



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет біотехнологій
Кафедра екології та біотехнологій в рослинництві

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ
ГЕОСИСТЕМ**

**Методичні вказівки
до виконання практичних робіт**

**для здобувачів денної та заочної форм навчання
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
спеціальності 103 «Науки про Землю»**

**Харків
2023**

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет біотехнологій
Кафедра екології та біотехнологій в рослинництві



МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ГЕОСИСТЕМ

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт

для здобувачів денної та заочної форм навчання
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
спеціальності 103 «Науки про Землю»

Затверджено
рішенням науково-методичної
ради факультету біотехнологій
Протокол № 3
№3 від 15.06.2023 р.

Харків
2023

УДК 502.3.7

Схвалено на засіданні кафедри екології та біотехнологій в
рослинництві

Протокол № 11 від 14 червня 2023 р.

Рецензенти:

О. О. Ласло, кандидат с.-г. наук, доцент кафедри землеробства і агрохімії ім. В.І. Сазанова Полтавського державного аграрного університету

С.В. Станкевич, кандидат с.-г. наук, завідувач кафедри зоології, ентомології, фітопатології, інтегрованого захисту і карантину рослин ім. Б.М. Литвинова Державного біотехнологічного університету

Моделювання та прогнозування стану геосистем: метод. вказівки до виконання практичних робіт для здобувачів денної та заочної форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 103 «Науки про Землю» ; Держ. біотехнол. ун-т ; уклад.: О.В. Коляда, Л.В. Головань, Ю.Ю. Чуприна, І.М. Бузіна. – Харків: [б. в.], 2023. – 74 с.

Методичні вказівки розроблено згідно з робочою програмою навчальної дисципліни «Моделювання та прогнозування стану геосистем» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 103 «Науки про Землю».

У методичних рекомендаціях наведені теоретичні матеріали та практичні завдання для виконання здобувачами практичних робіт.

УДК 502.3.7

Відповідальний за випуск: О.В. Коляда, канд. с.-г. наук

© Державний біотехнологічний університет, 2023

© О.В. Коляда, Л.В. Головань, Ю.Ю. Чуприна, І.М. Бузіна, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	6
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ГЕОСИСТЕМ.....	8
Практична робота № 1 Основні характеристики природних систем	8
Практична робота № 2 Види моделювання та класифікація моделей	9
Практична робота № 3 Прогнозування розвитку антропогенного впливу на геосистеми методом екстраполяції.....	14
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2 СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ГЕОСИСТЕМ.....	16
Практична робота № 4 Встановлення кореляційного зв'язку між м явищами та процесами в геосистемах	16
Практична робота № 5 Побудова регресійної моделі для вивчення взаємозв'язку між екологічними процесами	20
Практична робота №6 Застосування дисперсійного аналізу для вивчення взаємозв'язку між процесами в геосистемах.....	23
МОДУЛЬ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ НА ГЕОСИСТЕМИ.....	29
Практична робота № 7 Моделювання процесу самоочищення вод річки.....	29
Практична робота № 8 Моделювання процесу біологічного очищення стічних вод в біореакторах.....	35
Практична робота № 9 Моделювання забруднення атмосфери повітря від одиночного джерела.....	41
Практична робота № 10 Прогнозування рівня забруднення атмосфери методом розпізнавання образів.....	46
Практична робота № 11 Моделювання та прогнозування динаміки вмісту гумусу в ґрунті.....	50
Практична робота № 12 Моделювання та прогнозування процесів забруднення у ґрунтах за методом групового урахування аргументів.....	56
МОДУЛЬ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ЕКОСИСТЕМ ТА ГЛОБАЛЬНИХ БІОСФЕРНИХ ПРОЦЕСІВ	58
Практична робота № 13 Моделювання динаміки чисельності популяцій хижака та жертви.....	58

Практична робота № 14 Моделювання динаміки чисельності популяцій на основі моделі Ферхюльста	61
Практична робота № 15 Модель взаємодії РК-БСК для поверхневих водних систем	64
Практична робота № 16 Прогнозування температури повітря для певного регіону.....	67
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	71

ВСТУП

На сьогодні в умовах надмірного антропогенного тиску на геосистеми цілком ймовірним є виникнення серйозних екологічних криз та катастроф. Детальне вивчення складних екологічних процесів та явищ, реакції геосистем на антропогенний вплив, передбачення найрізноманітніших сценаріїв розвитку екологічних проблем не можливе без застосування методів математичного моделювання та прогнозування.

Метою вивчення дисципліни «Моделювання та прогнозування стану геосистем» є формування у майбутніх фахівців теоретичних знань та практичних навичок щодо моделювання фізичних та біотичних процесів у геосистемах, а також прогнозування зміни їх стану під впливом різноманітних біотичних та антропогенних факторів.

Основними завданнями вивчення дисципліни є:

- засвоїти теоретичні основи проведення моделювання та прогнозування стану геосистем;
- оволодіти методами кореляційного, регресійного та дисперсійного аналізу статистичних даних для встановлення взаємозв'язку природних явищ та процесів;
- ознайомитись та набути навички моделювання та прогнозування наслідків антропогенного впливу на атмосферне повітря, водні об'єкти та ґрунтовий покрив;
- ознайомитись з особливостями моделювання та прогнозування глобальних біосферних процесів.

У результаті вивчення освітньої компоненти здобувачі повинні знати:

- загальні принципи моделювання стану геосистем;
- етапи моделювання та послідовність їх реалізації;
- основи прогнозування стану геосистем;
- закономірності встановлення взаємозв'язку між екологічними процесами методом кореляційного, регресійного та дисперсійного аналізу;
- основи моделювання зміни стану водних екосистем під впливом антропогенного впливу;
- теоретичні засади прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря;
- основи моделювання та прогнозування процесів екологічного

стану ґрунтів;

– основні моделі глобальних біосферних процесів, моделі екологічних систем, динаміки чисельності популяцій.

Вміти:

– оперувати основним термінологічним апаратом у галузі моделювання та прогнозування стану геосистем;

– визначати тип моделі, виконувати необхідні розрахунки параметрів моделі;

– застосовувати метод екстраполяції для прогнозування стану навколишнього середовища;

– будувати регресійні моделі для вивчення взаємозв'язку між фізичними та біотичними процесами у геосистемах;

– проводити кореляційний, регресійний та дисперсійний аналіз статистичних даних для встановлення взаємозв'язку між явищами та процесами у геосистемах;

– створювати моделі очищення стічних вод та моделі самоочищення річкових вод;

– прогнозувати рівень забруднення атмосферного повітря методом розпізнавання образів;

– створювати моделі стану ґрунту та прогнозувати його зміни під впливом антропогенних факторів;

– розробляти та використовувати моделі популяційної екології;

– прогнозувати зміну температури повітря.

Сутність складних взаємозв'язків у геосистемах, процесів та явищ, які відбуваються в них в умовах функціонування під впливом людської діяльності можна відобразити у формі різноманітних функцій, рівнянь, графіків і т. д. Для вирішення таких задач розроблено чимало методів та створено ряд прикладних програм, таких як *Microsoft Excel*, *Statistica* та *MathCad* тощо, які дають змогу виконувати числові та аналітичні обчислення та є досить простими у використанні.

Метою методичних рекомендацій є ознайомлення здобувачів із аналітичними й чисельними методами розв'язування певних задач в процесі моделювання та прогнозування стану геосистем та формування у студентів навиків використання найпростіших методів обчислення із використанням сучасних інформаційних технологій.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ГЕОСИСТЕМ

Практична робота № 1 Основні характеристики природних систем

Мета: Ознайомитись із основними характеристиками природних систем. Засвоїти їх структурну організацію та основні властивості.

Теоретичний матеріал

Природна система – є сукупністю компонентів (елементів), які перебувають у певних відношеннях та зв'язках між собою та утворюють певну визначену єдність та цілісність.

Усі природні тіла й явища необхідно розглядати як системи. Системою живої матерії також можна уважати й клітину чи окремий орган (наприклад листок рослини) або ж увесь організм (усю рослину), а також і сукупність живих організмів, які звичайно носять назву біогеоценоз чи екосистема. До систем неживої природи відносяться кристали мінералів та асоціація мінералів, гідрографічна сітка тощо.

Кожна із природних систем має такі структурні елементи, як вхід, тіло (сама система) й вихід. Система складається із таких складових, як історія розвитку, організація чи структура, а також здатність функціонувати (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Блок-схема природної системи

Завдання:

1. На основі лекційного матеріалу заповнити таблицю 1.1 та охарактеризувати основні властивості природних систем.

2. Сформулювати висновок до практичної роботи охарактеризувавши поняття природної системи, її будову, властивості та структурну організацію.

Таблиця 1.1

Характеристика основних властивостей природних систем

Властивість	Характеристика
Стійкість	
Саморегуляція	
Еволюціонування	
Емерджентність	

Питання для самоконтролю:

1. Дайте визначення поняттю «природна система».
2. Охарактеризуйте будову природної системи.
3. Назвіть основні властивості природної системи.
4. Наведіть приклади природних систем.
5. Що таке емерджентність природної системи?

Практична робота № 2

Види моделювання та класифікація моделей

Мета: Ознайомитись із основними видами моделювання та класифікацією моделей.

Теоретичний матеріал

Класифікацію моделей та видів моделювання ведуть кількома шляхами:

- за ознаками моделей;
- за ознаками оригіналів;
- за рівнями моделювання (мікросвіт, макросвіт тощо); та іншими ознаками (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Класифікація моделей та видів моделювання

За ознаками моделей розрізняють, у перш у чергу, предметне та знакове моделювання (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Класифікація моделювання

За ознаками моделей		
<i>Предметне</i> – вивчення властивостей оригіналу на конкретній матеріальній моделі, що відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні властивості оригіналу		
аналогове	фізичне	
Засноване на використанні аналогії явищ, що мають різну фізичну природу, але описуються однаковими математичними рівняннями: <i>дослідження законів розвитку популяцій вищих організмів на основі вивчення закономірностей розмноження колоній мікроорганізмів, комах, гризунів тощо</i>	Засноване на вивченні моделі, що має однакову фізичну природу з оригіналом. В основі лежить теорія подібності. Широко застосовується в екології, коли в силу тих чи інших причин не можна проводити експерименти в природних умовах, тоб то на оригіналі. <i>Приклад: застосування терапіумів, акваріумів, штучних басейнів тощо для вивчення закономірностей розвитку популяцій.</i>	
<i>Знакове</i> – моделювання на знакових утвореннях: схемах, графіках, кресленнях, аналітичних формулах, графах, словах і реченнях природних та штучних мов.		
математичне	стохастичне	графічне
здійснюється засобами математики і логіки, у тому числі за допомогою ЕОМ, і призначене для імітації або оптимізації явищ і процесів, що мають детермінований (визначений) характер	базується на застосуванні апарату теорії ймовірності та математичної статистики і використовується для аналізу складних явищ, що мають випадковий характер. Мета: вивчення ймовірнісних характеристик таких явищ	базується на застосуванні різноманітних схем, графіків, креслень для надання моделям наочності

Принципи екологічного моделювання.

При побудові моделей екологічних процесів застосовують наступні основні принципи.

1) *Принцип системності.* Через перенасиченість екосистем різноманітними зв'язками екологічні об'єкти є єдиною системою. З урахуванням цього необхідним є синтез методів системного аналізу та математичного моделювання. Це і призвело до утворення інтегрального методу системного моделювання. Принцип системності заключається в усвідомленні цілісності об'єктів світу, їх стійкості та взаємодії з зовнішнім світом; іншим аспектом даного принципу є динамічна багатогранність, єдність якості та кількості, теорії й практики.

2) *Принцип єдності структурності та ієрархічності.* Фундаментальна риса екосистем — наявність у них складних ієрархічних структур. Звідси випливає вимога єдності структурності й ієрархічності системних екологічних моделей. При цьому виникає проблема структурування моделі, а саме виділення істотних підсистем та елементів із сукупності всіх зв'язків та компонентів. Систему організують найбільш залежні один від одного елементи — підсистеми. Інші елементи впливають на поведінку системи не так сильно.

3) *Принцип багатомодельного опису.*

Внаслідок динамізму та складності екологічних об'єктів, які виникають через множинність антропогенного втручання, на сьогодні відсутня можливість побудови єдиної теорії соціоекосистеми у класичному розумінні, тобто дедуктивної моделі, із якої можна вивести всі можливі наслідки. Саме тому наука розвивається на шляху створення множинних взаємодоповнюючих моделей.

4) *Принцип єдності формалізованого і неформалізованого опису*

Досвід перших глобальних моделей розвитку світової соціоекосистеми, побудованих на замовлення Римського клубу, показав, що для адекватного моделювання соціоекосистеми єдиного формалізованого (математичного) опису недостатньо. З цією метою необхідно враховувати неформальні фактори та доповнювати формалізований опис (з позицій історичного та психологічного й ін. підходів) неформалізованим описом.

5) *Принцип визнання фундаментальності екологічних процесів.*

Екологічні процеси не можна звести до простої сукупності біологічних, фізичних та економічних процесів, адже всі вони тісно переплетені між собою. В даному переплетенні виникають нові екологічні закономірності. Звідси впливає самостійна значимість екологічних цінностей.

б) Принцип єдності теорії й практики.

Благополуччя соціоекосистеми, основною частиною якої є Людина, має для неї найбільш важливіше значення. Саме тому екологія є не лише фундаментальною, але й прикладною наукою, яка поєднує пізнання екологічних закономірностей з практичним їхнім застосуванням в повсякденній діяльності Людини. Ця єдність виражається у формі принципу: «Не тільки дивися і думай — роби». Значення моделювання в екології надзвичайно важливе. За допомогою моделювання одержують можливість оцінювання потенційних наслідків застосування різних стратегій оперативного керування, впливу на екосистему, користування природними ресурсами (біотичними й абіотичними), оптимізації екосистем. Моделювання дозволяє глибоко проникнути в сутність явищ, зрозуміти їхню справжню природу.

