u – середня порова швидкість підземних вод (м/доба);

D^* – ефективний коефіцієнт молекулярної дифузії в пористому середовищі (м²/доба).

2.2. Фізико-хімічні процеси взаємодії домішки з твердою матрицею ґрунту: сорбція, десорбція та коефіцієнт міжфазного розподілу

Під час руху підземного потоку розчинені поллютанти безперервно взаємодіють із поверхнею твердих частинок ґрунту (глинистими мінералами, органічною речовиною, оксидами заліза). Цей процес переходу речовини з рідкої фази (розчину) у тверду фазу (на поверхню ґрунту) називається сорбцією, а зворотний процес – десорбцією.

Для більшості екологічних моделей за низьких концентрацій забруднення використовують лінійну ізотерму сорбції Генрі. Вона припускає, що між розчиненою та сорбованою речовиною миттєво встановлюється динамічна рівновага:

$$S = K_d \cdot C$$

де: S – концентрація сорбованої речовини на твердій матриці ґрунту (мг/кг сухої породи);

C – концентрація розчиненої речовини в підземній воді (мг/л);

K_d – коефіцієнт міжфазного розподілу* (л/кг або м³/т).

Коефіцієнт K_d є індивідуальною екологічною характеристикою для кожної пари «речовина–ґрунт». Чим вищий K_d , тим сильніше ґрунт зв'язує

забруднення і то менш рухливим є шлейф. Наприклад, важкі метали та нафтопродукти мають високі значення K_d у глинистих ґрунтах, тоді як нітрати або хлориди практично не сорбуються ($K_d \approx 0$) і мігрують зі швидкістю самої води.

2.3. Ефект затримання міграції та базове диференціальне рівняння конвективно-дисперсійного переносу

Сорбційна взаємодія призводить до ефекту ретардації – затримання та уповільнення руху фронту забруднення відносно швидкості руху чистої підземної води. Математично це уповільнення описується безрозмірним фактором ретардації (R):

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{n} \cdot K_d$$

де: ρ – суха щільність складання ґрунту (кажуча щільність матриці, кг/л або т/м³);

n – пористість ґрунту (частки одиниці).

Якщо речовина взагалі не сорбується ($K_d = 0$), то $R = 1$, тобто її швидкість дорівнює швидкості води. Якщо $R = 5$, це означає, що фронт забруднення просувається вглиб пласта у 5 разів повільніше, ніж рухається підземна вода.

Об'єднуючи конвекцію, гідродинамічну дисперсію, сорбційне затримання та враховуючи можливий хімічний чи радіоактивний розпад речовини (через константу розпаду λ , доба⁻¹), отримуємо класичне одновимірне диференціальне рівняння конвективно-дисперсійного переносу (КДП):

$$R \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda \cdot R \cdot C$$

Де:

$\frac{\partial C}{\partial t}$ – швидкість зміни концентрації поллютанту в часі;

$D_L \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ – член рівняння, що описує розмивання шлейфу за рахунок дисперсії та дифузії;

$u \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$ – член рівняння, що описує спрямоване конвективне перенесення потоком;

$\lambda \cdot R \cdot C$ – терм, що враховує затухання та деструкцію речовини (наприклад, біодеградацію вуглеводнів бактеріями).

Чисельне розв'язання цього рівняння за заданих початкових та граничних умов дозволяє розрахувати просторово-часовий розподіл концентрації забруднення $C(x, t)$ навколо джерела екологічної небезпеки.

3. Прикладні методи прогнозування та індустріальне програмне забезпечення

3.1. Огляд спеціалізованих програмних комплексів: MODFLOW та MT3DMS / RT3D

Для розв'язання реальних інженерно-екологічних задач у тривимірному просторі аналітичні розв'язки рівняння конвективно-дисперсійного переносу практично не застосовуються через складну геометрію пластів, їхню літологічну неоднорідність та мінливість режимів фільтрації. У сучасній екологічній експертизі та аудиті загальноприйнятим світовим індустріальним стандартом є використання моделей сімейства MODFLOW.

Програмний комплекс MODFLOW (розробка Геологічної служби США – USGS):

Це базовий модульний гідродинамічний пакет, призначений для тривимірного моделювання руху підземних вод у насиченій зоні.

Математичний апарат: програма базується на чисельному розв'язанні диференціального рівняння фільтрації в частинних похідних методом скінченних різниць (або скінченних елементів у новіших версіях).

Функціонал: MODFLOW дозволяє детально відтворити пластову структуру літосфери, врахувати роботу водозабірних свердловин, інфільтраційне живлення від атмосферних опадів, взаємодію підземних вод із річковою мережею, а також наявність водотривких тектонічних розломів чи протифільтраційних завіс.

Модуль MT3DMS (Mass Transport in 3D Multi-Species): це спеціалізована надбудова, що інтегрується з MODFLOW і використовує розраховані ним поля швидкостей та напрямків руху води для моделювання переносу речовин.

Функціонал: одночасно прораховує міграцію кількох взаємопов'язаних хімічних компонентів (Multi-Species). Враховує процеси адвекції, тривимірної гідродинамічної дисперсії, лінійної та нелінійної сорбції, а також хімічні реакції першого порядку.

Модуль RT3D (Reactive Transport in 3D): більш потужна модифікація, яка орієнтована на моделювання складних біохімічних реакцій безпосередньо всередині водоносного пласта (In-situ). Програма незамінна при проектуванні систем біоремедіації – штучного очищення підземних вод шляхом закачування поживних речовин для стимуляції автохтонних бактерій, які розкладають стійкі поллютанти (наприклад, хлоровані розчинники чи важкі нафтові фракції).

3.2. Моделювання вертикального переносу в зоні аерації за допомогою комплексу HYDRUS

Якщо комплекси типу MODFLOW фокусуються на горизонтальній міграції у водоносних горизонтах, то для прогнозування руху екологічних забруднень безпосередньо від поверхні землі крізь сухі та вологі шари ґрунту використовується спеціалізоване програмне забезпечення HYDRUS (розробка PC-Progress).

Програма здійснює чисельне моделювання одновимірного, двовимірного або тривимірного руху вологи та переносу розчинених речовин у ненасичених, частково насичених та повністю насичених пористих середовищах.

Гідравлічний блок: базується на розв'язанні рівняння Річардса для руху вологи. Для опису нелінійних гідродинамічних функцій ґрунту (залежності вологості та провідності від матричного потенціалу) використовуються аналітичні моделі Ван Генухтена-Муалема.

Екологічний блок (перенос речовин): дозволяє моделювати рух не лише розчинених хімікатів, але й колоїдних частинок, вірусів та бактерій. Програма враховує кінетику сорбції, яка може бути нерівноважною (моделі з подвійною пористістю або подвійною проникністю, де вода рухається швидко через тріщини і повільно дифундує вглиб матричних блоків).

Додатковий функціонал: включає блоки моделювання теплопереносу в ґрунті (промерзання, відтавання) та кореневого поглинання вологи й поживних речовин рослинами, що дозволяє точно оцінити транспіраційний винос поллютантів.

3.3. Практичні екологічні задачі: фільтрат полігонів ТПВ та витіки з підземних резервуарів АЗС

Математичне моделювання в літосфері є обов'язковим етапом оцінки впливу на довкілля (ОВД) для об'єктів підвищеної екологічної небезпеки:

– прогнозування міграції фільтрату з полігонів твердих побутових відходів (ТПВ): тіло сміттєзвалища під дією атмосферних опадів генерує високотоксичний фільтрат, насичений важкими металами, амонієм та стійкими органічними ксенобіотиками. При порушенні цілісності або відсутності нижнього протифільтраційного екрана цей фільтрат починає вертикально просочуватися вниз. За допомогою моделювання (комбінація HYDRUS для зони аерації та MODFLOW для водоносного горизонту) еколог вирішує такі завдання:

– розрахунок часу, за який перша порція токсикантів досягне дзеркала підземних вод;

– визначення геометрії та швидкості розростання шлейфу забруднення підземних вод у часі (на 5, 10, 50 років наперед);

– обґрунтування безпечної відстані від полігону до найближчих питних свердловин або капітальних споруд.

