**Тема№5: "Прогнозування якості поверхневих вод: методи та інструменти"**

**План:**

1. Системний підхід до оцінки якості води

- Показники якості води

- Фактори впливу на якість води

- Просторово-часова мінливість якості води

2. Методи прогнозування якості води

- Статистичні методи

- Детерміновані моделі

- Машинне навчання

- Експертні системи

3. Моделювання процесів формування якості води

- Фізико-хімічні процеси

- Біологічні процеси

- Антропогенні впливи

- Самоочищення водойм

4. Інструменти прогнозування

- Програмні комплекси (QUAL2K, WASP)

- ГІС-технології

- Системи моніторингу

- Бази даних якості води

5. Верифікація та валідація прогнозів

- Оцінка точності

- Аналіз невизначеностей

- Калібрування моделей

6. Практичне застосування

- Управління якістю води

- Нормування скидів

- Планування водоохоронних заходів

- Оцінка ризиків

**1. Системний підхід до оцінки якості води**

- Показники якості води

- Фактори впливу на якість води

- Просторово-часова мінливість якості води

Якість поверхневих вод характеризується комплексом фізичних, хімічних та біологічних показників, що відображають їх стан та придатність для різних видів водокористування. **Ключовими фізичними показниками є** температура, прозорість, кольоровість, запах та завислі речовини. Хімічні показники включають pH, розчинений кисень, БСК, ХСК, біогенні елементи (азот, фосфор), мінералізацію, важкі метали та специфічні забруднюючі речовини. **Біологічні показники** представлені видовим складом гідробіонтів, біомасою фітопланктону, мікробіологічними показниками.

**Фактори впливу** на якість води поділяються на природні та антропогенні. **До природних належать** геологічна будова басейну, кліматичні умови, гідрологічний режим, ґрунтовий покрив та рослинність. **Антропогенні фактори** включають точкові джерела забруднення (промислові та комунальні стоки), дифузні джерела (поверхневий стік з сільськогосподарських угідь, урбанізованих територій), гідротехнічні споруди та регулювання стоку.

Просторово-часова мінливість якості води проявляється у декількох масштабах. Просторова мінливість спостерігається вздовж течії річки (від витоків до гирла), між різними ділянками водойм (літораль, пелагіаль), між поверхневими та придонними шарами. Часова мінливість включає добові коливання (особливо для розчиненого кисню та pH), сезонні зміни (пов'язані з гідрологічним режимом та біологічною активністю) та багаторічні тренди.

Системний підхід до оцінки якості води передбачає:

- Комплексний аналіз усіх компонентів водної екосистеми

- Врахування взаємозв'язків між показниками

- Оцінку впливу природних та антропогенних факторів

- Аналіз просторово-часової динаміки

- Використання інтегральних показників якості води

- Визначення екологічних ризиків

- Прогнозування змін якості води

Особлива увага приділяється взаємодії між фізичними, хімічними та біологічними процесами, що визначають формування якості води. Наприклад, температура впливає на розчинність кисню та швидкість біохімічних процесів, концентрація біогенних елементів визначає розвиток фітопланктону, а біологічна активність впливає на pH та вміст органічних речовин.

Для ефективного управління якістю води необхідно розуміти механізми її формування та фактори впливу на різних просторово-часових масштабах. Це дозволяє розробляти адекватні заходи з охорони вод та прогнозувати зміни їх стану.

**2. Методи прогнозування якості води**

- Статистичні методи

- Детерміновані моделі

- Машинне навчання

- Експертні системи

В сучасній практиці управління водними ресурсами використовуються **чотири основні підходи до прогнозування якості води,** кожен з яких має свої переваги та обмеження.

**Статистичні методи** базуються на аналізі часових рядів спостережень за показниками якості води. Вони включають **регресійний аналіз**, який дозволяє встановити зв'язки між різними параметрами якості води та факторами впливу; **кореляційний аналіз** для виявлення взаємозалежностей між показниками; **аналіз часових рядів** для виявлення трендів та циклічності. Статистичні методи особливо ефективні при наявності довгих рядів спостережень та відносно стабільних умов формування якості води.