Моделі оцінюють за такими параметрами:

а) реалістичність – це ступінь якісної адекватності математичної моделі екологічному об'єкту, що описується нею; тобто ця характеристика показує, наскільки якісні властивості даного математичного твердження відповідають словесному опису екологічного об'єкта;

б) точність – це здатність моделі спрогнозувати кількісні зміни в системі чи відтворювати (імітувати) дані, на яких вона будується;

в) загальність – це діапазон застосовності моделі для опису різних за змістом екологічних об'єктів, явищ і ситуацій.

Класифікація моделей представлена у табл. 2.2.

Завдання:

1. Законспектувати таблицю 2.1 та 2.2 для засвоєння класифікації моделювання та моделей.

2. Сформулювати висновок до практичної роботи охарактеризувавши принципи екологічного моделювання та основні підходи до класифікації моделей та моделювання.

Класифікація моделей

За рівнем формалізації:			
<i>Прості неформалізовані моделі можуть давати тільки якісний прогноз (прогноз тенденцій)</i>			
уявні	словесні	графічні	
<i>Формалізовані знакові моделі – дають кількісний, а тому більш надійний прогноз</i>			
математичні	стохастичні	статистичні	
За способом побудови			
статистичні – засновані на математичній обробці масиву статистичних даних з метою встановлення неперервних інтерполяційних просторово-часових залежностей контрольованих параметрів без виявлення причин тих їх змін, що спостерігаються		балансові – в яких шляхом формалізації явища розраховуються зміни кількості речовини або енергії на виході системи залежно від зміни вхідних параметрів і властивостей самої системи.	
За метою побудови			
імітаційні – метою яких прогнозування змін у системі, спровокованих заданими початковими впливами, або просте споглядання за динамікою розвитку екологічного процесу		оптимізаційні – мета яких визначення оптимальних значень вхідних параметрів системи та необхідних антропогенних впливів, що забезпечують досягнення бажаних змін у системі- прототипі	
За рівнем деталізації умов існування системи			
статичні та стаціонарні моделі (для незмінних у часі умов)	динамічні моделі (для систем, що розвиваються)	моделі з розподіленими параметрами (для систем з неоднорідними умовами існування)	моделі із зосередженими параметрами (для вивчення інтегральних характеристик систем)

Питання для самоконтролю:

1. Охарактеризуйте класифікацію видів моделювання.
2. Назвіть основні напрями за якими класифікують моделі.
3. Наведіть приклад моделей за метою та способом побудови.
4. Охарактеризуйте основні принципи екологічного моделювання.
5. За якими параметрами оцінюють моделі?

Практична робота №3

Прогнозування розвитку антропогенного впливу на геосистеми методом екстраполяції

Мета: Ознайомитись із основами прогнозування методом екстраполяції. Спрогнозувати динаміку викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря методом екстраполяції.

Теоретичний матеріал

Метод екстраполяції полягає у перенесенні результатів досліджень, отриманих у певній галузі діяльності на аналогічні галузі (метод аналогій) або перенесенні ретроспективно отриманої інформації про попередній розвиток об'єкта на його наступний розвиток (метод ретроспективного аналізу і прогнозу).

Недоліком даного методу є обмеженість його філософсько-методологічної основи. А саме: метод ґрунтується на постулатах формальної логіки, коли кожна наступна подія детермінується попередньою, тобто ніби чіпляється за попередню. Як свідчать результати екологічних досліджень динаміку в часі будь-якої складної екосистеми представляється у вигляді зміни станів. Так, наприклад, А.М. Трофімов і М.В. Панасюк висунули геоситуаційну концепцію, суть якої полягає в тому, що природні комплекси еволюціонують від однієї “ситуації” до іншої. Окрім того, слід згадати, що в розвитку екосистем досить часто мають місце біфуркації, з допомогою яких у системному аналізі обґрунтовується непередбачуваність результатів будь-яких випадкових складних процесів. Типовим явищем у розвитку природних об'єктів є й псевдобіфуркації, тобто ефекти, пов'язані із можливим знаходженням екосистеми в одному із двох (кількох) різних станів при одних і тих же ж зовнішніх впливах. І це все відбувається на фоні розвитку суспільного виробництва і зростаючого антропогенного навантаження, яке теж далеко не є простим лінійним процесом. Але не дивлячись на ці недоліки методи екстраполяції застосовуються доволі широко завдяки своїй простоті й очевидності.

Різновидами методу екстраполяції є статистичні методи оцінки наступних значень варіаційного ряду, виходячи з попереднього характеру кривої. Реалізуються вони шляхом продовження існуючої тенденції на перспективний часовий інтервал.

Іноді до екстраполяції відносять також інтерполяцію – тобто пошук проміжних значень варіаційного ряду між відомими її значеннями. Інтерполяція за своїм змістом зводиться до проведення через відомі точки заздалегідь відомих кривих ліній (лінійна, степенева, логарифмічна, експоненціальна, поліноміальна та інші види інтерполяції), а вже на цих лініях для відповідних моментів часу знаходяться конкретні значення досліджуваної ознаки.

Метод екстраполяції застосовують для короткострокових (оперативних) прогнозів, у тому разі, коли розвиток процесів протягом значного проміжку часу відбувається рівномірно, без значних стрибків (флуктуацій і біфуркацій).

Завдання:

1. За даними таблиці 3.1 використовуючи метод екстраполяції спрогнозувати динаміку обсягу викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря промисловим підприємством в 2033 р.

2. На основі проведеного прогнозу зробити висновок про закономірності зміни обсяг викидів забруднюючих речовин підприємством в найближчі 10 років.

Таблиця 3.1

Прогнозування динаміки обсягів викидів забруднюючих речовин

Рік	Обсяг викидів забруднюючих речовин, тис. т	Рік	Обсяг викидів забруднюючих речовин, тис. т
2011	310,5	2023	
2012	333,0	2023	
2013	334,0	2024	
2014	332,5	2025	
2015	333,3	2026	
2016	288,1	2027	
2017	233,8	2028	
2018	240,2	2029	
2019	215,5	2030	
2020	260,3	2031	
2021	240,3	2032	
2022	270,9	2033	

Питання для самоконтролю:

1. Поняття про екологічне прогнозування.
2. Екологічний прогноз: приклади.
3. Класифікація прогнозів.

4. Класифікація методів прогнозування.
5. Характеристика конкретних прикладів прогнозування.
6. Особливості довгострокового та оперативного прогнозування.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2 СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ГЕОСИСТЕМ

Практична робота № 4

Встановлення кореляційного зв'язку між явищами та процесами в геосистемах

Мета: оволодіти навичками проведення кореляційного аналізу екологічних даних.

Теоретичний матеріал

Коефіцієнт кореляції має значення на проміжку $[-1;1]$, тобто $-1 \leq r \leq 1$. Якщо $r > 0$, то зв'язок називається додатним, тобто зі збільшенням значень X значення Y також збільшуються. Якщо $r < 0$, то зв'язок є від'ємним, тобто зі збільшенням значень X значення Y зменшуються.

Якісне оцінювання ступеня зв'язку випадкових величин може виконуватися із використанням коефіцієнта кореляції за шкалою Чеддока (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Шкала Чеддока

Значення коефіцієнта кореляції	Зв'язок
[0,1...0,3)	незначний
[0,3...0,5)	помірний
[0,5...0,7)	істотний
[0,7...0,9)	високий
[0,9...0,99]	дуже високий
1,0	функціональний

1. Алгоритм побудови кореляційної матриці та визначення ступеню взаємозв'язку між досліджуваними параметрами за допомогою використання надбудови «Пакет аналізу»:

1. Експортувати таблицю з даними (табл. 4.2) до програми Excel.

Таблиця 4.2

Дані щодо забруднення атмосферного повітря промислового міста

Пости спостереження	Концентрація поллютантів, мг/мг ³					ІЗА
	пил	діоксид азоту	оксид вуглецю	фенол	формальдегід	
1	0,08	0,04	1,23	0,005	0,003	3,33
2	0,04	0,03	1,8	0,006	0,003	2,06
3	0,03	0,02	1,08	0,006	0,002	1,34
4	0,2	0,03	1,75	0,008	0,004	3,56
5	0,08	0,03	1,42	0,005	0,003	2,50
6	0,05	0,04	1,37	0,006	0,003	1,90
7	0,09	0,04	1,43	0,007	0,003	2,81
8	0,05	0,03	1,11	0,006	0,003	1,55
9	0,04	0,03	1,29	0,005	0,002	1,47
10	0,03	0,04	1,12	0,006	0,002	1,46

2. Налаштувати у програмі Excel надбудову «Пакет аналізу» (рис. 4.1.)

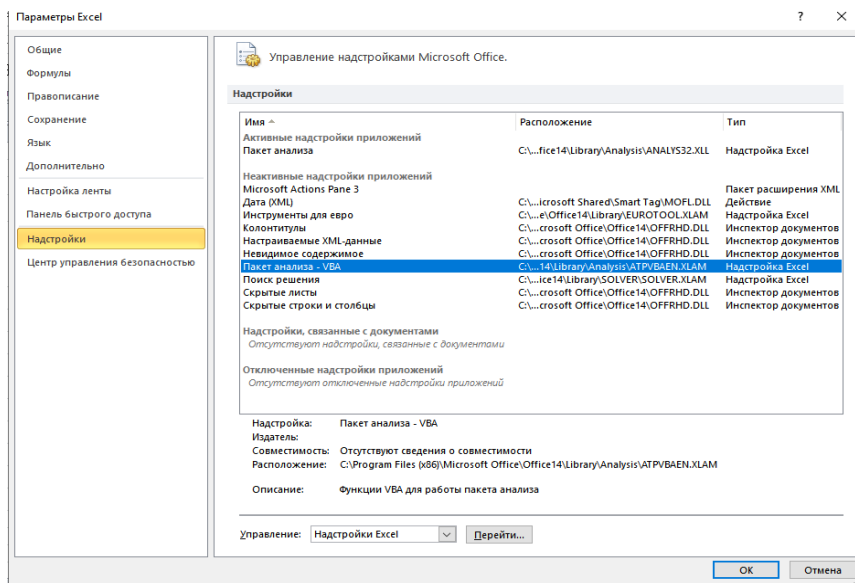


Рисунок 4.1– Активація надбудови «Пакет аналізу» у програмі Excel

3. Для розрахунку матриці кореляції необхідно у вікні «Аналіз даних» виділити пункт «Кореляція» та натиснути «ОК» (рис. 4.2).

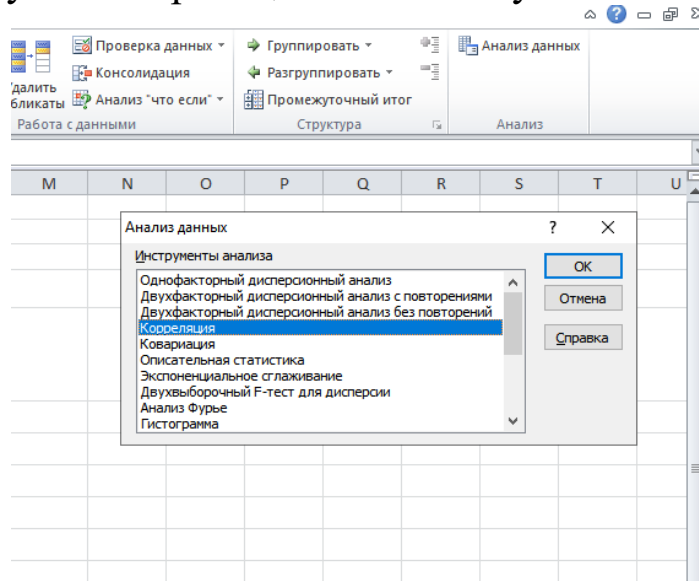


Рисунок 4.2. – Налаштування інструменту «Кореляція»

4. Виділити масив комірок із даними та натиснути кнопку «Ок».

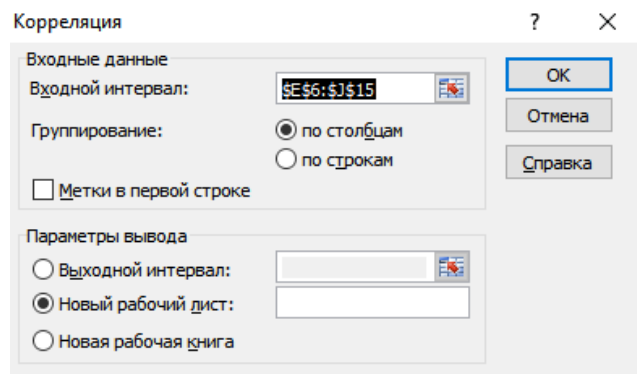


Рисунок 4.3. – Виділення масиву для проведення кореляції

	А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н
1		Столбец 1	Столбец 2	Столбец 3	Столбец 4	Столбец 5	Столбец 6	
2	Столбец 1	1						
3	Столбец 2	0,042069435	1					
4	Столбец 3	0,569662799	-0,006515163	1				
5	Столбец 4	0,671843717	-1,47898E-17	0,46175052	1			
6	Столбец 5	0,702235954	-0,024390244	0,5928798	0,3492151	1		
7	Столбец 6	0,839803098	0,317306395	0,54752633	0,3814958	0,622860702	1	
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								

Рисунок 4.4 – Матриця коефіцієнтів кореляції

5. За даними таблиці 4.2. побудувати графіки зв'язку ІЗА із кожною із забруднюючих речовин за зразком наведеним на рис. 4.5.