– моделювання витоків світлих нафтопродуктів із підземних резервуарів АЗС: при корозії або механічному пошкодженні підземних танків для зберігання палива виникає прихований аварійний витік. Нафтопродукти належать до класу рідин, що не змішуються з водою (LNAPL – Light Non-Aqueous Phase Liquids). Процес їхнього масопереносу має специфічний характер:

– паливо проціджується крізь зону аерації, частково утримує у порах у вигляді залишкової нафтонасиченості (капілярне защемлення);

– досягнувши дзеркала ґрунтових вод, бензин або дизель через меншу щільність не тоне у воді, а «розтікається» по її поверхні у вигляді лінзи;
 – компоненти палива, які мають обмежену розчинність у воді (токсичний ряд ВТЕХ – бензол, толуол, етилбензол, ксилоли), починають розчинятися у підземному потоці, створюючи довготривалий шлейф розчиненого забруднення, напрямок руху якого моделюється для оцінки ризику вибухонебезпечності сусідніх підвальних приміщень чи отруєння водозаборів.

Контрольні питання

1. Проаналізуйте морфологічну структуру підземного геологічного середовища та детально порівняйте гідродинамічні режими й особливості руху вологи у зоні аерації та зоні повного насичення.
2. Розкрийте фізичний зміст закону Дарсі для фільтрації підземних вод та обґрунтуйте різницю між фіктивною швидкістю фільтрації та реальною поровою швидкістю руху поллютантів.
3. Проаналізуйте нелінійний характер руху вологи в ненасиченій зоні на основі рівняння Річардса, детально охарактеризувавши поняття матричного потенціалу та його вплив на міграцію домішок.
4. Опишіть основні фізико-гідродинамічні механізми масопереносу речовин у пористому середовищі та структуру коефіцієнта гідродинамічної дисперсії.
5. Охарактеризуйте процеси сорбції та десорбції поллютантів на твердій матриці ґрунту на основі лінійної ізотерми Генрі та екологічне значення коефіцієнта міжфазного розподілу.
6. Розкрийте ефект сорбційного затримання міграції шлейфу забруднення через фактор ретардації та проаналізуйте його математичний зв'язок із фізичними властивостями ґрунту.
7. Проаналізуйте базове диференціальне рівняння конвективно-дисперсійного переносу (КДП) для одновимірного випадку з урахуванням деструкції речовини.
8. Обґрунтуйте інженерно-методологічну необхідність переходу від аналітичних розв'язків рівняння КДП до чисельних методів моделювання у тривимірних неоднорідних геологічних пластах.
9. Охарактеризуйте можливості програмного комплексу MODFLOW як індустріального стандарту моделювання фільтрації підземних вод.
10. Порівняйте призначення, екологічний функціонал та типи реакцій, що моделюються за допомогою спеціалізованих транспортних модулів MT3DMS та RT3D.
11. Опишіть специфіку моделювання вертикального переносу вологи та ксенобіотиків у зоні аерації за допомогою програмного комплексу HYDRUS, включаючи роль моделей Ван Генухтена-Муалема.
12. Сформуйте алгоритм та методику математичного моделювання для оцінки впливу на довкілля при проектуванні та експлуатації полігонів твердих побутових відходів.

13. Проаналізуйте фізико-хімічні особливості поширення, фазових переходів та моделювання міграції легких нафтопродуктів (LNAPL) у літосфері при аварійних витоках із резервуарів АЗС.

14. Опишіть концепцію та математичний апарат моделювання процесів штучного очищення водоносних горизонтів (In-situ біоремедіації) від стійких органічних токсикантів.

15. Обґрунтуйте принципи та методологію інтеграції тривимірних моделей підземної гідродинаміки (типу MODFLOW/HYDRUS) із геоінформаційними системами (ГІС) для екологічного моніторингу територій.

Лекція 15

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ: МЕТОДОЛОГІЯ, СЦЕНАРНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНИХ ЗБИТКІВ

Мета лекції: ознайомити студентів із методологічними засадами оцінки та моделювання ризиків для здоров'я населення та довкілля; навчити принципам побудови екологічних сценаріїв при аварійних та хронічних впливах, а також математичним методам розрахунку економічних збитків від забруднення компонентів біосфери.

План лекції

1. Фундаментальна методологія оцінки екологічного ризику та ризику для здоров'я населення
2. Сценарне моделювання та аналіз екологічних ризиків
3. Економіко-математичне моделювання екологічних збитків

1. Фундаментальна методологія оцінки екологічного ризику та ризику для здоров'я населення

1.1. Поняття екологічного ризику, небезпеки та необоротності екологічних змін

У системі екологічної безпеки та менеджменту довкілля базовим є розмежування понять «небезпека» та «ризик».

Екологічна небезпека – це об'єктивно існуюча властивість техногенних об'єктів, речовин або природних процесів завдавати шкоди екосистемам та здоров'ю людини. Небезпека є якісною характеристикою (наприклад, токсичність важких металів чи вибухонебезпечність метан-повітряної суміші).

Екологічний ризик – це кількісна (імовірнісна) міра небезпеки. Він визначається як ймовірність розвитку несприятливих екологічних ефектів або погіршення здоров'я людини протягом визначеного проміжку часу внаслідок екологічного впливу. Математично в загальному вигляді ризик (R) описується як функція ймовірності виникнення небезпечної події (P) та величини її негативних наслідків (B):

$$R = f(P, B)$$

Головною особливістю моделювання екологічних ризиків є необхідність урахування необоротності екологічних змін. На відміну від технічних систем, де пошкоджену деталь можна замінити, екосистеми при досягненні певних критичних меж (точок біфуркації) зазнають деградації, за якої природне самовідновлення стає неможливим (наприклад, повне вимирання популяції біоти або стійке засолювання ґрунтів).

1.2. Чотириетапна класична концепція оцінки ризику (BOO3/US EPA)

Сучасне моделювання ризиків базується на уніфікованій чотириетапній методології, розробленій Національною академією наук США, Національною

екологічною агенцією (US EPA) та схваленій Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ):

1. Ідентифікація небезпеки (Hazard Identification):

На цьому етапі проводиться збір даних про техногенне джерело, вивчається спектр його викидів або скидів та здійснюється відбір маркерних (пріоритетних) речовин, які мають найбільшу токсичність і становлять найбільшу загрозу для конкретної території.

2. Оцінка залежності «доза – ефект» (Dose-Response Assessment):

Встановлення кількісного зв'язку між рівнем впливу (дозою) та ймовірністю розвитку несприятливих ефектів. На основі токсикологічних баз даних (наприклад, IRIS) визначаються критичні параметри:

– для канцерогенів – фактор нахилу (фактор канцерогенного потенціалу) SF (мг/(кг · доба)⁻¹);

– для неканцерогенів – референтна (безпечна) доза RfD або референтна концентрація RfC (мг/кг · доба).

3. Оцінка експозиції (Exposure Assessment):

Визначення кількісного надходження хімічних речовин в організм людини або біоти різними шляхами (інгаляційний з повітрям, пероральний з водою та їжею, дермальний через шкіру). На основі розрахованих математичних полей концентрацій в атмосфері чи гідросфері обчислюється середньодобова доза (ADD – для токсичних ефектів, LADD – середня життєва доза для канцерогенів).