**Детерміновані моделі** описують фізичні, хімічні та біологічні процеси, що визначають якість води. Вони базуються на рівняннях масопереносу, кінетики хімічних реакцій та біологічних процесів. Ці моделі дозволяють прогнозувати зміни концентрацій забруднюючих речовин з урахуванням гідродинамічних процесів, температури, освітленості та інших факторів. Основна перевага - можливість моделювання нових ситуацій, для яких відсутні історичні дані.

**Методи машинного навчання,** включаючи нейронні мережі, дерева рішень та інші алгоритми, здатні виявляти складні нелінійні залежності в даних про якість води. Вони особливо ефективні при роботі з великими масивами даних та при наявності багатьох взаємопов'язаних факторів. Машинне навчання дозволяє створювати адаптивні прогностичні моделі, які уточнюються при надходженні нових даних.

**Експертні системи** використовують формалізований досвід спеціалістів для прогнозування якості води. Вони включають бази знань про закономірності формування якості води, правила прийняття рішень та методи логічного виводу. Експертні системи особливо корисні в ситуаціях з обмеженими даними або при необхідності врахування якісних факторів. Вони також ефективні для інтерпретації результатів моніторингу та вибору водоохоронних заходів.

На практиці часто використовують комбінацію різних методів, що дозволяє компенсувати їх недоліки та підвищити надійність прогнозів. Важливим аспектом є також оцінка невизначеності прогнозів та визначення меж їх застосування.

**3. Моделювання процесів формування якості води**

- Фізико-хімічні процеси

- Біологічні процеси

- Антропогенні впливи

- Самоочищення водойм

Фізико-хімічні процеси формування якості води включають адвекцію, дифузію, седиментацію, розчинення та трансформацію речовин. Ключовими є процеси масопереносу, що описуються рівняннями конвективно-дифузійного переносу. Важливу роль відіграють окисно-відновні реакції, процеси сорбції-десорбції, фотохімічні реакції. Температура води впливає на швидкість цих процесів та розчинність газів.

Біологічні процеси охоплюють продукційно-деструкційні відносини у водних екосистемах. Первинна продукція фітопланктону визначає надходження органічної речовини, деструкція забезпечує її розклад. Біологічне поглинання та виділення біогенних елементів формує їх циклічну динаміку. Бактеріальна активність визначає інтенсивність розкладу органічних речовин та самоочищення водойм.

Антропогенні впливи включають надходження забруднюючих речовин з точкових та дифузних джерел. Скиди стічних вод характеризуються об'ємом, складом та режимом надходження. Поверхневий стік з урбанізованих та сільськогосподарських територій привносить біогенні елементи, пестициди, важкі метали. Гідротехнічні споруди змінюють гідрологічний режим та умови формування якості води.

**Самоочищення водойм** - це комплекс природних процесів, що забезпечують відновлення якості води:

- Фізичне самоочищення (розбавлення, седиментація)

- Хімічне самоочищення (окислення, гідроліз)

- Біологічне самоочищення (біодеградація, біоакумуляція)

Моделювання цих процесів вимагає системного підходу та врахування їх взаємозв'язків. Важливо враховувати просторово-часові масштаби процесів та їх залежність від зовнішніх умов. Результати моделювання використовуються для прогнозування якості води та оцінки ефективності водоохоронних заходів.

**4. Інструменти прогнозування**

- Програмні комплекси (QUAL2K, WASP)

- ГІС-технології

- Системи моніторингу

- Бази даних якості води

Програмні комплекси для моделювання якості води включають спеціалізовані системи для різних типів водних об'єктів. QUAL2K призначений для моделювання річкових систем та дозволяє розраховувати зміни якості води вздовж течії з урахуванням джерел забруднення та процесів самоочищення. WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) є більш універсальним інструментом, що може застосовуватися для річок, озер та естуаріїв, моделюючи широкий спектр параметрів якості води.