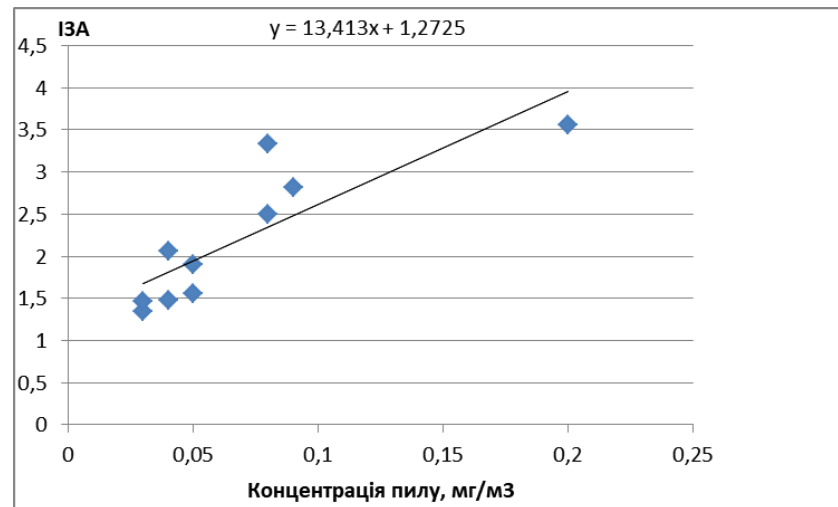


Рисунок 4.5 – Залежність ІЗА від вмісту пилу в атмосферному повітрі

6. Зробити висновок про ступінь зв'язку між показником ІЗА та концентрацією основних забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.

Завдання:

1. За допомогою програми Excel визначити коефіцієнти кореляції між екологічними даними та побудувати матрицю коефіцієнтів кореляції.
2. Побудувати графіки залежності ІЗА (індексу забруднення атмосфери) від концентрації основних забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.
3. На основі розрахованих даних та побудованих графіків встановити ступінь зв'язку між показником ІЗА та концентрацією основних забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.

Питання для самоконтролю:

1. Особливості кореляційно-регресійної моделі.
2. Які існують зв'язки між досліджуваними процесами в екології?
3. Що таке коефіцієнт кореляції?
4. Властивості коефіцієнта кореляції.

Практична робота № 5

Побудова регресійної моделі для вивчення взаємозв'язку між екологічними процесами

Мета: оволодіти навичками побудови регресійної моделі для вивчення взаємозв'язку між екологічними процесами.

Теоретичний матеріал

Регресійний аналіз – це статистичний метод для встановлення та кількісної оцінки зв'язку між залежною змінною та однією або кількома незалежними змінними. Коротко кажучи, він допомагає зрозуміти, як зміни в одній або декількох незалежних змінних пов'язані зі змінами в залежній змінній.

І кореляція, і регресія - це статистичні методи дослідження зв'язку між двома змінними. Вони служать різним цілям і надають різні типи інформації. Кореляція - це міра сили і характеру зв'язку між двома змінними. Вона коливається від -1 до +1, де -1 означає ідеальну негативну кореляцію, 0 - відсутність кореляції, а +1 - ідеальну позитивну кореляцію. Кореляція вказує на ступінь зв'язку між двома змінними, але не вказує на причину або передбачуваність.

З іншого боку, регресія - це метод моделювання зв'язку між двома змінними, як правило, з метою прогнозування або пояснення однієї змінної на основі іншої. Регресійний аналіз дозволяє оцінити розмір і напрямок зв'язку, та перевірити статистичну значимість, довірчі діапазони та спрогнозувати майбутні результати.

Процес побудови регресійної моделі в загальному складається з двох етапів:

- встановлення на основі великої кількості спостережень того, як змінюється в середньому функція Y в залежності від зміни одного або декількох її головних аргументів (іншими словами – визначення форми зв'язку й знаходження рівняння зв'язку двох змінних величин);
- визначення ступеня взаємозв'язку двох досліджуваних явищ (якщо ці явища взаємопов'язані) або ступеню впливу головних

досліджуваних факторів на досліджуваний вплив (якщо ці зв'язки носять причинно-наслідковий характер).

Алгоритм побудови регресійної моделі залежності між двома змінними за допомогою використання надбудови «Пакет аналізу»:

1. Експортувати таблицю з даними (табл. 5.1) до програми Excel.

Таблиця 5.1

Вихідні дані побудови регресійної моделі

Рік	Обсяг викидів забруднюючих речовин, тис. т	Захворюваність на 100 000 жителів
2011	148,9	41730
2012	153,7	46542
2013	149,4	43264
2014	153,7	47581
2015	148,9	43451
2016	142,3	42147
2017	149,9	41250
2018	163,2	45360
2019	165,7	46002
2020	162,3	45998
2021	195,3	49360
2022	198,3	52321

2. Будуємо графік залежності рівня захворюваності населення від обсягу викидів шкідливих речовин в атмосферу. Зазначаємо рівняння регресії та коефіцієнт апроксимації R.

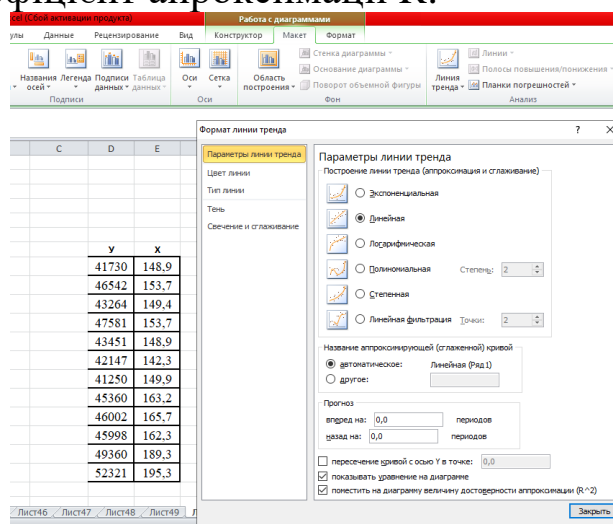


Рисунок 5.1. – Налаштування рівняння регресії та коефіцієнту апроксимації

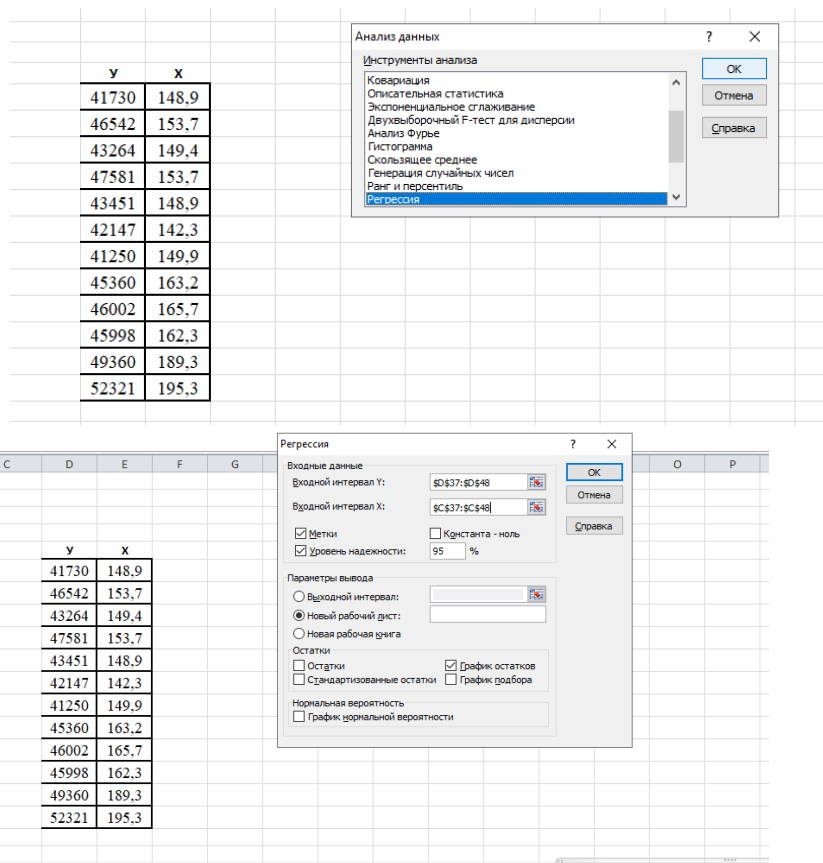


Рисунок 5.2. – Налаштування інструменту «Регресія»

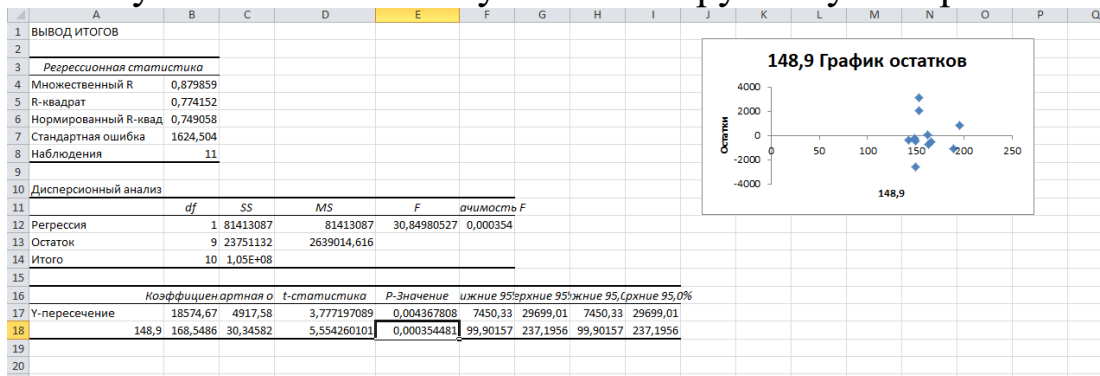


Рисунок 5.3. – Вигляд вікна регресійного аналізу в програмі Excel

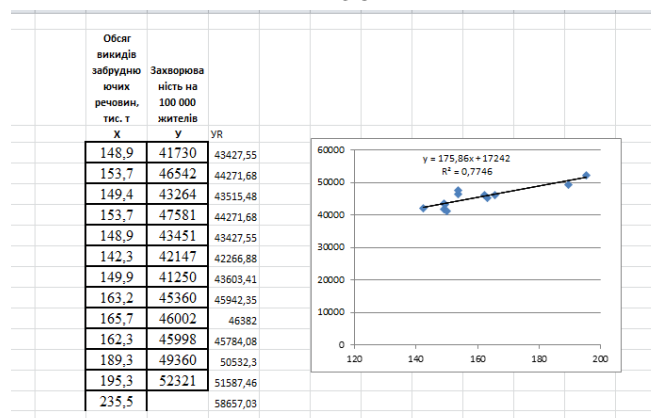


Рисунок 5.4. – Можливість прогнозування на основі регресійної моделі в програмі Excel

Завдання:

1. За допомогою програми Excel побудувати регресійну модель залежності рівня захворювання органів дихання населення від обсягу викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря.
2. Перевірити можливість прогнозування на основі побудованої регресійної моделі.
3. На основі проведеного аналізу сформулювати висновки щодо залежності рівня захворювання органів дихання населення від обсягу викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Обґрунтувати можливість прогнозування на основі побудованої регресійної моделі.

Питання для самоконтролю:

1. Особливості регресійного аналізу.
2. Що таке регресія?
3. Основні відмінності кореляційного та регресійного аналізу.
4. Охарактеризувати основні етапи побудови регресійної моделі.
5. Охарактеризувати практичне значення застосування регресійних моделей.

Практична робота №6

Застосування дисперсійного аналізу для вивчення взаємозв'язку між процесами в геосистемах

Мета: оволодіти навичками проведення дисперсійного аналізу взаємозв'язку між екологічними процесами

Теоретичний матеріал

Екологічні показники залежать від великої кількості зовнішніх та внутрішніх факторів. На сьогодні розроблені спеціальні методи за допомогою яких можна було виділити вплив окремих факторів, а також оцінити їхню відносну роль. Цей метод отримав назву **дисперсійного аналізу**, який допомагає вирішити завдання по вивченню і прогнозу впливу факторів на певні об'єкти. Методологія дисперсій-

ного аналізу розроблена англійським математиком та біологом Р.Фішером. Дисперсійний аналіз дає змогу визначити вплив окремих факторів та їх взаємодію, вплив неврахованих факторів, а також забезпечує можливість оцінити їх як якісні, так і кількісні впливи.

Метод отримав таку назву тому, що у його основі лежить аналіз різноманітності ознак, а показником цієї різноманітності є дисперсія:

Дисперсія = Сума квадратів відхилень/кількість ступенів вільності.

Суть дисперсійного аналізу полягає у вивченні статистичних впливів одного чи декількох факторів на результативну ознаку. Про статистичний вплив можна говорити в тих випадках, коли різні градації фактору неоднаково впливають на ознаку. Ознакою відсутності статистичного впливу фактору є однакова дія різних градацій на ознаку. Статистичний вплив проявляється у відмінностях між середніми арифметичними, варіантами різних груп. Загальний методичний прийом дисперсійного аналізу – це порівняння декількох груп за різноманітністю об'єктів.

Причиною мінливості ознаки є певний фактор або декілька факторів. Фактор – це будь-який вплив (температура, час, хімічна речовина, екологічна ситуація та ін.) або стан організму (стать та вік і т.д.), який може вплинути на мінливість ознаки. Кожен із факторів може мати одне чи декілька значень, що називають градаціями фактора (наприклад, різна температура та різний час дослідження, різні дози речовини, різні генотипи, пори року і т.п.). Наявність декількох градацій фактора – необхідна умова щодо проведення дисперсійного аналізу. Досліджуючи вплив добрив на вміст нітратів у продукції, вивчають дію різних доз добрива і т.д.