4. Характеристика ризику (Risk Characterization):

Фінальний етап, на якому результати оцінки експозиції об'єднуються з параметрами «доза – ефект». Проводиться розрахунок індексів небезпеки та індивідуальних канцерогенних ризиків, які зіставляються з критеріями прийнятності.

1.3. Математичний апарат розрахунку експозиції та ризику

Для розрахунку середньодобового надходження речовини в організм людини (ADD) використовується базова математична модель експозиції:

$$ADD = \frac{C \cdot IR \cdot ED \cdot EF}{BW \cdot AT}$$

де: C – концентрація поллютанту в аналізованому середовищі;

IR – швидкість надходження середовища;

ED – тривалість впливу (експозиції) (роки);

EF – частота впливу (днів/рік);

BW – маса тіла людини (кг);

AT – період усереднення часу впливу (для неканцерогенів AT = ED · 365 днів, для канцерогенів AT = 70 років · 365 днів).

Характеристика неканцерогенного ризику для кожної окремої речовини проводиться шляхом розрахунку коефіцієнта небезпеки (HQ, безрозмірна величина):

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}$$

При одночасному надходженні кількох речовин з однотипним механізмом токсичної дії розраховується індекс небезпеки (HI):

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i$$

Якщо $HI \leq 1.0$, ризик вважається прийнятним (мінімальним).

Якщо $HI > 1.0$, імовірність розвитку токсичних ефектів зростає, ситуація потребує впровадження охоронних заходів.

Для канцерогенного ризику (CR, безрозмірна ймовірність) розрахунок індивідуального ризику за умов низьких доз виконується за формулою:

$$CR = LADD \cdot SF$$

Розраховані значення канцерогенного ризику (CR) оцінюються за міжнародною шкалою, яка визначає необхідність вжиття екологічних або медичних заходів:

Величина ризику (CR)	Рівень ризику	Характеристика та управлінські рішення
менше ніж 10^{-6}	Де-мініміс (незначний)	Додаткові заходи не потрібні. Ризик не відрізняється від природного фону.
від 10^{-6} до 10^{-4}	Прийнятний (умовно)	Типовий рівень для більшості промислових міст. Потребує постійного моніторингу.
від 10^{-4} до 10^{-3}	Прийнятний для професійних груп	Неприйнятний для населення. Необхідно розробляти плани зниження викидів.
більше ніж 10^{-3}	Високий (неприйнятний)	Екологічна надзвичайна ситуація. Потребує термінового інженерного втручання.

Практичне застосування при проектуванні СЗЗ:

Класичний підхід до встановлення Санітарно-захисної зони (СЗЗ) навколо підприємств в Україні базується на жорстких нормативних відстанях (наприклад, 500 м або 1000 м для металургійного заводу). Проте сучасне європейське екологічне законодавство вимагає встановлювати межі санітарних розривів динамічно – на основі розрахунків ризику.

За допомогою інтеграції програм розсіювання (AERMOD) та ГІС-технологій екологи будують географічні ізолінії, де значення $HI = 1.0$ (для загальної токсичності) або $CR = 10^{-6}$ (для онкологічного ризику). Зона, що опиняється всередині цих ізоліній, є територією реальної небезпеки для здоров'я.

Жоден житловий будинок, дитячий садок чи лікарня не мають права знаходитися всередині цієї контурної лінії. Якщо ізолінія неприйнятного ризику виходить за межі стандартної нормативної зони підприємства, керівництво заводу зобов'язане або модернізувати очисне устаткування (ПГУ), або викупити та відселити житлові будинки, що потрапили в зону небезпечного впливу.

2. Сценарне моделювання та аналіз екологічних ризиків

2.1. Концепція «Джерело – Шлях – Рецептор» (Source-Pathway-Receptor) як основа просторового моделювання

В основі сучасного екологічного моделювання ризиків лежить трикомпонентна концепція «Джерело – Шлях – Рецептор» (SPR). Ризик виникає і може бути кількісно оцінений лише тоді, коли всі три елементи ланцюжка існують і зв'язані між собою:

1. Джерело (Source): об'єкт техногенного навантаження (промисловий майданчик, хвостосховище, аварійний трубопровід), який генерує емісію забруднюючих речовин або енергетичний вплив (радіація, шум).
2. Шлях міграції (Pathway): природні або штучні транспортні середовища, якими поллютант поширюється у просторі. Моделювання цього елемента базується на рівняннях, які ми вивчали у попередніх лекціях (Гауссове розсіювання в атмосфері, модель Стрітера-Фелпса в гідросфері, закон Дарсі та КДП у літосфері).
3. Рецептор (Receptor): елемент екосистеми, що зазнає впливу (населення міста, водозабірні свердловини, агроценози, рідкісні види біоти).

Якщо за допомогою інженерних бар'єрів (наприклад, встановлення фільтрів на трубі або спорудження бентонітового екрана під звалищем) ланцюжок розривається на етапі Шляху, то екологічний ризик для Рецептора паде до нуля, навіть за наявності потужного Джерела.

2.2. Метод дерева відмов (FTA) та дерева подій (ETA) при моделюванні техногенних аварій

Для оцінки ризиків раптових, катастрофічних екологічних змін (аварійні розливи хімікатів, вибухи, руйнування дамб) застосовують методи системного логіко-графічного аналізу:

Дерево відмов (Fault Tree Analysis – FTA):

Реалізує дедуктивний підхід – рух від наслідку до причин. Модель починається з визначення кінцевої небажаної події (наприклад, «Прорив резервуара з мазутом»), а потім крок за кроком вниз виявляються комбінації технічних відмов, помилок персоналу чи природних явищ, які до цього призвели. Логічні зв'язки між подіями об'єднуються операторами «І» (подія вище виникає лише при одночасному виконанні всіх умов знизу) та «АБО» (достатньо виконання хоча б однієї умови). Це дозволяє розрахувати загальну ймовірність аварії на основі статистичних даних про відмови окремих вузлів.

Дерево подій (Event Tree Analysis – ETA):

Реалізує індуктивний підхід – рух від причини до наслідків. Модель стартує з ініціюючої події (наприклад, «Розгерметизація хлорного танка на очисних спорудах») і прораховує сценарії розвитку подій залежно від того, спрацюють чи ні захисні інженерні системи (система водяної зависи, автоматичне перекриття засувок, евакуація). Кожне відгалуження має свою ймовірність, що дозволяє на виході отримати спектр кінцевих екологічних наслідків – від локального інциденту до екологічної катастрофи регіонального масштабу.

2.3. Сценарний аналіз та облік невизначеності: метод Монте-Карло

Прогнозування довгострокових ризиків завжди базується на порівнянні кількох альтернативних сценаріїв розвитку подій:

1. Базовий сценарій (Business-As-Usual – BAU): прогноз екологічного стану за збереження поточних обсягів виробництва та існуючих технологій очищення.
2. Песимістичний (аварійний) сценарій: розрахунок максимального ризику за найнесприятливіших умов (наприклад, збіг максимального аварійного викиду підприємства з приземною інверсією та штилем в атмосфері).
3. Оптимістичний (модернізаційний) сценарій: оцінка зниження рівнів ризику після реалізації екологічних заходів (перехід на замкнений цикл водопостачання, заміна палива тощо).

Головна проблема екологічного моделювання – висока невизначеність вихідних даних (мінливість погоди, пористості ґрунту, ваги та часу експозиції людини). Замість використання фіксованих (детермінованих) середніх значень, які викривлюють реальний ризик, застосовують стохастичний метод Монте-Карло.