ГІС-технології забезпечують просторовий аналіз та візуалізацію даних про якість води. Вони дозволяють:

- Створювати цифрові моделі водозборів

- Аналізувати просторовий розподіл джерел забруднення

- Картографувати показники якості води

- Інтегрувати дані моніторингу з результатами моделювання

- Оцінювати ризики забруднення

Системи моніторингу включають мережу спостережень, автоматизовані станції контролю якості води, лабораторії. Сучасні системи забезпечують:

- Безперервні вимірювання ключових параметрів

- Оперативну передачу даних

- Автоматичну обробку результатів

- Раннє попередження про забруднення

Бази даних якості води є основою для аналізу та прогнозування. Вони містять:

- Результати регулярного моніторингу

- Дані про джерела забруднення

- Гідрологічні характеристики

- Метеорологічну інформацію

- Результати спеціальних досліджень

Ефективне прогнозування якості води вимагає інтеграції всіх цих інструментів у єдину систему підтримки прийняття рішень.

**5. Верифікація та валідація прогнозів**

- Оцінка точності

- Аналіз невизначеностей

- Калібрування моделей

Оцінка точності прогнозів здійснюється шляхом порівняння прогнозованих та фактичних значень показників якості води. Використовуються статистичні критерії:

- Середня абсолютна похибка

- Середньоквадратична похибка

- Коефіцієнт детермінації

- Критерій Неша-Сатткліфа

- Систематична похибка

Аналіз невизначеностей включає:

1. Невизначеність вхідних даних:

- Похибки вимірювань

- Просторова неоднорідність

- Часова мінливість

- Репрезентативність даних

2. Невизначеність моделі:

- Структурна невизначеність

- Параметрична невизначеність

- Чутливість до початкових умов

- Помилки чисельних методів

Калібрування моделей передбачає:

- Вибір параметрів для оптимізації

- Визначення цільової функції

- Автоматизовану оптимізацію

- Перевірку на незалежних даних

- Аналіз чутливості параметрів

Ключовим є забезпечення надійності прогнозів для прийняття управлінських рішень. Це досягається через:

- Регулярну перевірку точності прогнозів

- Оцінку діапазону можливих значень

- Документування процедур верифікації

- Оновлення моделей при отриманні нових даних

**6. Практичне застосування**

- Управління якістю води

- Нормування скидів

- Планування водоохоронних заходів

- Оцінка ризиків

Управління якістю води є комплексним процесом, що базується на результатах прогнозування та моделювання. Воно включає оперативне управління (регулювання скидів, управління очисними спорудами) та стратегічне планування (розробка схем комплексного використання водних ресурсів, встановлення цільових показників якості). Прогнозні моделі дозволяють оцінювати ефективність різних управлінських рішень та вибирати оптимальні варіанти водоохоронних заходів.

Нормування скидів забруднюючих речовин здійснюється з урахуванням асиміляційної здатності водних об'єктів. Прогнозні моделі використовуються для:

- Розрахунку гранично допустимих скидів

- Визначення зон забруднення

- Оцінки кумулятивного впливу декількох джерел

- Встановлення лімітів водокористування

Планування водоохоронних заходів базується на прогнозах зміни якості води при різних сценаріях антропогенного навантаження. Розглядаються:

- Технологічні заходи (модернізація очисних споруд)

- Організаційні заходи (оптимізація водокористування)

- Структурні заходи (створення водоохоронних зон)

- Превентивні заходи (системи раннього попередження)

Оцінка ризиків включає:

1. Екологічні ризики:

- Евтрофікація водойм

- Деградація водних екосистем

- Втрата біорізноманіття

2. Санітарно-гігієнічні ризики:

- Забруднення джерел водопостачання

- Поширення захворювань

- Погіршення якості питної води

3. Економічні ризики:

- Збитки водокористувачів

- Витрати на водоочищення

- Втрати рекреаційного потенціалу

Прогнозні моделі дозволяють розробляти сценарії розвитку ситуації та оцінювати ймовірність несприятливих подій, що є основою для прийняття превентивних заходів та планування дій у надзвичайних ситуаціях.