При дослідженні впливу одного фактора застосовують *однофакторний дисперсійний аналіз*, а при дослідженні впливу двох факторів – *двофакторний аналіз*, при дослідженні впливу трьох та більше факторів – *трифакторний та багатфакторний дисперсійний аналіз*. В дисперсійному аналізі вивчають три види статистичних впливів, а саме: факторіальний, випадковий та загальний. Вплив досліджуваного фактору – це факторіальний вплив. Але, на ознаку діють не тільки фактори, які організовані дослідником, але й безліч інших, що невра-

ховані експериментатором. Дані фактори називаються випадковими, а їхній вплив випадковим впливом. Чим більш факторіальний вплив різниться від випадкового впливу, тим більш статистично достовірним є дія фактору. Сумарний вплив всіх організованих та неорганізованих факторів називається загальним впливом.

Окремі значення градації фактору заносять в таблицю, в якій окремі варіанти розподілені за групами відповідно до градацій фактору. Така таблиця називається *дисперсійним комплексом*. Якщо у всіх градаціях фактору міститься однакова кількість варіантів, то комплекс називається рівномірним, якщо неоднакова – нерівномірним.

Таблиця 6.1

Загальний вид вихідних даних для однофакторного дисперсійного аналізу

Фактор А	Варіанти	Повторення (градації)			
		I	II	III	k
	1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{1j}
	2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{2j}
	3	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{3j}
	4	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{4j}

При формуванні дисперсійних комплексів необхідно дотримуватись наступних умов: фактори, що діють на ознаку мають бути незалежними, а вибірки мають формуватись в випадковому порядку. Для складання дисперсійного комплексу необхідним є розподілення варіантів за градаціями (повтореннями). Дисперсійний аналіз дає змогу досліджувати як кількісні, так і якісні ознаки.

В мінливості можна виділити три наступні типи варіювання:

- 1) загальне варіювання усіх варіант незалежно від того, у якій групі вони знаходяться навколо загального середнього;
- 2) варіювання групових середніх арифметичних кожного із рівнів для заданого фактору навколо загального середнього арифметичного ;

3) варіювання варіант всередині кожної групи навколо кожного групового середнього арифметичного. Для всіх трьох типів варіювання розраховуються суми квадратів відхилення і дисперсії.

Однофакторний дисперсійний аналіз. В найпростішому випадку таблиця вихідних даних має вигляд, представлений у табл.6.2.

Відносно однофакторних рівномірних комплексів використовують наступну схему алгоритму:

1. Групування даних в таблиці так, щоб градації фактору розміщувались по вертикалі, а варіанти розміщувались по відповідних градаціях фактору. Далі необхідно розрахувати:

а) вибіркові середні значення досліджуваного показника для кожного рівня:

$$M_j = \frac{\sum x_j}{n_j} \quad (6.1)$$

де n_j – обсяг відповідної вибірки ($j = 1, 2, \dots, k$);

б) загальне середнє значення показника для всього комплексу даних:

$$M = \frac{\sum x}{n} \quad (6.2)$$

де n – сумарний обсяг усіх вибірок.

2. Обчислення сум квадратів відхилень:

а) даних від загального середнього – *загальна сума квадратів відхилень*:

$$SS = \sum (x - M)^2 \quad (6.3)$$

б) вибірових середніх для усіх рівнів фактору від загального середнього – факторіальна (міжгрупова) сума квадратів відхилень:

$$SSx = nj \sum (Mj - M)^2 \quad (6.4)$$

в) даних від вибірових середніх, або залишкова (внутрішньогрупова) сума квадратів відхилень

$$SS_R = SS - SS_X \quad (6.5)$$

3. Розрахунок кількості ступенів вільності:

$\gamma = n - 1$ – це для загальної мінливості;

$\gamma_x = k - 1$ – це для факторіальної (міжгрупової) варіації;

$\gamma_R = n - k$ або $\gamma_R = (n-1) - (k-1)$ – це для залишкової внутрішньогрупової) варіації, де k – число градацій (повторень) фактора.

4. Розрахунок дисперсій на основі відношення суми квадратів відхилень до відповідного числа ступенів вільності:

а) факторіальна або між групова дисперсія;

$$\sigma_x^2 = \frac{SS_X}{k-1} \quad (6.6)$$

б) залишкова або внутрішньогрупова дисперсія;

$$\sigma_R^2 = \frac{SS_R}{n-k} \quad (6.7)$$

в) загальна дисперсія для всього комплексу.

$$\sigma^2 = \frac{SS}{n-1} \quad (6.8)$$

5. Обчислення частки впливу досліджуваного фактора:

$$\eta_x^2 = \frac{SS_x}{SS} \quad (6.9)$$

Інших факторів (неврахованих в експерименті):

$$\eta_R^2 = \frac{SS_R}{SS} \quad (6.10)$$

Частки впливу факторів можуть бути подані у процентах.

6. Встановлення достовірності впливу певного фактора на досліджуваний екологічний показник.

$$F = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_R^2}$$

Значення коефіцієнту Фішера порівнюють із $F_{\text{табл}}$ для $p \geq 0,95$, яке знаходять по величині кількості ступенів вільності $\gamma_1 = k-1$ $\gamma_2 = n-k$. Якщо $F > F_{\text{табл}}$, то в такому випадку вплив фактору є статистично істотним (із вказаним рівнем ймовірності). $F_{\text{табл}}$ можна знайти за посиланням

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/1530/1/Tablici.pdf>.

Завдання:

1. Провести дисперсійний аналіз даних щодо накопичення нітратів в овочевій продукції під впливом різних доз добрив (заповнити таблицю 6.3).

2. На основі проведеного дисперсійного аналізу зробити висновок про достовірність впливу доз добрив на накопичення нітратів в овочевій продукції.

Вихідні дані для аналізу.

Таблиця 6.2.

Дослідження впливу доз добрив на накопичення нітратів в овочевій продукції

Дози добрив/Варіанти	Вміст нітратів у головках капусти під дією добрив, мг/кг			
	Без добрив (контроль)	N ₄₅ P ₃₀ K ₄₅	N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	N ₁₃₅ P ₉₀ K ₁₃₅
I	103,8	116,7	140,4	158,5
II	98,3	109,8	131,5	145,4
III	105,5	118,0	140,5	155,8
IV	102,5	114,8	137,5	153,2
НІР ₀₅				15

Таблиця 6.3.

Результати дисперсійного аналізу ($n=16, k=4, n_j=4$)

Джерело мінливості	Сума квадратів відхилень	Кількість ступенів вільності	Дисперсія (σ^2)	Частка впливу (η_2)	Коефіцієнт Фішера
Фактор А	$SS_x - 6178,93$	$k-1 = 3$	$SS_x / k-1$	SS_x / SS	σ^2_x / σ^2_r 114
Невраховані фактори	SS_r	$n-k = 12$	$SS_r / n-k$	SS_r / SS	-
Загальна мінливість	$SS = 6395,20$	$n-1 = 16-1=15$	$SS / n-1$	100 %	-

Питання для самоконтролю:

1. Середня і її характеристики.
2. Варіація та причини, що її зумовлюють.
3. Абсолютні показники варіації.
4. Відносні показники варіації.
5. Дисперсія та її характеристики.
6. Загальна дисперсія, групова дисперсія, міжгрупова дисперсія.
7. Поняття про дисперсійний аналіз.

МОДУЛЬ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ НА ГЕОСИСТЕМИ

Практична робота № 7

Моделювання процесу самоочищення вод річки

Мета: сформулювати у здобувачів уявлення про моделювання процесу самоочищення вод річки, отримати навички розроблення мо-

делі залежності рівня самоочищення вод річки від концентрації поллютантів.

Теоретичні матеріали

Самоочищення природних вод – це сукупність природних гідрологічних та хімічних, біологічних й інших процесів, які протікають в забруднених водних об'єктах та направлені на відновлення первинних складу й властивостей води. На самоочищення впливає багато факторів, серед яких найважливішими є сонячна радіація та діяльність мікроорганізмів, а також водної рослинності. Ефективність самоочищення води, влітку є більш інтенсивним, взимку – більш повільними. Принципову схему самоочищення води у річці відображено на рис. 7.1.

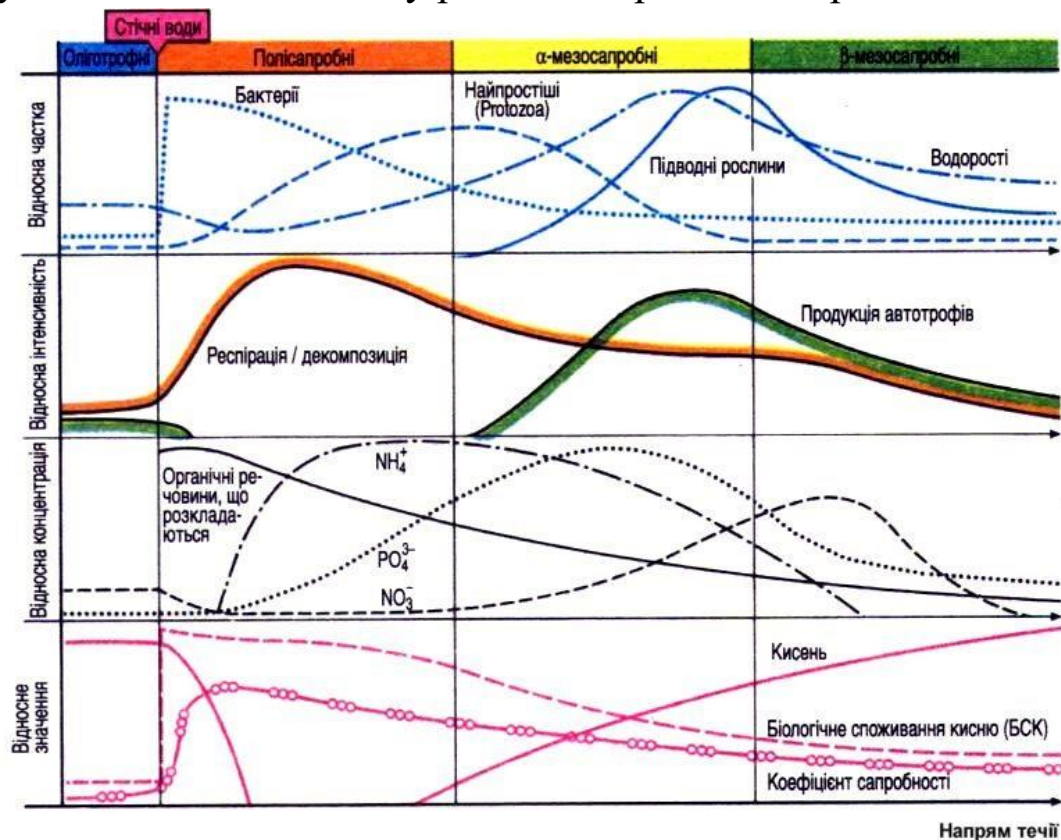


Рисунок 7.1 – Схема самоочищення природних вод

У водотоці відносно інтенсивності самоочищення виділяють такі зони: олігосапробну, полісапробну, α- та β-мезосапробні. Виділяються ці зони відповідно до коефіцієнту сапробності, що розраховують за формулою:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n hsg}{\sum_{i=1}^n hg} \quad (7.1)$$

де h – це частота виду, кількість особин у одній пробі води;

n – це число видів;

s – індекс класу якості води, що становить для олігосапробного класу – 1, β -мезосапробного – 2, α -мезосапробного – 3, полісапробного – 4;

g – це маса-індикатор, що є значенням індексу між 1 та 5.

Математична модель самоочищення поверхневих вод

Рівняння самоочищення води в загальному виражається наступним рівнянням:

$$\frac{dC}{dt} = -kC^N \quad (7.2)$$

де C – це концентрація забруднення;

k – це коефіцієнт самоочищення (швидкість реакції на одиницю концентрації речовин);

N – це порядок реакції.

Якщо $N = 1$, реакція має перший порядок, а це означає, що до неї залучена одна речовина, або ж існує великий надлишок другої речовини. Зазвичай, дана реакція, яка відбувається у аеротенку або ж в річці, що має структуру потоку ідеального перемішування, в такому випадку самоочищення досягається завдяки поступовому розбавленню забруднення води чистою водою. Для рівнинних річок, площа перерізу яких зростає униз за течією за лінійним законом, константу k визначають з інтервалу $(10^{-6}; 10^{-5})$. Модель самоочистки природних вод у такому випадку можна записати в експоненціальній формі та відобразити наступним рівнянням:

$$C = C_0 \exp(-kt) \quad (7.3)$$

Якщо $N = 2$, то відбувається реакція із структурою потоку ідеального витіснення. У такому випадку самоочищення буде відбуватися згідно з гіперболічною залежністю:

$$C = \frac{C_0}{1 + C_0 kt} \quad (7.4)$$

Завдання:

1. Згідно з вихідними даними (табл. 7.1) провести розрахунок параметрів самоочищення річкових вод. Результати розрахунків представити за зразком наведеним у таблиці 7.2 для кожної забруднюючої речовини.

2. За результатами проведених розрахунків побудувати графік зв'язку концентрації кожної забруднюючої речовини та відстані від джерела скидання стічних вод (за зразком представленим на рис. 7.5).

3. Сформулювати висновок зазначивши, які фактори, найбільше впливають на самоочищення річкових вод та в цілому охарактеризувавши залежність концентрації забруднюючої речовини від відстані від скидання стічних вод.

Таблиця 7.1

Концентрація забруднюючих речовин у воді річок м. Харкова

Назва водного об'єкту															
	Завислі речовини, мг/л	pH	Сульфати, мг/л	Хлориди, мг/л	Сухий залишок, мг/л	Амоній сольовий, мг/л	Нітрати, мг/л	Нітриди, мг/л	Фосфати, мг/л	Залізо, мг/л	Мідь, мг/л	Цинк, мг/л	Хром загальний, мг/л	Нікель, мг/л	Нафтопродукти, мг/л
р. Лопань	12,5	7,75	85,3	36,9	325	0,96	6,71	0,29	0,58	0,28	0,05	0,04	0,03	0,04	0,85
р. Харків	30,9	7,58	96,9	52,9	397	3,25	11,1	0,49	0,19	0,23	0,05	0,06	0,05	0,03	0,9

Для проведення розрахунків параметрів самоочищення річкових вод необхідно за формулою (7.3) визначити значення концентрації поліутантів на відстані S , куди із швидкістю v перемістяться води річки за час t . Для розрахунку необхідні додаткові параметри, а саме: швидкість течії р. Лопань і р. Харків $v = 0,3$ м/с; коефіцієнт самоочищення $k = 0,01\text{с}^{-1}$; для розрахунку зміни концентрації час береться із

інтервалу 1-10 діб з кроком 1 доба.