При моделюванні за методом Монте-Карло кожному змінному параметру (наприклад, концентрації C або швидкості інфільтрації u) задається не число, а функція розподілу ймовірностей (нормальний, логнормальний або трикутний розподіл). Комп'ютер здійснює тисячі ітерацій розрахунку, щоразу випадковим чином обираючи значення з заданих розподілів. Результатом моделювання є не одноточкове значення ризику, а інтегральна крива розподілу ймовірностей, яка показує, наприклад, що з ймовірністю 95% канцерогенний ризик не перевищить критичну межу 10^{-4} .

3. Економіко-математичне моделювання екологічних збитків

3.1. Економічні збитки від забруднення навколишнього природного середовища: прямі та непрямі втрати екосистемних послуг

Надходження поллютантів у біосферу призводить не лише до деградації біоти, але й до конкретних фінансових втрат для економіки країни. Економічні збитки від забруднення довкілля – це виражені в грошовій формі фактичні або можливі втрати, завдані народному господарству, або додаткові витрати на ліквідацію наслідків екологічних правопорушень.

У моделюванні еколого-економічних систем збитки поділяють на дві категорії:

Прямі збитки:

Матеріальні втрати, які можна безпосередньо розрахувати та капіталізувати. Сюди відносять: витрати на лікування населення через зростання захворюваності (медичне страхування, лікарняні), зниження врожайності сільськогосподарських культур навколо хімзаводів, прискорений знос та корозія основних фондів (будівель, техніки) під дією кислих опадів, а також прямі витрати на очищення та рекультивацію забруднених територій.

Непрямі збитки (втрати екосистемних послуг):

Економічна вартість функцій екосистем, які вони безкоштовно виконують для людства, але які руйнуються через забруднення. Наприклад, знищення заплавного лісу призводить до втрати послуги природного очищення річкової води, регулювання паводків та асиміляційного потенціалу території. Оцінка цих втрат є складним завданням, оскільки більшість екосистемних послуг не мають прямої ринкової ціни.

3.2. Математичні методи оцінки збитків за відсутності ринкових цін

Для оцінки вартості природних ресурсів та екологічної шкоди, які не продаються на відкритих ринках, у міжнародній практиці використовують три базові економіко-математичні методи:

Метод оцінки	Суть методу та математичний підхід	Сфера застосування в екології
Метод умовного оцінювання (<i>Contingent Valuation Method – CVM</i>)	Побудова моделей на основі соціологічних опитувань респондентів щодо їхньої готовності платити (<i>Willingness to Pay – WTP</i>) за збереження об'єкта або готовності прийняти компенсацію (<i>Willingness to Accept – WTA</i>) за його втрату.	Оцінка унікальних природних ландшафтів, біорізноманіття, заповідних зон.
Метод гедоністичного ціноутворення (<i>Hedonic Pricing Method</i>)	Базується на регресійному аналізі ринку нерухомості. Ціна об'єкта (P) моделюється як функція його конструктивних (S), локаційних (L) та екологічних (E) характеристик: $P = f(S, L, E)$.	Визначення збитків від забруднення повітря або шуму через падіння вартості житла у брудних районах.
Метод транспортно-дорожніх витрат (<i>Travel Cost Method – TCM</i>)	Сумування всіх фінансових та часових витрат, які люди несуть, щоб дістатися до природного об'єкта. Функція попиту будується залежно від дальності поїздок.	Оцінка рекреаційної вартості лісів, національних парків, чистих пляжів та водосховищ.

3.3. Нормативно-розрахунковий підхід: моделювання потонних збитків та нарахування штрафів

У повсякденній інженерно-екологічній та юридичній практиці замість складних непрямих методів використовують затверджені державою нормативні потонні методики. Вони дозволяють оперативно розрахувати збитки на основі маси викинутої чи скинутої речовини, зафіксованої екологічною інспекцією.

Базова математична модель для розрахунку річних економічних збитків (U, грн/рік) від забруднення атмосферного повітря стаціонарними джерелами має вигляд:

$$U = M \cdot \gamma \cdot f \cdot K_n \cdot K_e$$

де: M – загальна маса викиду забруднюючої речовини або групи речовин за рік (тонн/рік);

γ – базовий норматив збитків у грошовому виразі за наведену тонну забруднення (уніфікована константа, що щорічно індексується, грн/т);

f – безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання домішки в атмосфері (залежить від висоти труби, геометрії джерела та швидкості осідання частинок);

K_n – коефіцієнт відносної екологічної небезпеки конкретної речовин;

K_e – коефіцієнт екологічної ситуації та значущості регіону.

При аварійних скидах у водні об'єкти або розливах нафтопродуктів на ґрунт структура формул залишається аналогічною, але додатково вводиться об'ємний коефіцієнт або площа деградації земель, а норматив ґрунтово збільшується, оскільки ліквідація забруднення у гідросфері та літосфері вимагає значно більших капітальних витрат на рекультивацію.

Контрольні питання

1. Проаналізуйте фундаментальну різницю між поняттями «екологічна небезпека» та «екологічний ризик». Розкрийте сутність явища необоротності екологічних змін при досягненні критичних меж навантаження.

2. Охарактеризуйте етапи класичної концепції оцінки ризику для здоров'я населення (ВООЗ/US EPA) та логічний зв'язок між ними.

3. Проаналізуйте математичну модель розрахунку середньодобової дози експозиції), обґрунтувавши фізичний зміст кожного параметра та різницю в періодах усереднення часу для канцерогенів і неканцерогенів.

4. Розкрийте методологію оцінки неканцерогенних ризиків за допомогою коефіцієнта HQ та індексу HI небезпеки. Які управлінські рішення приймаються при перевищенні одиничного порогу?

5. Охарактеризуйте математичний апарат розрахунку індивідуального канцерогенного ризику.

6. Обґрунтуйте концепцію «Джерело – Шлях – Рецептор» (SPR) як основу просторового моделювання екологічних ризиків.

7. Проаналізуйте методологію системного аналізу «Дерево відмов» (FTA): логіка побудови, використання операторів «І»/«АБО» та алгоритм розрахунку ймовірності кінцевої негативної події.

8. Розкрийте сутність та область застосування методу «Дерево подій» (ETA) при моделюванні розвитку наслідків масштабних техногенних аварій на екологічно небезпечних об'єктах.

9. Проведіть порівняльний аналіз детермінованого та сценарного підходів (BAU, песимістичний, оптимістичний сценарії) при довгостроковому прогнозуванні стану екосистем.

10. Обґрунтуйте необхідність застосування стохастичного методу Монте-Карло для врахування невизначеності вихідних даних в екологічному моделюванні та форму кінцевого результату порівняно з детермінованими моделями.

11. Розкрийте економічну суть поняття «екологічні збитки від забруднення довкілля». Проаналізуйте структуру та відмінності між прямими матеріальними збитками і непрямими втратами екосистемних послуг.

12. Охарактеризуйте метод умовного оцінювання (CVM) для капіталізації вартості природних благ.

13. Розкрийте математичну суть та регресійну модель методу гедоністичного ціноутворення. Як стан атмосферного повітря чи рівень шуму інтегрується у вартість ринку нерухомості?

14. Опишіть методологію та область застосування методу транспортно-дорожніх витрат (ТСМ) для економічної оцінки рекреаційного потенціалу та збитків від деградації природних зон.

15. Проаналізуйте структуру базової інженерної моделі розрахунку річних потонних збитків (U) від забруднення атмосфери. Яку екологічну роль відіграють коефіцієнти відносної небезпеки речовини та значущості регіону?

Лекція 16

СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ (EIM): ЗБЕРІГАННЯ, ОБРОБКА ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ. BIG DATA ТА AI В ЕКОЛОГІЇ

Мета лекції: сформувати у студентів знання про сучасну архітектуру екологічних інформаційних систем (EIM), методи збору, структурування та візуалізації моніторингових даних; ознайомити з технологіями обробки великих даних (Big Data) та інструментами штучного інтелекту (AI) для предиктивного аналізу стану біосфери.

План лекції

1. Архітектура та функціонал екологічних інформаційних систем (EIM)
2. Геоінформаційні системи (ГІС) та візуалізація екологічних даних
3. Технології Big Data та штучний інтелект (AI) в екологічному моніторингу

1. Архітектура та функціонал екологічних інформаційних систем (EIM)

1.1. Поняття Environmental Information Management (EIM) як цифрового каркаса моніторингу*

Environmental Information Management (EIM) – це багаторівнева, інтегрована інженерно-інформаційна інфраструктура, що забезпечує повний життєвий цикл екологічної інформації. Вона охоплює процеси автоматизованого збору, верифікації, стандартизації, довгострокового зберігання, математичної обробки та просторової візуалізації даних про стан компонентів довкілля та антропогенних джерел впливу.

У сучасній прикладній екології системи EIM розглядаються як цифровий фундамент для прийняття юридично значущих управлінських рішень, екологічного аудиту, проведення ОВД (оцінки впливу на довкілля) та стратегічного планування розвитку територій.

Головна інженерна проблема екологічного моніторингу, яку покликана вирішити архітектура EIM, полягає у високій гетерогенності (різномірності) та асинхронності вхідних даних. Екологічна інформація за своєю природою є специфічним типом просторово-часових масивів, які мають такі складні характеристики:

– різні формати та типи даних: система повинна одночасно оперувати скалярними величинами з автоматичних датчиків (наприклад, концентрація газу в мг/м³), текстовими протоколами мокрих хімічних аналізів з акредитованих лабораторій, багатоспектральними растровими знімками з космічних апаратів, а також векторними картами меж санітарно-захисних зон (СЗЗ);

– часова асинхронність (різна дискретність): дані з автоматизованих постів на димових трубах надходять кожні 5–10 секунд (миттєві лонги), гідрометеорологічні параметри оновлюються щогодини, відбір проб

підземних вод здійснюється раз на квартал, а звіти підприємств про утворення відходів надходять раз на рік;

– просторова розсередженість: координатна прив'язка даних варіюється від точкових джерел (конкретний випуск стічних вод) та лінійних об'єктів (автомобільна траса) до площинних полігонів (карьєри, сміттєзвалища) та глобальних піксельних сіток (супутникові покриття);

– варіативність похибок та інструментального шуму: датчики піддаються температурному дрейфу, хімічному отруєнню сенсорів та збоєм передачі даних.

Тому першочерговою функцією ЕІМ є не просто накопичення сирих даних, а їхня валідація за допомогою алгоритмів статистичного контролю (виявлення та видалення аномальних стрибків – outliers, апроксимація пропусків) та приведення до єдиних міжнародних стандартів обміну екологічною інформацією (наприклад, ISO 19115 для геопросторових метаданих або WaterML для гідрологічних параметрів).

1.2. Багаторівнева структура збору даних: IoT-датчики, лабораторії та ДЗЗ

Збір інформації в сучасних системах ЕІМ організовано за вертикально-інтегрованим принципом, де кожен рівень компенсує обмеження іншого, забезпечуючи максимальне просторово-часове охоплення.

А. Нижній рівень: автоматизовані мережі інтернет-речей (IoT-екологія)

Цей рівень забезпечує безперервний моніторинг у режимі реального часу (real-time monitoring). На об'єктах промислових викидів та в селітебних зонах розгортаються телеметричні комплекси, побудовані на базі мікроконтролерів та спеціалізованих газоаналітичних сенсорів.

Технічне забезпечення: для моніторингу атмосфери застосовуються оптичні (лазерні) лічильники частинок для фіксації дрібнодисперсного пилу PM2.5 та PM10 (принцип лазерної дифракції), а також електрохімічні, фотоіонізаційні (PID) та інфрачервоні (NDIR) сенсори для вимірювання концентрацій NO_x, SO₂, CO, H₂S та озону. У гідросфері застосовуються автоматичні занурювальні мультипараметричні зонди, які вимірюють рН, ОВП (окисно-відновний потенціал), питому електропровідність (салінометрія), розчинений кисень (полярографічні або оптичні датчики люмінесценції) та каламутність.

Передача даних: інтеграція датчиків у єдину мережу здійснюється за допомогою енергоефективних бездротових протоколів великого радіуса дії (LoRaWAN, NB-IoT) або стандартних промислових мереж 4G/5G за допомогою легковагового протоколу MQTT, адаптованого для передачі телеметрії за умов нестабільного зв'язку.

Обмеження: порівняно висока похибка (до 10–15%), чутливість до вологості та температури повітря, необхідність регулярного калібрування та заміни сенсорів через їхню деградацію.

Б. Середній рівень: Аналітичний (лабораторний) моніторинг

Включає дані дискретного відбору проб згідно з регламентними графіками. Цей рівень є еталонним і має найвищу юридичну та наукову силу.

Технічне забезпечення: хіміко-аналітичні дослідження виконуються стаціонарними або мобільними екологічними лабораторіями з використанням методів високоефективної рідинної та газової хроматографії (ГХ-МС), атомно-абсорбційної спектрометрії (ААС) та мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-МС).

Цільові показники: визначення концентрацій стійких органічних забруднювачів (СОЗ), пестицидів, діоксинів, фенолів, нафтопродуктів, повного спектра важких металів у ґрунтах, донних відкладеннях, підземних водах та тканинах живих організмів (біомоніторинг).

Інтеграція: результати аналізів агрегуються в Лабораторних інформаційних менеджмент-системах (LIMS), звідки через прикладні програмні інтерфейси (API) автоматично експортуються в центральну базу даних ЕІМ.

Обмеження: низька часова дискретність (відбір може проводитися раз на тиждень, місяць або квартал), значний часовий лаг між відбором проби та отриманням результату (від кількох годин до днів).

В. Верхній рівень: Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ)

Забезпечує макроекологічний огляд великих територій, транскордонних річкових басейнів та атмосферних фронтів за допомогою космічних апаратів.

Технічне забезпечення: використання відкритих та комерційних даних супутникових угруповань (наприклад, Sentinel в межах європейської програми Copernicus, або Landsat від NASA/USGS). Обробка ведеться у специфічних спектральних діапазонах: видиму, ближньому інфрачервоному (NIR), короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) та термальному (TIR).

Екологічні параметри: атмосфера: оцінка загального вмісту газів-забруднювачів у вертикальному стовпі атмосфери за допомогою спектрометрів типу TROPOMI (супутник Sentinel-5P).