Алгоритм проведення розрахунків:

t, доби	t, секунди S, км	C, мг/л
1	=60*60*24*D6	
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Рисунок 7.2 – Переведення часу в с

t, доби	t, секунди S, км	C, мг/л
1	86400=0,3*E6/1000	
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Рисунок 7.2 – Розрахунок відстані (у км) з урахуванням швидкості та часу

t, доби	t, секунди S, км	kt	exp(-kt)	C, мг/л
1	86400	25,92	-0,01=EXP(G6)	
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Рисунок 7.3 – Проміжні розрахунки

t, доби	t, секунди S, км	kt	exp(-kt)	C, мг/л
1	86400	25,92	-0,01	0,9900498=12,5*H6
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Рисунок 7.4 – Розрахунок концентрації завислих речовин на певній відстані від місця скиду стічних

Результати розрахунку самоочищення вод річки від завислих речовин

t, доби	t, секунди	S, км	kt	$exp(-kt)$	C, мг/л
1	86400	25,92	-0,01	0,9900498	12,38
2	172800	51,84	-0,02	0,9801987	12,25
3	259200	77,76	-0,03	0,9704455	12,13
4	345600	103,68	-0,04	0,9607894	12,01
5	432000	129,60	-0,05	0,9512294	11,89
6	518400	155,52	-0,06	0,9417645	11,77
7	604800	181,44	-0,07	0,9323938	11,65
8	691200	207,36	-0,08	0,9231163	11,54
9	777600	233,28	-0,09	0,9139312	11,42
10	864000	259,20	-0,1	0,9048374	11,31

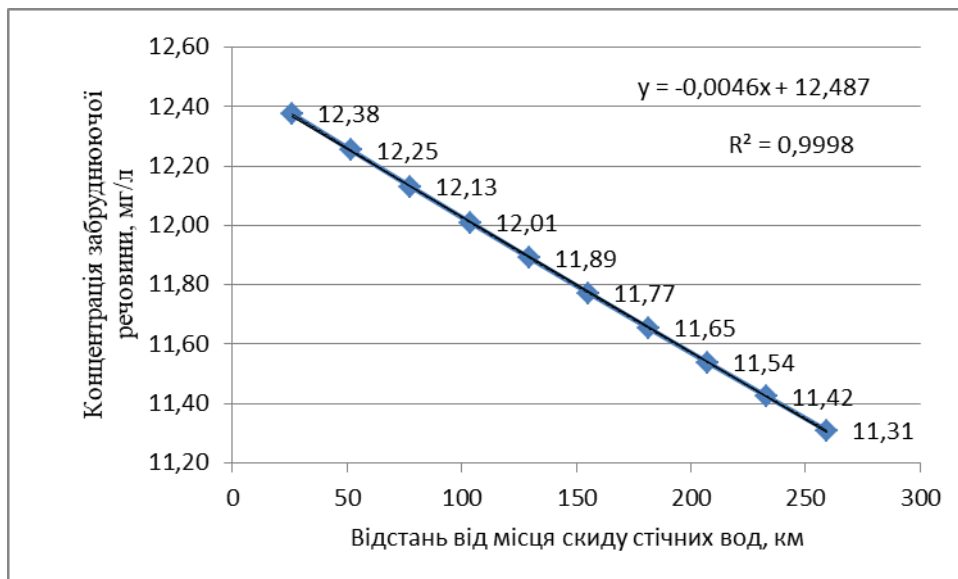


Рисунок 7.5. – Приклад графіку залежності концентрації поллютанта від відстані від місця скиду стічних вод

Питання для самоконтролю:

1. Як ви розумієте поняття «самоочищенням природних вод»?
2. Від дії яких факторів залежить ефективність самоочищення природних вод?
3. Які зони виділяють у водотоці відносно інтенсивності самоочищення природних вод?
4. Охарактеризуйте основні етапи розрахунку параметрів самоочищення річкових вод.
5. Охарактеризуйте залежність зміни концентрації забруднюючих речовин від відстані від місця скиду стічних вод.

Практична робота № 8

Моделювання процесу біологічного очищення стічних вод в біореакторах

Мета: ознайомитись з особливостями моделювання процесу біологічного очищення стічних вод; сформувати навички побудови імітаційної моделі процесу роботи очисних споруд для найбільш ефективного очищення стічних вод.

Теоретичний матеріал

Біологічна очистка стічних вод полягає у тому, що під впливом мікроорганізмів забруднюючі речовини трансформуються в неорганічні, які або осідають на дні реакторів, або ж засвоюються фітопланктоном та іншими гідробіонтами. Швидкість цього очищення залежить від величини біомаси мікроорганізмів та швидкості руху стічних вод, часу перебування забрудненого стоку в аеротенках та біологічних ставках, концентрації і хімічного складу поллютантів, які впливають на біомасу мікроорганізмів. Якщо в біореакторі процес стабілізувався, то концентрація забруднюючих речовин у кожній точці споруди не буде змінюватись впродовж всього часу спостережень. Однак вздовж біореактора за напрямом руху стічних вод концентрація забруднюючих речовин зменшується, й на виході із очисних споруд вона набуває найменшого значення. Чим більше часу стічні води знаходяться в біореакторі, тим більш краще вони очистяться. Час перебування стічних вод в біореакторі залежить від швидкості, з якою вони течуть в ньому. При меншій швидкості руху води в біореакторі, відбувається ефективніше очищення. Однак, у сучасних економічних умовах, необхідно підібрати оптимальні параметри швидкості для досягнення максимально економічно вигідного ефекту. Оптимальна швидкість вважається такою при якій концентрація забруднюючих речовин на виході не перевищує заданої граничне допустимої концентрації. А також при цьому гарантуватиметься очищення всього об'єму стічних вод міста, з урахуванням коефіцієнта часової нерівномірності, ймовірності виникнення аварій та інших факторів екологічної безпеки водокористування та водовідведення. Саме для цього застосовують методи імітаційного моделювання процесу роботи очисних споруд.

Загальне рівняння масопереносу домішок у рухомому розчині з урахуванням кінетики реакції перетворення (самоочищення) забруднюючих речовин виглядає наступним чином:

$$D \frac{d^2 c}{dx^2} - V_x \frac{dc}{dx} - \gamma(x, t, T, c)c = \frac{dc}{dt} \quad (8.1)$$

де $c(x, t)$ – це концентрація забруднюючих речовин;

D – це коефіцієнт молекулярної дифузії;

V_x – це швидкість руху розчину (стічних вод);

$\gamma(x, t, T, c)$ – це функція, що описує кінетику біологічного самоочищення;

t – це час в добах.

Для моделювання біологічного очищення стічних вод в біореакторах застосовують наступне рівняння:

$$V_x \frac{dc}{dx} = -\gamma(x, t, T, c)c \quad (8.2)$$

Коефіцієнт швидкості очищення при сталій температурі визначають згідно з формулою:

$$\gamma(x, t) = \gamma_{\max} + (\gamma_{\min} - \gamma_{\max})e^{-\frac{t}{\mu}} \quad (8.3)$$

де коефіцієнти γ_{\min} , γ_{\max} і μ визначають при верифікації моделі на основі даних натурних спостережень.

До коефіцієнта швидкості біологічної очистки стічних вод γ висувуються дві основні умови:

$$\gamma(0) = \gamma_{\min} \quad \text{і} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \gamma = \gamma_{\max} \quad (8.4)$$

Відповідно до цих умов швидкість очищення стічних вод не може збільшуватись необмежено, вона обмежена асимптотою γ_{\max} .

Перед початком розв'язання диференціального рівняння необхідно ввести початкову умову:

$$c(0) = c_{cm} \quad (8.5)$$

де c_{cm} – концентрація стічних вод, що надходять до реактора.

З урахуванням вище зазначеного, математичну модель біологічного очищення стічних вод в біореакторі має такий вигляд:

$$V_x \frac{dc}{dx} = - \left[\gamma_{\max} + (\gamma_{\min} - \gamma_{\max}) e^{-\frac{t}{\mu}} \right] c \quad (8.6)$$

$$c|_{x=0(t=0)} = c(0) = c_{cm} \quad (8.7)$$

$$\frac{dc}{dt} = - \left[\gamma_{\max} + (\gamma_{\min} - \gamma_{\max}) e^{-\frac{t}{\mu}} \right] c \quad (8.8)$$

$$c(0) = c_{cm} \quad (8.9)$$

Математичну модель біологічного очищення стічних вод також можна представити у вигляді рівняння Міхаеліса-Ментен:

$$\gamma(t, c, B) = \frac{\gamma_{\max}(t + c + B)}{\gamma_m + (t + c + B)} \quad (8.10)$$

де γ_m – це стала Міхаеліса, яка дорівнює такому значенню часу, при якому швидкість протікання реакції (споживання субстрату) дорівнює половині максимальної, тобто задовольняє наступну умову:

$$\gamma = \frac{1}{2} \gamma_{\max} \quad (8.11)$$

а B – це біомаса мікроорганізмів.

Модель біологічного очищення стічних вод також представляють у вигляді логістичного рівняння трофічної функції:

$$\gamma(t, c, B) = \frac{\gamma_{\min} \gamma_{\max}}{\gamma_{\min} + (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) e^{-r(t+c+B)}} \quad (8.12)$$

Провівши відповідні розрахунки знаходять функцію, яка мо-

делює динаміку концентрації забруднюючої речовини в процесі біологічної очистки:

$$c(t) = c_{cm} \exp \left[(\mu(\gamma_{\min} - \gamma_{\max}) \left(e^{-\frac{t}{\mu}} - 1 \right) - \gamma_{\max} t) \right], \quad t = \frac{x}{V_x} \quad (8.13)$$

З метою спрощення моделі вважають, що $\gamma_{\min} = 0$, $\mu = m$. Тоді отримують наступну формулу для розрахунку концентрації забруднень в стічних водах, яка рухаються в аеротенку зі швидкістю V_x :

$$c(t) = c_{cm} \exp \left\{ \gamma_{\max} \left[m \left(1 - e^{-\frac{t}{m}} \right) - t \right] \right\}, \quad t = \frac{x}{V_x} \quad (8.14)$$

Параметри моделі $m = 10$, $\gamma = 0,1$.

Завдання:

1. Здійснити моделювання динаміки ефективності очищення стічних стоків від забруднюючих речовин в аеротенку за умови різних швидкостей руху. Результати моделювання представити за зразком наведеним у таблиці 8.1. Вихідні дані для розрахунків представлено в табл. 8.2. Обґрунтувати найбільш оптимальну швидкість очищення стічних вод.

2. Побудувати графіки зниження концентрації забруднюючих речовин на різних етапах очищення при різних швидкостях ($v = 1,25$ м/с, $v = 2,5$ м/с, $v = 5$ м/с, $v = 7,5$ м/с) за зразком наведеним на рис. 8.2.

3. Сформулювати висновки, зазначивши особливості зміни концентрації забруднюючих речовин на різних етапах очистки за збільшення швидкості руху води; вказавши оптимальну швидкість руху стічних вод, що забезпечує дотримання нормативу ГДК по конкретній речовині (при $x = 100$).

Таблиця 8.1

Результати розрахунку залежності концентрації завислих речовин від швидкості руху води в аеротенку

x	$-\frac{x}{vm}$	$exp\left(-\frac{x}{vm}\right)$	$1-exp\left(-\frac{x}{vm}\right) = a$	am	$am - \frac{x}{v} = b$	γb	$exp(\gamma b)$	$c = c_{cm}exp(\gamma b)$
			a	am	b	γb	$exp(\gamma b)$	c
$v = 1,25 \text{ м/с, } m = 10, j = 0,1$								
25	-2	0,135	0,865	8,647	-11,353	-1,135	0,321314372	68,311
50	-4	0,018	0,982	9,817	-30,183	-9,055	0,000116812	0,025
75	-6	0,002	0,998	9,975	-50,025	-15,007	0,000000304	0,000
100	-8	0,000	1,000	9,997	-70,003	-21,001	0,000000001	0,000
$v = 2,5 \text{ м/с, } m = 10, j = 0,1$								
25	-1	0,368	0,632	6,321	-3,679	-0,368	0,6922	147,162
50	-2	0,135	0,865	8,647	-11,353	-1,135	0,3213	68,311
75	-3	0,050	0,950	9,502	-20,498	-2,050	0,1288	27,375
100	-4	0,018	0,982	9,817	-30,183	-3,018	0,0489	10,393
$v = 5 \text{ м/с, } m = 10, j = 0,1$								
25	-0,5	0,6065	0,3935	3,9347	-1,0653	-0,1065	0,8989	191,116
50	-1	0,3679	0,6321	6,3212	-3,6788	-0,3679	0,6922	147,162
75	-1,5	0,2231	0,7769	7,7687	-7,2313	-0,7231	0,4852	103,160
100	-2	0,1353	0,8647	8,6466	-11,3534	-1,1353	0,3213	68,311
$v = 7,5 \text{ м/с, } m = 10, j = 0,1$								
25	-0,3	0,7165	0,2835	2,8347	-0,7367	-0,0737	0,9290	197,500
50	-0,7	0,5134	0,4866	4,8658	-2,2770	-0,2277	0,7964	169,306
75	-1,0	0,3679	0,6321	6,3212	-4,3931	-0,4393	0,6445	137,017
100	-1,3	0,2636	0,7364	7,3640	-6,9217	-0,6922	0,5005	106,404

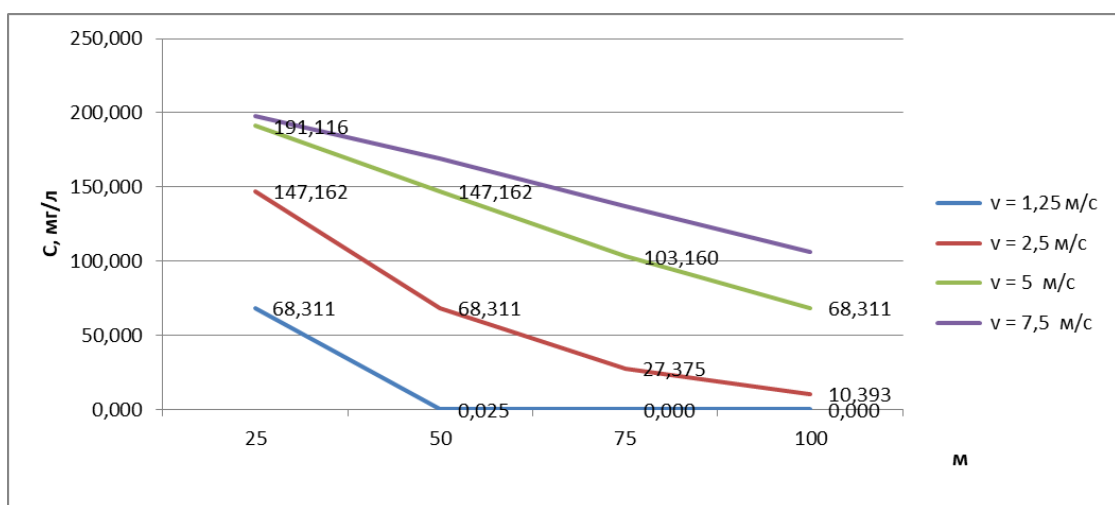


Рисунок 8.2 – Графік зниження концентрації завислих речовин при різних швидкостях

Таблиця 8.2

Вихідні дані вмісту забруднюючих речовин у стічних водах, що надходять для очищення на КБО «Диканівський»

Найменування показників	Одиниці виміру	Величина показників, мг/л
рН	од. рН	8,5
ХСК	мгО ₂ /л	452,3
БСК ₅	мгО ₂ /л	285,3
Завислі речовини	мг/л	290,2
Нафта і нафтопродукти	мг/л	4,8
Жири	мг/л	5,4
Азот амонійний	мг/л	14,3
Нітрити	мг/л	2,5
Нітрати	мг/л	23,2
Сульфати	мг/л	250
Хлориди	мг/л	150
Фосфати	мг/л	3,0
Сульфіди	мг/л	0,09
(СПАР)	мг/л	0,3
Фенол	мг/л	0,025
Залізо (загальне)	мг/л	1,5
Мідь	мг/л	0,09
Хром ³⁺	мг/л	0,12
Хром ⁶⁺	мг/л	0,10
Цинк	мг/л	0,2
Нікель	мг/л	0,1

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягає суть біологічного очищення стічних вод.
2. Від дії яких факторів залежить ефективність очистки стічних вод.
3. Поясніть залежність ефективності очищення від швидкості руху води
4. Охарактеризуйте основні етапи моделювання очищення стічних вод.

Практична робота № 9

Моделювання забруднення атмосфери від одиночного джерела

Мета: засвоїти теоретичні положення моделювання забруднення атмосферного повітря від одиночного джерела, сформулювати навички аналізу розподілу концентрації шкідливих речовин на контрольованому майданчику.

Теоретичний матеріал

Для розробки науково-обґрунтованих програм планування заходів щодо скорочення викидів від певних джерел забруднення, оцінки екологічної досконалості певної технології, впровадження методів та засобів контролю управління якістю атмосферного повітря не обхідним є дослідження закономірностей розповсюдження домішок і обов'язково математичне моделювання процесу перенесення та дифузії домішок. Основними напрямками таких досліджень розповсюдження домішок є: математичний опис розповсюдження шкідливої речовини за допомогою вирішення рівняння турбулентної дифузії й емпірично-статистичний аналіз процесів забруднення довкілля.

Для того щоб побудувати моделі забруднення атмосферного повітря необхідно знати інформацію щодо параметрів джерел, середовища та граничні нормативи.

Основними параметрами джерела є:

- температура;
- швидкість виділення забруднюючих речовин;
- тип джерела (точковий або лінійний або поверхневий);
- характер роботи джерела (миттєвий або безперервний);
- властивості палюючого, його хімічна активність.

Параметри середовища наступні:

- градієнт температури ($-dt/dz$);
- напрямок та швидкість вітру;
- хмарність та опади;
- швидкість падіння температури та тиску;
- значення фонових концентрацій домішок.

Параметри граничних умов – це властивості поверхні (шорсткість та топографія), висота інверсії та ін.

Використання теорії атмосферної дифузії дає змогу дослідити розповсюдження домішок забруднюючих речовин при різних характеристиках середовища і джерел забруднення, а також дозволяє використовувати параметри турбулентного обміну. Моделі, одержані на основі теорії дифузії, характеризуються теоретичною та практичною цінністю при дослідженні процесів розповсюдження поллютантів. Однак їх практичне використання може бути ускладнене через неоднорідність поля концентрації.

В загальному випадку завдання прогнозу забруднення повітряного басейну може бути визначене як вирішення при певних початкових та граничних умовах наступного диференціального рівняння 9.1:

$$\left[\frac{dq}{dt} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{dq}{dx_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{dq}{dx_i} k_i \frac{dq}{dx_i} - aq \right] \quad (9.1)$$

де t – це час; $\delta = (x_1, x_2, x_3) \in \Omega$, $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ – це просторова область; $q(t, \delta)$ – це концентрація поллютанта в точці; $u = (u_1, u_2, u_3)$ – це вектор швидкості вітру; k – це тензор коефіцієнтів турбулентної дифузії; a – це інтенсивність поглинання забруднюючої речовини.

Рівнянням (9.1) описується просторовий розподіл середніх концентрацій, а також їхня зміна з часом. Саме тому воно може розглядатися як прогностичне рівняння. У декартовій системі координат вісі x_1 та x_2 , розташовані в горизонтальній площині, позначаються через x і y , а вертикальна вісь x_3 – через z ; виходячи з цього $u_1 = u$, $u_2 = v$, $u_3 = w$; $k_1 = k_x$, $k_2 = k_y$, $k_3 = k_z$.

При вирішенні практичних задач вид рівняння (1) може спрощуватись. А саме, якщо вісь x є орієнтованою в напрямку середньої швидкості вітру, тоді $v = 0$. Вертикальний рух в атмосферному повітрі над горизонтальною однорідною підстилаючою поверхнею є незначним і його практично можна приймати $w = 0$ у разі легкої домішки, яка не має власної швидкості переміщення. У випадку наявності важкої домішки, w є швидкістю осадження (що входить в рівняння зі знаком $-$). У випадку наявності вітру можна знівелювати член k_x , який враховує дифузію по осі x , адже в цьому напрямку дифузійний потік поллютанта є значно меншим адвективного.

Зміни концентрацій в повітряному басейні з часом мають звичай квазістаціонарний характер тому часто можна виключити не-

стаціонарний член, прирівнявши його до нуля, тільки за умови, що коефіцієнти рівняння (9.1) – відомі функції часу t . В такому випадку, вихідне прогностичне рівняння (9.1) спрощується і має наступний вигляд:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + U \frac{\partial q}{\partial x} + V \frac{\partial q}{\partial y} + W \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q}{\partial z} - \alpha q \quad (9.2)$$

де q – це концентрація домішки;

t – це час;

u, v, w – це середні швидкості пересування домішки у напрямках x, y, z ;

K_x, K_y, K_z – це коефіцієнти турбулентного обміну в напрямках x, y, z ;

α – це коефіцієнт, який пропорційний самовільному зменшенню концентрації домішки.

При вирішенні практичних завдань вид рівняння [9.1] спрощується. При наявності легкої домішки й домішки, яка не змінюється із часом ($w=a=0$), за умови якщо u та k_z задані ступеневими (n – це показник ступеню) функціями від z , вирішення рівняння турбулентної дифузії виконують аналітично, в такому випадку наземну концентрацію при $z = 0$ визначається за формулою:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot (1+n) \cdot k_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot k_0 \cdot X}} \cdot \exp \left[-\frac{U_1 \cdot H^{1+n}}{(1+n)^2 \cdot k_1 \cdot X} - \frac{Y^2}{4 \cdot k_0 \cdot X} \right]$$

де Q – це потужність викиду;

U_1 – це швидкість вітру;

k_0, k_1 – це коефіцієнти турбулентної дифузії;

X, Y – це координати розрахункової точки.

Завдання:

1. Відповідно до вихідних даних розрахувати концентрацію забруднюючої речовини у вузлах сітки, яка покриває заданий майданчик. Результати розрахунків представити у вигляді таблиць 9.2, 9.3, 9.4 та 9.5

2. За результатами проведених розрахунків побудувати

графіки залежності концентрації поллютанта від відстані до джерела за обома координатами.

3. Сформувати висновок проаналізувавши розподіл концентрації забруднюючої речовини на контрольованому майданчику

Таблиця 9.1

Вихідні дані для розрахунку концентрації шкідливих речовин, які викидається в повітряний басейн точковим джерелом

Показник	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5	Варіант 6	Варіант 8	Варіант 9	Варіант 10
Q, мг/с	800	850	900	860	870	885	825	840	855
U ₁ , м/с	3	4	2,5	3	3,5	3,6	3,8	4	4
H ₁ , м	10	10	10	10	10	10	10	10	10
H ₂ , м	30	30	30	30	30	30	30	30	30
n ₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1
k ₁	10	10	10	10	10	10	10	10	10
k ₀	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Значення координат розрахункових точок прямокутника, стосовно точки розміщення одиночного джерела наступні: Y= [±100; ±50; ± 20; 0]; X= [20; 50; 100; 200; 500; 1000].

Таблиця 9.2

Результати розрахунку концентрацій забруднюючої речовини в атмосферному повітрі у вузлах сітки, при H₁=10 та n=0

X/Y	-100	-50	-20	0	20	50	100
20							
50							
100							
200							
500							
1000							

Таблиця 9.3

Результати розрахунку концентрацій забруднюючої речовини в атмосферному повітрі у вузлах сітки, при $H_1=10$ та $n=1$

X/Y	-100	-50	-20	0	20	50	100
20							
50							
100							
200							
500							
1000							

Таблиця 9.4

Результати розрахунку концентрацій забруднюючої речовини в атмосферному повітрі у вузлах сітки, при $H_1=30$ та $n=0$

X/Y	-100	-50	-20	0	20	50	100
20							
50							
100							
200							
500							
1000							

Таблиця 9.5

Результати розрахунку концентрацій забруднюючої речовини в атмосферному повітрі у вузлах сітки, при $H_1=30$ та $n=1$

X/Y	-100	-50	-20	0	20	50	100
20							
50							
100							
200							
500							
1000							

Питання для самоконтролю:

1. Охарактеризуйте основні напрямки прогнозу забруднення навколишнього середовища.
2. Охарактеризуйте основні параметри для побудови моделі забруднення повітряного басейну.
3. Охарактеризуйте основні етапи процесу побудови моделі забруднення атмосферного повітря.
4. Назвіть основні вимоги до моделей забруднення атмосферного повітря.
5. Як класифікують існуючі моделі прогнозування забруднення атмосферного повітря.

Практична робота № 10

Прогнозування рівня забруднення атмосфери методом розпізнавання образів

Мета: сформувати навички прогнозування фонового забруднення атмосферного повітря в містах.

Теоретичний матеріал

Прогнозування фонового забруднення атмосферного повітря в містах є важливим напрямом прогнозування якості довкілля. Для оцінки ступеню забруднення атмосферного повітря міста використовуються різні узагальнені показники. Один із найбільш простих показників забруднення є нормована (безрозмірна) концентрація забруднюючих \bar{q}^* , яка є усередненою для всього міста і за всіма термінами спостережень:

$$\bar{q}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q_i} \quad (9.1)$$

де q_i – це середня концентрація поллютанта за день в i -тому пункті;

\bar{q}_i – це середньосезонна концентрація забруднюючої речовини у тому же пункті;

N – це кількість стаціонарних пунктів спостережень за станом

повітряного басейну в місті.

Окрім того як показник забруднення повітряного басейну застосовують коефіцієнт при першому члені розкладання концентрації забруднюючих речовин за природними ортогональними функціях (п.о. ф.):

$$a_1 = \sum_{i=1}^N \varphi_{1i} q'_i \quad (9.2)$$

де φ_{1i} – це компоненти першої п.о. ф.;

$q'_i = q_i - \bar{q}_i$ – це відхилення концентрації поллютанта від її середнього значення в i -тому пункті.

Коефіцієнт a_1 відображає одночасне зростання чи зменшення концентрації поллютанта у всьому місті.

Найбільшого розповсюдження є показник фонового забруднення міста – параметр P :

$$P = m / n \quad (9.3)$$

де n – це загальне число спостережень за концентрацією домішок в місті впродовж одного дня на усіх стаціонарних пунктах;

m – це кількість спостережень за концентрацією, яка перевищує середнє сезонне значення більше ніж в 1,5 рази ($q_i > 1,5 \bar{q}_i$).

Параметр P є тісно зв'язаним із коефіцієнтом a_1 та нормованим середнім значенням \bar{q}^* .

При оперативному розрахунку P орієнтуються на середні значення \bar{q}_i за відповідний сезон попереднього року та попередній місяць даного року.

Для багатьох міст значення параметру P можна розраховувати для сукупності забруднюючих речовин. При цьому слід лише виключити ті специфічні забруднюючі речовини, які надходять в атмосферне повітря із чітко виражених джерел забруднення.