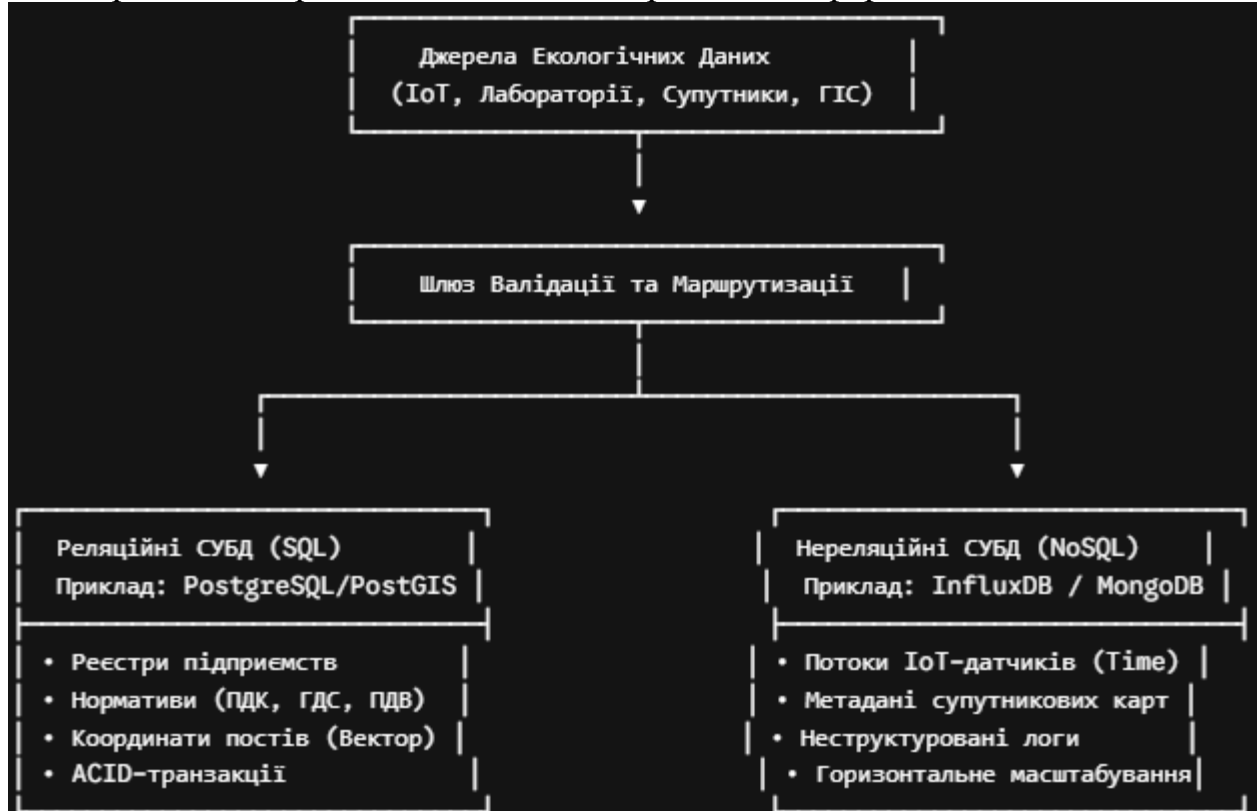
Гідросфера: моніторинг площ та інтенсивності евтрофікації (цвітіння) водойм за концентрацією хлорофілу-а, виявлення масштабів теплового забруднення скидними водами АЕС та ТЕС, фіксація нафтових плям у морських акваторіях за допомогою радіолокаційних сенсорів (SAR).

Літосфера/Біота: розрахунок вегетаційних індексів (наприклад, NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) для оцінки пригнічення рослинності навколо металургійних комбінатів, детектування незаконних рубок лісів, моделювання процесів опустелювання, ерозії ґрунтів та картографування термальних аномалій (лісові та торф'яні пожежі).

Обмеження: залежність оптичних сенсорів від хмарності, обмежена просторова роздільна здатність для безкоштовних знімків (від 10 до 30 метрів на піксель), складність дешифрування приземних концентрацій.

1.3. Організація баз даних в екології: реляційні (SQL) та нереляційні (NoSQL) рішення

Для забезпечення надійності та швидкодії систем ЕІМ розробляється гібридна архітектура баз даних (Polyglot Persistence), яка суміщає переваги двох принципово різних підходів до збереження інформації.



Реляційні бази даних (SQL)

Базуються на реляційній моделі Едгара Кодда, де дані зберігаються у вигляді строго типізованих таблиць із жорстко заданими зв'язками («один-до-багатьох», «багато-до-багатьох») та підтримують транзакційну модель ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability), що гарантує 100% точність і виключає дублювання чи втрату узгодженості.

Провідні технології: PostgreSQL (з обов'язковим розширенням PostGIS), Oracle, MySQL.

Функціональне призначення: зберігання нормативно-довідкової та адміністративно-екологічної інформації:

– реєстри промислових підприємств-забруднювачів з їхніми геометричними координатами та КВЕД;

– офіційні переліки хімічних речовин із зазначенням їхніх класів небезпеки, нормативів ПДК (максимально разових, середньодобових), лімітів викидів/скидів (ПДВ, ГДС);

– паспорти постів моніторингу та свердловин з їхнім географічним положенням, типами встановленого обладнання та графіками повірки датчиків.

Нереляційні бази даних (NoSQL)

Відмовляються від табличної структури на користь гнучких моделей даних. Вони оптимізовані під високу швидкість запису та горизонтальне масштабування (додавання нових серверів у кластер під час зростання навантаження).

Провідні технології: InfluxDB, MongoDB, Apache Cassandra, Redis.

Функціональне призначення: обробка та аналіз великих потоків неструктурованих або напівструктурованих даних:

1. Time-Series СУБД (наприклад, InfluxDB): спеціалізовані бази даних, оптимізовані виключно під часові ряди. Вони використовуються для прийому щосекундних даних від тисяч IoT-датчиків. Завдяки вбудованим механізмам стиснення та автоматичного видалення або усереднення застарілих даних (retention policies), вони дозволяють утримувати гігабайтні потоки телеметрії без втрати продуктивності.

2. Документ-орієнтовані СУБД (наприклад, MongoDB): зберігають дані у форматі екологічних JSON-документів. Це ідеально підходить для інтеграції метеорологічних прогнозів (GRIB-файли, конвертовані в JSON) чи метаданих супутникових знімків, де набір параметрів може динамічно змінюватися від одного кадру до іншого (наприклад, різна кількість спектральних каналів, кутів зйомки та рівнів хмарності).

2. Геоінформаційні системи (ГІС) та візуалізація екологічних даних

2.1. ГІС як головний інструмент просторового аналізу: растрові та векторні моделі представлення екологічної інформації

Оскільки понад 80% усієї екологічної інформації має просторову прив'язку, Геоінформаційні системи (ГІС) є центральним операційним ядром будь-якої системи ЕІМ. ГІС не просто відображає об'єкти на карті, а виконує роль розрахунково-аналітичного інструменту, що дозволяє суміщати просторові шари (overlays) для виявлення причинно-наслідкових зв'язків між джерелами небезпеки та станом рецепторів.

У ГІС-моделюванні екологічних процесів використовують дві фундаментальні моделі представлення даних, які кодуються у загальноприйнятих географічних проекціях (наприклад, WGS 84 / UTM):

Векторна модель даних:

Представляє просторові об'єкти у вигляді дискретних геометричних примітивів із чіткими координатами (x, y, z):

Точки (Points): стаціонарні пости екологічного моніторингу, поодинокі димові труби підприємств, артезіанські свердловини, точки локальних інспекційних відборів проб.

Лінії (Polylines): річкова мережа, автомагістралі (як лінійні джерела викидів NO_x та бенз(а)пірену), траси магістральних нафто- чи газопроводів.

Полігони (Polygons): контури санітарно-захисних зон (СЗЗ), межі заповідників, території адміністративних районів, дзеркала водосховищ, ареали лісових масивів.

Кожному векторному об'єкту відповідає рядок в атрибутивній таблиці (наприклад, для полігону сміттєзвалища в атрибутах вказується його площа, об'єм накопичених відходів, дата відкриття).