Згідно із значенням параметру P виділяють три рівні забруднення атмосферного повітря у місті, а саме:

високий (I група) – при $P > 0,35$;

підвищений (II група) – при $0,20 < P \leq 0,35$;

знижений (III група) – при $P \leq 0,20$.

Формування високого рівня забруднення ($P > 0,35$) відбувається при наступних метеорологічних умовах:

- вночі чи вранці цього дня вітер дуже слабкий (до 1 м/с) або штиль, напередодні спостерігалось підвищене значення $P : P' > 0,3$;
- вдень штиль чи дуже слабкий вітер, напередодні $P' > 0,15$;
- за слабого вітру (до 5 м/с) вранці відносно висока температура повітря, напередодні $P' > 0,3$;
- за помірного (3-6 м/с) вітру та нестійкої стратифікації атмосфери вдень, увечері відбувається зміна на штиль, а напередодні значення $P' > 0,15$;
- напередодні значення $P' > 0,4$, а на наступний день не очікується підвищення вітру або випадання значної кількості опадів;
- при дуже слабкому вітрі (до 1 м/с) спостерігається туман чи припіднята інверсія.

Достовірність кожної із цих ознак (предикторів) становить 60-70 %.

Формування зниженого рівня забруднення формується при наступних метеорологічних умовах:

- швидкість вітру вище 5-6 м/с;
- помірний чи сильний дощ;
- в другій половині дня напередодні значення $P' < 0,15$.

Достовірність прогнозу в такому випадку складає 70—90 %.

Формування високого рівня забруднення спостерігається у центральних частинах стаціонарних антициклонів, в малоградієнтних баричних полях за адвекції тепла у тропосфері, в західних та північно-західних частинах малорухомих антициклонів, в теплих секторах циклонів за малих значеннях градієнта тиску.

Знижене забруднення характерне за активної циклонічної діяльності, за великих значень градієнта тиску.

Для проведення наукових досліджень в галузі охорони атмосферного повітря широко застосовується метод розпізнавання образів. Його суть полягає у визначенні ступеню близькості конкретної атмосферно-екологічної ситуації до зазначених вище рівнів забруднення. З цією метою для кожного із рівнів забруднення визначають середнє значення \bar{x} та середнє квадратичне відхилення σ_x наступних предикторів: швидкості вітру на висоті 10 м (u_{10}) та 500 м (u_{500}), різниці температур повітря ($\Delta T = T_0 - T_{500}$) біля земної поверхні T_0 і на висоті 500 м T_{500} , самої приземної температури T_0 на висоті 2 м та параметра

P' у попередній день. Далі розраховуються величини, які характеризують близькість конкретної атмосферно-екологічної ситуації до середнього стану j -того рівня забруднення атмосфери, $j = I, II, III$:

$$\rho_j^2 = \sum_{k=1}^5 \frac{x_k - \bar{x}_{kj}}{\sigma_{x_k}} \quad (9.4)$$

де $x_1 = u_{10}$, $x_2 = u_{500}$, $x_3 = \Delta T$, $x_4 = T_0$, $x_5 = P$;

\bar{x}_{kj} – середні значення величини x_k при j -тому рівні забруднення, σ_{x_k} – середньоквадратичні відхилення величини x_k при тому j -тому рівні забруднення.

Результати розрахунку середніх значень та середньоквадратичних відхилень предикторів оформляють у вигляді таблиці 10.1.

Забруднення атмосферного повітря тим вище, чим меншою є швидкість вітру біля земної поверхні та на висоті 500 м, більша (за модулем) різниця ΔT , та нижча приземна температура повітря T_0 , а також вищим є рівень забруднення P в попередній день.

Для прогнозу фонового забруднення атмосфери способом розпізнавання образів необхідно на підставі фактичних даних про предиктори x_k згідно з формулою (4) розрахувати величину ρ_j^2 для декількох варіантів (зазвичай, не менше 3). Отриману конкретну ситуацію відносять до того рівня, для якого величина ρ^2 є найменшою.

Завдання:

1. За вихідними даними (табл. 10.1) спрогнозувати рівень забруднення атмосферного повітря в місті методом розпізнавання образів.

2. Сформулювати висновки, обґрунтувавши який рівень забруднення атмосфери характерний для заданої атмосферно-екологічної ситуації; які саме фактори мають вплив на рівень забруднення повітряного басейну.

Таблиця 10.1.

Середні значення та середньоквадратичні відхилення метеорологічних елементів улітку для різних рівнів забруднення

Рівні забруднення	Середні значення					Середньоквадратичні відхилення				
	u_{10} , м/с	u_{500} , м/с	ΔT , °C	T_0 , °C	P'	u_{10} , м/с	u_{500} , м/с	ΔT , °C	T_0 , °C	P'
Високий (I)	1,8	6,3	2,6	23,5	0,38	2,6	3,4	4,2	8,0	0,09
Підвищений (I)	2,1	8,9	3,2	22,5	0,22	2,4	4,8	3,8	9,8	0,08
Знижений (III)	6,5	13,3	3,7	24,3	0,17	2,0	4,6	3,5	11,3	0,07

Таблиця 10.2

Вихідні дані для розрахунків

Варіанти	$u_{10}, \text{ м/с}$	$u_{500}, \text{ м/с}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	P'
1	1,56	4,03	0,02	19	0,14
2	1,86	4,12	3,16	22	0,17
3	1,95	4,23	2,13	20	0,2
4	1,95	4,32	2,85	25	0,23
5	1,86	4,43	2,55	23	0,26
6	1,86	4,52	2,25	22	0,29
7	1,86	4,63	1,95	21	0,32
8	0,06	4,72	1,65	26	0,35
9	2,08	4,83	1,35	24	0,27
10	1,55	4,92	3,66	25	0,1
11	1,03	5,05	2,06	20	0,22
12	0,33	9,18	4,08	26	0,13
13	0,65	3,92	3,55	24	0,2
14	0,05	7,12	3,03	23	0,2
15	0,03	7,82	2,49	22	0,23
16	3,27	4,1	0,83	18	0,26
17	0,86	8,22	1,67	19	0,29
18	0,18	6,95	2,65	21	0,32
19	1,6	5,71	1,95	18	0,29
20	1,37	6,95	2,03	19	0,18

Питання для самоконтролю:

1. Загальні особливості прогнозу фонових забруднень атмосферного повітря в містах.
2. Охарактеризуйте узагальнені показники для оцінки ступеня забруднення атмосферного повітря міста.
3. Охарактеризуйте рівні забруднення повітряного басейну в місті.
4. Які метеорологічні умови сприяють високому та низькому рівню забруднення атмосфери.
5. В чому полягає суть методу розпізнавання образів для прогнозування фонових забруднень атмосферного повітря в містах.

Практична робота № 11

Моделювання та прогнозування динаміки вмісту гумусу в ґрунті

Мета: сформулювати уявлення про моделювання та прогнозування динаміки вмісту гумусу в ґрунтах.

Теоретичний матеріал

У найпростішому випадку математичну модель динаміки гумусу в ґрунті можна описати наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = k_{21}x_2 - k_1x_1 + c \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{k_0P_0x_1}{a+x_1} - k_3x_2 \end{cases} \quad (11.1)$$

де x_1 – це запас гумусу в ґрунті (т/га);

x_2 – це кількість рослинних решток (т/га);

P_0 – це продуктивність біоценозу;

k_1 – це коефіцієнт мінералізації гумусу;

k_2 – це коефіцієнт мінералізації рослинних решток;

k_{21} – це коефіцієнт гуміфікації рослинних решток;

$k_3 = k_2 + k_{21}$ – це коефіцієнт розкладу рослинних решток;

c – це рівень надходження гумусу з органічними добривами (1 тонну органічних добрив прирівнюють до 50 кг гумусу);

k_0 – це частка рослинних решток, що залишаються в ґрунті;

a – коефіцієнт якості ґрунту.

Концептуальна модель гумусонакопичення в ґрунті відображена на рис. 11.1. Відповідно до цієї схеми основний чинник гумусоутворення – це надходження в ґрунт органічного субстрату, а основні процеси гумусоутворення – це інтенсивність гуміфікації і мінералізації (Веремеєнко С.І., 1995).

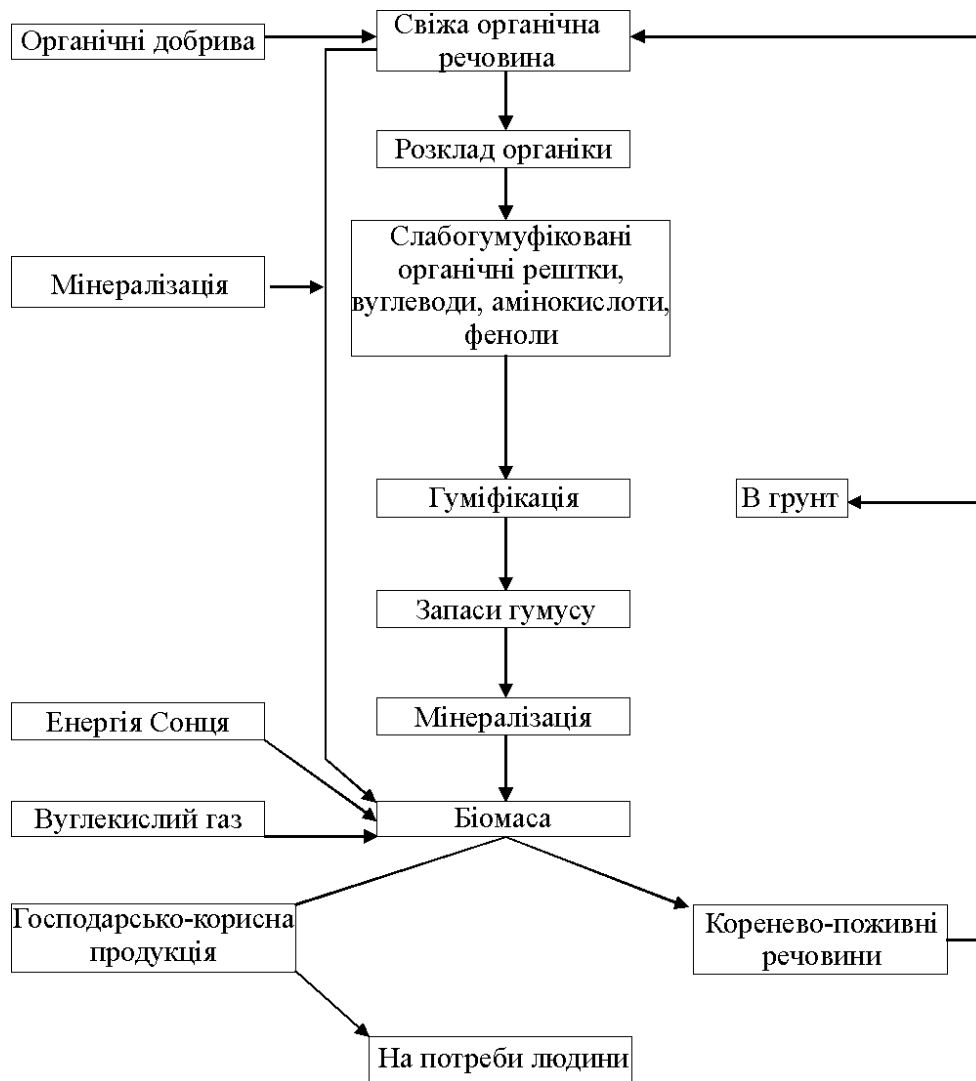


Рисунок 11.1 – Концептуальна модель динаміки гумусу в ґрунті

На основі структури концептуальної моделі, відображеної на рис. 10.1, в загальному випадку, модель динаміки гумусу в математичній формі можна представити у вигляді системи двох диференціальних рівнянь (Балаєв А.Д., Петренко Л.Р, 1999):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = K_{21}y - K_1x \\ \frac{dy}{dt} = \Pi - K_{21}y - K_2y \end{cases} \quad (11.2)$$

де x – це запас вуглецю гумусу в шарі ґрунту (т/га);

t – це час (років);

y – це вміст у ґрунті вуглецю органічних решток (т/га);

Π – це кількість вуглецю органічних решток, яка щороку надходить у ґрунт, т/га;

K_1 – це коефіцієнт щорічної мінералізації запасів гумусу;
 K_2 – це коефіцієнт щорічної мінералізації запасів рослинних решток;
 K_{21} – коефіцієнт гуміфікації органічних решток.

Ввівши коефіцієнт трансформації органічних решток $K_3 = K_{21} + K_2$ рівняння матимуть вигляд:

$$\begin{cases} x' = K_{21}y - K_1x \\ y' = \Pi - K_3y \end{cases} \quad (11.3)$$

З урахуванням того, що $\Pi = \Pi_0 \frac{x}{x_0}$, система рівнянь матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} x' = K_{21}y - K_1x \\ y' = \Pi_0 \frac{x}{x_0} - K_3y \end{cases} \quad (11.4)$$

Розв'язавши систему рівнянь (11.4) відносно x , одержують лінійне однорідне диференціальне рівняння другого порядку із постійними коефіцієнтами:

$$x'' + (K_3 + K_1)x' - \left(\frac{K_{21}\Pi_0}{x_0} - K_3K_1 \right)x = 0 \quad (11.5)$$

Рівняння (10.5) розв'язують за допомогою характеристичного рівняння:

$$p^2 + (K_3 + K_1)p - \left(\frac{K_{21}\Pi_0}{x_0} - K_3K_1 \right) = 0 \quad (10.6)$$

Знаходимо корені квадратного рівняння (10.7):

$$D = (K_3 + K_1)^2 - 4 \left(\frac{K_{21}\Pi_0}{x_0} - K_3K_1 \right) = (K_3 + K_1)^2 - \frac{4K_{21}\Pi_0}{x_0} \quad (11.7)$$

$$p_1 = \frac{-(K_3 + K_1) + \sqrt{D}}{2}$$

$$p_2 = \frac{-(K_3 + K_1) - \sqrt{D}}{2}$$

Вирішення рівняння (10.7) можна записати в вигляді експоненціальної залежності:

$$X_t = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} \quad (11.8)$$

де C_1, C_2 – це константи, які необхідно знайти:

$$C_2 = x_0 - C_1 \quad (11.9)$$

$$C_1 = \frac{x_t - x_0 e^{p_2 t}}{e^{t(p_1 - p_2)}} \quad (11.10)$$

Рівняння (10.10) записують в більш для розрахунків зручному вигляді:

$$X_t = C_1 (\exp(p_1 t) - \exp(p_2 t)) + x_0 (\exp(p_2 t)) \quad (11.11)$$

де X_t – це прогнозований запас гумусу у досліджуваному шарі ґрунту через t років від початку спостережень (т/га);

x_0 – початковий запас гумусу в цьому ж шарі ґрунту в момент часу $t = 0$ (т/га).