Растрова модель даних:

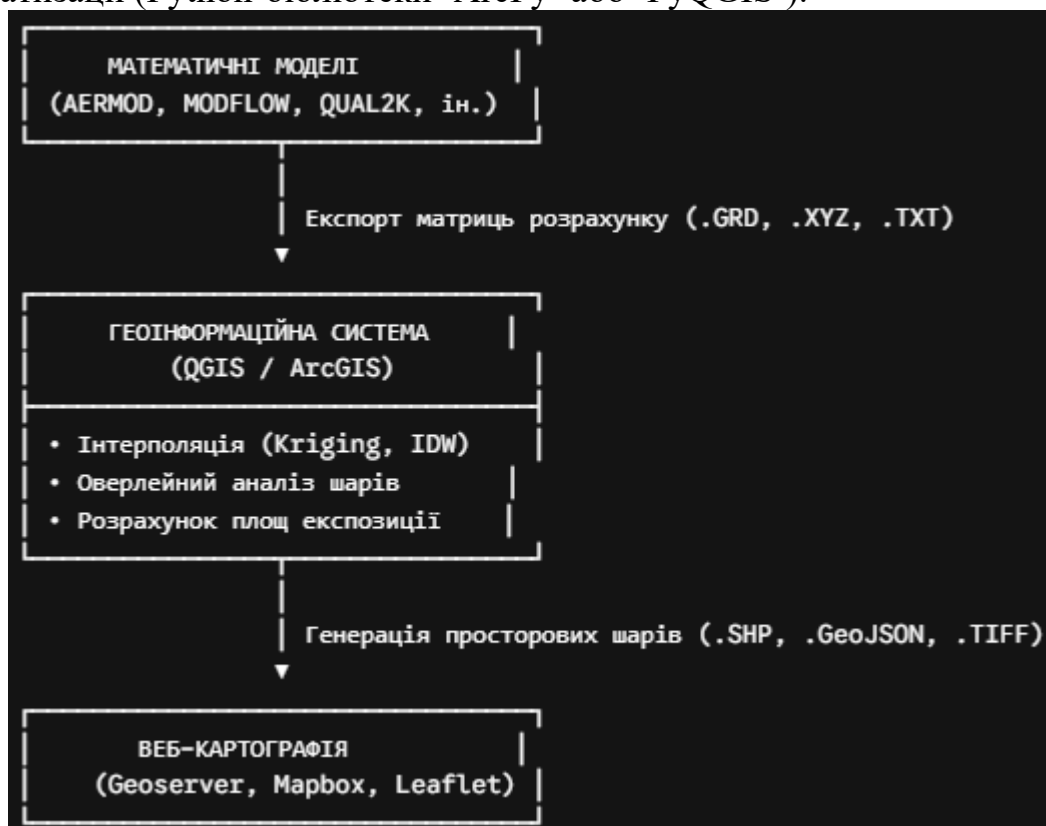
Представляє простір у вигляді безперервної регулярної сітки, що складається з комірок (пікселів) однакового розміру. Кожна комірка містить лише одне числове значення, яке характеризує аналізований параметр у цій точці простору. Роздільна здатність растра визначається лінійним розміром пікселя на місцевості (наприклад, 10×10 метрів).

Сфера застосування: відображення безперервних полів екологічних параметрів: цифрові моделі рельєфу (ЦМР), карти просторового розподілу температур, супутникові індекси вегетації (NDVI), а також матриці приземних концентрацій забруднюючих речовин, розраховані математичними моделями.

2.2. Інтеграція розрахункових моделей з ГІС-платформами (ArcGIS, QGIS)

Сучасний інженерний підхід вимагає безшовної інтеграції математичних моделей розсіювання та міграції з геоінформаційними платформами, наприклад, ArcGIS чи QGIS.

Процес інтеграції реалізується двома шляхами: через файловий обмін стандартними геопросторовими форматами або безпосередньо через скрипти автоматизації (Python-бібліотеки `ArcPy` або `PyQGIS`).



1. Конвертація результатів моделювання атмосфери (AERMOD / Еколог): моделі розсіювання викидів видають результат у вигляді текстових файлів розрахункової сітки (рецепторних точок) з координатами та концентраціями в частках ПДК. У ГІС цей файл імпортується як векторний

набір точок. Для отримання суцільного візуального поля забруднення інженер виконує просторову інтерполяцію (методами Крігінга – Kriging або обернених зважених відстаней – IDW), перетворюючи точки на ізолінії та ізополя забруднення у вигляді растрового шару (GeoTIFF).

2. Геоприв'язка гідродинамічних моделей літосфери (MODFLOW): сучасні оболонки для MODFLOW (наприклад, Visual MODFLOW) мають вбудовані ГІС-модулі. Вони дозволяють імпортувати з QGIS векторні шари гідрографічної мережі, тектонічних розломів та контурів фундаментів будівель для автоматичної побудови сітки скінченних різниць. Після розрахунку тривимірний шлейф міграції важких металів у підземних водах експортується назад у ГІС у вигляді багатовимірних шарів (формат NetCDF або Shapefile для кожного зрізу водоносного горизонту).

3. Оверлейний екологічний аналіз (Spatial Overlay): шляхом накладання отриманого растра забруднення на векторні шари міста (житлова забудова, дитячі садки, лікарні) ГІС автоматично розраховує: яка саме площа селітебної зони потрапила в ізолінію перевищення ПДК та точну кількість населення (POP), що зазнає хронічного інгаляційного впливу, для подальшого розрахунку ризиків HQ та CR.

2.3. Створення екологічних дашбордів (Dashboards) та веб-карт реального часу

Кінцевим продуктом обробки даних у системах ЕІМ є їхнє представлення широкому колу користувачів (громадськості, державним інспекторам, топ-менеджменту підприємств) у вигляді інтерактивних екологічних дашбордів (Environmental Dashboards) та геопорталів. Перевага дашборда – агрегація критично важливих параметрів на одному екрані без необхідності завантаження важких ГІС-програм.

Архітектурний стек веб-картографії:

1. Для публікації просторових екологічних даних у мережі Інтернет використовується зв'язка: База даних (PostGIS) → Веб-сервер просторових даних (GeoServer або MapServer) → Клієнтська JavaScript-бібліотека для інтерактивних карт (Leaflet, OpenLayers, Mapbox GL JS).

2. Дашборди для атмосферного моніторингу та індекс AQI:

Автоматичні системи збору даних IoT інтегруються з веб-інтерфейсами (наприклад, на базі платформ Grafana, ArcGIS Dashboards або Tableau). На таких картах точкові пости моніторингу відображаються у вигляді кольорових маркерів, колір яких динамічно змінюється відповідно до розрахованого в реальному часі Індексу якості повітря (AQI – Air Quality Index):

- Зелений (0–50):* повітря чисте, ризики відсутні.
- Жовтий (51–100):* помірний рівень, безпечний для більшості.
- Оранжевий (101–150): шкідливий для чутливих груп (астматики, діти).
- Червоний і фіолетовий (>151): небезпечний рівень для всього населення, автоматично генерується алерт (alert) для міських служб.

Крім карт, екологічний дашборд містить віджети з часовими трендами (лінійні графіки, що показують добовий хід концентрацій азоту діоксиду), діаграми «рози вітрів» для визначення напрямку принесення домішок від промзони, та блоки екстрених сповіщень у разі фіксації Високого забруднення (ВЗ) чи Екстремально високого забруднення (ЕВЗ).

3. Технології Big Data та штучний інтелект (AI) в екологічному моніторингу

3.1. Концепція Big Data в екології: обробка великих масивів кліматичних та супутникових даних

Екологічний моніторинг у XXI столітті остаточно перейшов у категорію систем, що оперують «Великими даними» (Big Data). Це зумовлено розгортанням глобальних супутникових сузір'їв, мереж IoT та розрахунком кліматичних моделей високої просторової роздільної здатності.

Для опису специфіки Big Data в екології застосовують класичну інженерну парадигму 5V:

Volume (Обсяг): об'єм даних обчислюється петабайтами. Один тривимірний знімок багатоспектрального супутника або результати глобального кліматичного моделювання (наприклад, масиви SMIP6) можуть важити сотні гігабайт. Традиційні локальні сервери не здатні зберігати та обробляти такі масиви, що вимагає переходу на хмарні інфраструктури (наприклад, Google Earth Engine (GEE), AWS Cloud, Copernicus Data Space Ecosystem).

Velocity (Швидкість): потоки телеметрії з тисяч автоматичних датчиків AQI, метеостанцій та систем дистанційного обліку викидів надходять безперервно у режимі реального часу і потребують миттєвої фільтрації та агрегації.

Variety (Різноманітність): спільний аналіз вимагає суміщення абсолютно полярних форматів даних: структурованих часових рядів (SQL), бінарних багатовимірних матриць атмосфери (.nc, .hdf), векторних карт (.shp, .geojson) та неструктурованих текстових рапортів екологічних служб.

Veracity (Достовірність): моніторингові дані містять величезну кількість інструментального шуму та пропусків (через збої зв'язку або калібрування датчиків). Алгоритми Big Data мають автоматично визначати аномалії та відновлювати структуру даних без участі людини.

Value (Цінність): кінцева мета обробки – виявлення прихованих закономірностей (наприклад, кореляції між специфічним напрямком вітру, вологістю та сплеском легеневих захворювань у конкретному районі міста) для переходу від констатації факту забруднення до предиктивного керування ризиками.

3.2. Машинне навчання (Machine Learning) для предиктивної екології

Традиційні детерміновані моделі (наприклад, рівняння турбулентної дифузії в атмосфері) вимагають точних фізичних параметрів джерела викиду та метеорології, які часто є невідомими. Алгоритми Машинного навчання (Machine Learning – ML) розв'язують задачу з іншого боку: вони знаходять складні нелінійні статистичні залежності безпосередньо у накопичених історичних масивах даних.

А. Регресійні моделі та Ансамблі дерев (Random Forest, XGBoost)

Ці алгоритми застосовуються для короткострокового прогнозування концентрацій шкідливих домішок у повітрі (наприклад, дрібнодисперсного пилу PM_{2.5} та SP_{M10}) на 24–48 годин наперед.

Математична суть: модель навчається на історичних даних постів моніторингу. Вхідними «фічами» (features) є метеорологічні параметри (температура повітря, швидкість та напрямок вітру, висота шару перемішування, вологість, сонячна радіація), інтенсивність автомобільного трафіку та календарні ознаки (день тижня, година доби).

Механізм: алгоритм «Випадкового лісу» (Random Forest) будує сотні незалежних дерев рішень, кожне з яких робить свій прогноз, а фінальний результат отримується шляхом голосування або усереднення. Це дозволяє міській системі ЕІМ завчасно (за добу) попередити населення та комунальні служби про формування умов для утворення фотохімічного смогу або критичного накопичення пилу в приземному шарі.

Б. Глибоке навчання та Згорткові нейронні мережі (CNN)

Для аналізу просторових даних та зображень (супутникових знімків та фотофіксації з БПЛА) застосовують штучні нейронні мережі згорткового типу (Convolutional Neural Networks – CNN).

Сфера застосування:

Автоматичне детектування вирубки лісів: нейромережа аналізує часові серії супутникових знімків середньої та високої роздільної здатності. Спеціальні згорткові шари виділяють текстурні та спектральні ознаки здорового лісу. При появі геометрично чітких зон зміни спектрального сигналу (оголений ґрунт замість крони дерев) модель класифікує це як вирубку і автоматично надсилає координати екологічній інспекції.

Класифікація деградації ґрунтів та опустелювання: моделі навчаються розпізнавати ознаки водної та вітрової ерозії, засолювання або виснаження гумусового шару за мультиспектральними профілями відбиття ґрунтової матриці.

Детектування та контурний аналіз масштабів пожеж: у поєднанні з термальними каналами супутників нейромережі в реальному часі виділяють кромку лісової пожежі, визначають вектор її поширення на основі поточних метеоданих та автоматично оцінюють площу випалених біотопів.

3.3. Цифрові двійники (Digital Twins) природних екосистем та річкових басейнів

Найвищим ступенем інтеграції EIM, ГІС, Big Data та AI є створення «Цифрових двійників» (Digital Twins) природних та природно-техногенних систем.

Цифровий двійник екосистеми – це віртуальна динамічна копія реального природного об'єкта (річкового басейну, лісового масиву, геологічного пласта або екосистеми всього міста), яка безперервно оновлює свій стан на основі потоків даних з датчиків моніторингу та здатна симулювати реакцію об'єкта на будь-які зовнішні впливи.

Принцип функціонування: на відміну від статичної математичної моделі, яку запускають вручну для разового розрахунку, Цифровий двійник працює у постійному замкненому циклі:

Реальний об'єкт (Датчики) $\xrightarrow{\text{Data Stream}}$ Цифровий двійник (AI + Гідродинаміка) $\xrightarrow{\text{Оптимізація}}$ Управлінське рішення

Приклад реалізації (Річковий басейн): цифровий двійник великої річки акумулює дані про рівні води, скиди з ГЕС, метеопрогнози та морфометрію русла. У разі загрози весняного паводку система автоматично прораховує тисячі сценаріїв прориву дамб, застосовує гідродинамічні моделі затоплення, оптимізує графік скидання води на шлюзах за допомогою алгоритмів AI і видає карту предиктивної евакуації населення за кілька днів до реального підйому води.

Контрольні питання

1. Обґрунтуйте інженерну необхідність використання систем Environmental Information Management (EIM) як інтеграційного каркаса моніторингу. Які проблеми гетерогенності даних вони вирішують?

2. Проаналізуйте переваги та технологічні обмеження нижнього (IoT) рівню збору екологічної інформації порівняно з класичним лабораторним моніторингом.

3. Охарактеризуйте роль та специфіку застосування спектральних індексів (наприклад, NDVI) Дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для макроекологічного аналізу літосфери та біоти.

4. Порівняйте область застосування, структуру та швидкість масштабування реляційних (SQL) та нереляційних (NoSQL/Time-Series) баз даних в інфраструктурі EIM.

5. Розкрийте відмінності між растровою та векторною моделями представлення просторових даних у ГІС при моделюванні полів забруднення атмосфери та гідросфери.

6. Опишіть покроковий алгоритм інтеграції результатів математичного моделювання розсіювання викидів (наприклад, з AERMOD) з ГІС-платформами типу QGIS/ArcGIS.

7. Яку роль відіграє метод просторової інтерполяції (Kriging, IDW) при трансформації дискретних точкових вимірів постів моніторингу в безперервні карти екологічного стану?

8. Проаналізуйте структуру та призначення екологічних дашбордів реального часу. На яких принципах базується розрахунок та кольорове кодування Індексу якості повітря (AQI)?

9. Обґрунтуйте специфіку екологічних моніторингових даних у контексті інженерної парадигми Big Data «5V». Які обмеження традиційних серверів це викликає?

10. Порівняйте підходи детермінованого фізико-математичного моделювання та методів Машинного навчання (Machine Learning) при прогнозуванні екологічних процесів.

11. Розкрийте математичну суть та логіку застосування алгоритму «Випадкового лісу» (Random Forest) для предиктивного аналізу концентрацій пилу у містах.

12. Яким чином Згорткові нейронні мережі (CNN) автоматично детектують факти незаконних вирубок лісів та деградації ґрунтів за архівами супутникових знімків?

13. Сформулюйте фундаментальне визначення «Цифрового двійника» (Digital Twin) екосистеми та його ключову відмінність від звичайної статичної математичної моделі.

14. Опишіть архітектуру та функціональну схему Цифрового двійника річкового басейну для предиктивного захисту територій від катастрофічних паводків.

15. Які перспективи та виклики (етичні, технологічні, фінансові) несе інтеграція Штучного Інтелекту (AI) у державні та міжнародні системи глобального екологічного моніторингу?