Завдання:

1. Згідно з вихідними даними (таблиці 11.1) спрогнозувати запаси гумусу в ґрунті відповідно до методу Балаєва А.Д. і Петренка Л.Р.). Розрахунок проводити для періоду двадцять років із кроком один рік. Результати розрахунків представити в таблиці 11.2. Побудувати графік зміни вмісту гумусу в ґрунті (за зразком наведеним на рис. 11.2).

2. Сформулювати висновок, зазначивши як змінюється вміст гумусу в ґрунті залежно від часу; як можна оцінити тенденції цієї зміни (позитивні чи негативні); які ще фактори впливають на вміст гумусу.

Таблиця 11.1

Вихідні дані для розрахунків для прогнозування запасів гумусу
в ґрунті

Варіанти	X_0 , т/га*	x_2 , т/га	P_0	k_1^{**}	k_2^{**}	k_{21}^{**}	k_0	P_0 , т/га	c , т	C_1	a
1	50,02	5,01	3	0,006	0,587	0,283	0,415	2,47	1,43	65,28	10
2	50,66	8,01	4,69	0,007	0,522	0,203	0,49	2,35	1,19	59,33	5
3	51,3	11,01	3,58	0,009	0,554	0,212	0,488	2,08	1,49	63,82	2
4	51,94	14,01	5,43	0,009	0,557	0,253	0,37	2,35	1,37	66,22	1
5	52,58	17,01	4,76	0,006	0,51	0,257	0,523	2,27	1,19	58,96	1
6	53,22	20,01	4,44	0,005	0,535	0,22	0,423	2,01	1,33	67,59	4
7	53,86	23,01	4,69	0,007	0,519	0,279	0,517	2,33	1,18	65,3	6
8	54,5	26,01	3,58	0,008	0,568	0,289	0,525	2,15	1,49	63,39	6
9	55,14	29,01	5,47	0,009	0,542	0,261	0,504	2,28	1,08	66,38	8
10	55,78	10,59	5,24	0,005	0,544	0,3	0,552	2,45	1,23	67,96	1
11	56,42	6,7	3,52	0,008	0,555	0,293	0,487	2,44	1,45	59,56	6
12	57,06	13,6	5,58	0,006	0,559	0,205	0,362	2,3	1,34	66,64	3
13	57,7	8,86	5,13	0,007	0,598	0,276	0,541	2,49	1,02	62,13	8
14	58,34	5,18	4,54	0,006	0,558	0,238	0,547	2,4	1,16	63,33	6
15	58,98	14,81	3,91	0,007	0,557	0,296	0,496	2,05	1,35	58,13	5
16	59,62	10,44	4,69	0,007	0,534	0,241	0,314	2,2	1,07	59,31	4
17	60,26	14,1	3,58	0,009	0,51	0,238	0,303	2,07	1,35	61,65	9
18	60,9	14,27	4,09	0,007	0,535	0,223	0,535	2,39	1,07	58,02	4
19	61,54	7,03	3,44	0,01	0,519	0,289	0,525	2,12	1,46	66,76	2
20	62,18	13,84	3,5	0,007	0,598	0,245	0,459	2,19	1,32	61,74	2
21	62,82	8,37	5,97	0,006	0,561	0,298	0,546	2,05	1,4	65,46	10
22	63,46	14,18	4,34	0,006	0,505	0,26	0,568	2,49	1,14	66,44	5
23	64,1	10,77	4,69	0,007	0,587	0,221	0,415	2,17	1,32	67,59	2
24	64,74	7,19	3,58	0,007	0,522	0,222	0,49	2,19	1,17	65,3	1
25	65,38	9,55	3,03	0,009	0,554	0,245	0,488	2,47	1,43	63,39	1
26	66,02	12,15	4,13	0,006	0,557	0,224	0,37	2,35	1,19	65,28	4
27	66,66	6,82	4,59	0,007	0,569	0,203	0,523	2,08	1,49	59,33	6
28	67,3	5,74	4,69	0,007	0,55	0,292	0,423	2,35	1,37	63,82	6
29	67,94	14,07	3,58	0,009	0,577	0,29	0,517	2,27	1,19	66,22	6
30	68,58	7,29	4,82	0,006	0,596	0,214	0,505	2,21	1,33	58,96	6

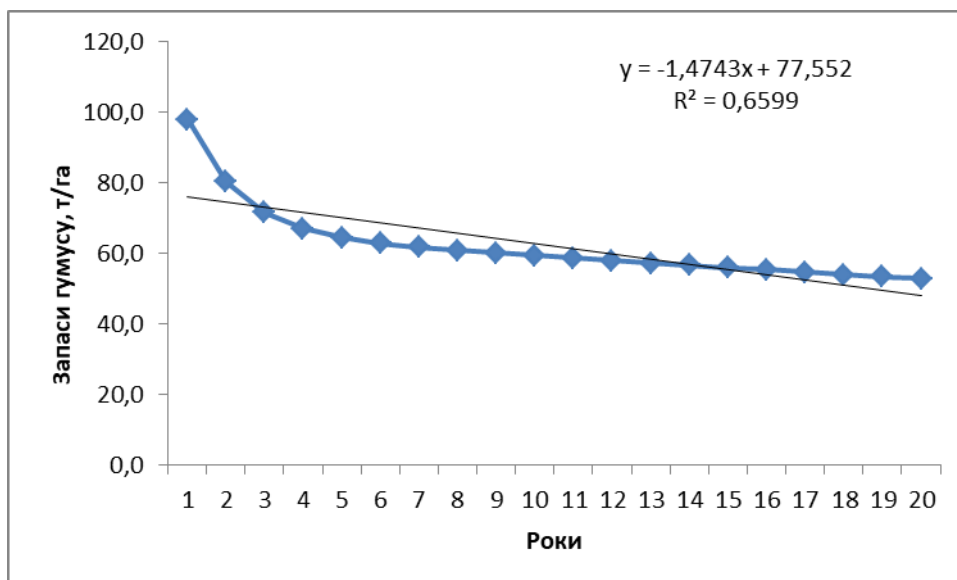


Рисунок 11.2 – Графік прогнозу запасів гумусу в ґрунті

Таблиця 11.2

Результати прогнозування динаміки запасів гумусу в ґрунті

t , роки	X_t , т/га
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
...	
20	

Контрольні запитання:

1. Яку екологічну роль відіграють ґрунти?
2. Дайте визначення поняттю «гумус».
3. Охарактеризуйте математичну модель Балаєва А.Д. і Петренка Л.Р динаміки запасів гумусу в ґрунті.
4. Які фактори впливають на динаміку гумусу в ґрунті?
5. Порівняльна оцінка моделей динаміки гумусу в ґрунті.

Практична робота № 12

Моделювання та прогнозування процесів забруднення у ґрунтах за методом групового урахування аргументів

Мета: сформувати навички моделювання процесів забруднення в ґрунтах із використанням математичних моделей, отриманих за методом групового урахування аргументів.

Теоретичний матеріал

Для ідентифікації складних математичних моделей забруднення ґрунтів найбільш поширеними є моделі, що побудовані за методом групового урахування аргументів (МГУА). При використанні цього методу для заданого набору експериментальних даних для їх опису перебирають велику кількість різних математичних моделей. Особливо ефективним даний метод є за умови наявності великої кількості параметрів та недостатності вивчення об'єкта та зв'язків між його параметрами. Згідно з МГУА проводять рекурсивний селективний відбір моделей, потім на основі яких будують більш складні моделі. Завдяки ускладненню моделі на кожному наступному етапі точність моделювання (апроксимація) заданих експериментальних даних підвищується.

У працях Ковальчук П. І. представлено наступні математичні моделі процесів хімічного забруднення поверхневого шару ґрунтів (0-20 см) важкими металами на промайданчиках і шламонакопичувачах на відстані r (м) меншій 0,5 км від місця надходження забруднюючої речовини в ґрунт:

– для міді (Cu):

$$y_1 = 0,004r^2 + 2 \cdot \frac{x_0 * r}{100} + x_0 - 0,8 \quad (12.1)$$

– для цинку (Zn):

$$y_2 = 0,01r^2 + 0,6r + 0,9x_0, \quad (12.2)$$

– для хрому (Cr):

$$y_3 = 0,02r^2 + 1,2r + 0,9x_0, \quad (12.3)$$

– для нікелю (Ni):

$$y = 0,02r^2 + \frac{x_0 * r}{100} + 0,9x_0, \quad (12.4)$$

де x_0 – початкове значення концентрації відповідного пелютанта в ґрунті, мг/кг;

y – значення концентрації забруднюючої речовини в ґрунті на відстані r (0-500 м) від джерела забруднення.

Завдання:

1. Відповідно до вихідних даних (табл. 12.1) реалізувати модель процесу забруднення ґрунтів певною хімічною речовиною, за зразком наведеним на рис. 12.1.

2. Сформулювати висновки, охарактеризувавши тенденцію зміни концентрації кожної із забруднюючих речовин залежно від місця її надходження в ґрунт. Зазначити на якій відстані спостерігається максимальне забруднення.

Таблиця 12.1

Вихідні дані для реалізації моделі процесу забруднення ґрунтів важкими металами

Варіант	Вміст рухомих форм важких металів, мг/кг			
	Zn	Cu	Cr	Ni
1	29	4,2	8,6	6,2
2	32	3,9	7,5	5,0
3	41	5,2	6,9	8,1
4	28	3,7	7,3	4,6
5	31	4,6	6,4	5,9
6	30	5,4	8,5	6,3
7	24	3,8	9,1	7,1
8	28	4,2	10,0	7,5
9	35	6,3	9,4	8,1
10	31	5,1	6,8	5,6
ГДК	23	3,0	6,0	4,0

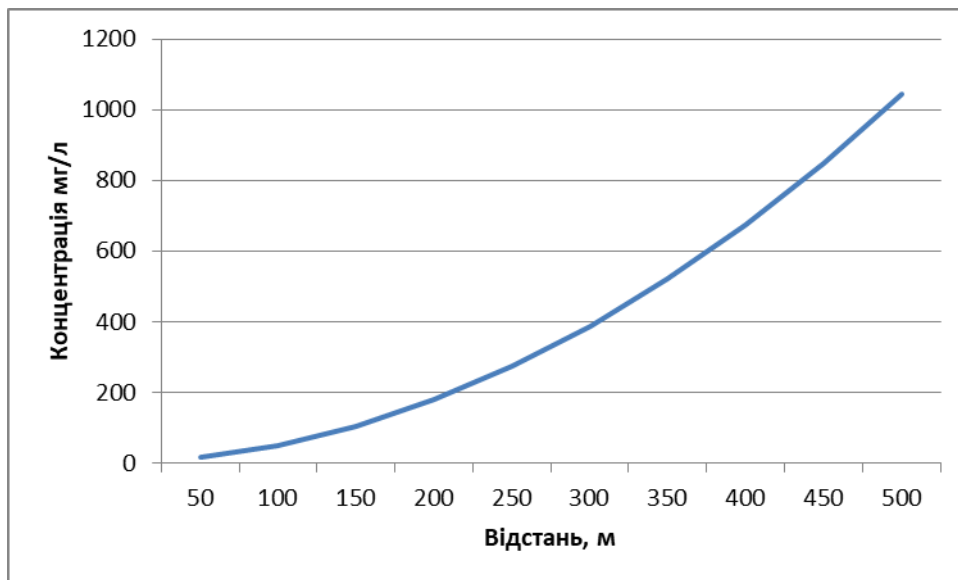


Рисунок 12.1 – Приклад реалізації моделі процесів забруднення ґрунту міддю

Питання для самоконтролю:

1. Охарактеризуйте основні завдання моделювання та прогнозування забруднення ґрунтів.
2. Чим небезпечне забруднення ґрунтів важкими металами?
3. В чому полягає суть методу групового урахування аргументів (МГУА)?
4. Як реалізують моделі процесів забруднення ґрунтів важкими металами залежно від відстані від джерела забруднення?

МОДУЛЬ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ЕКОСИСТЕМ ТА ГЛОБАЛЬНИХ БІОСФЕРНИХ ПРОЦЕСІВ

Практична робота № 13

Моделювання динаміки чисельності популяцій хижака та жертви

Мета: оволодіти навиками створення моделі динаміки популяцій хижаків та їх жертв.

Теоретичний матеріал

Розрахунок динаміки популяцій хижаків та їх жертв

здійснюється за моделлю Лотка-Вольтерра. Для використання даної моделі встановлюється декілька умов:

- популяції є закритими, тобто хижаки та жертви не покидають території та нові особини не приходять із зовні;
- жертви не помирають від хвороб й інших чинників, їх лише з'їдають хижаки. Для уточнення цих моментів вносяться зміни у коефіцієнт народжуваності для жертв.
- кількість їжі для жертви є необмеженою.

Модель будують за двома диференціальними рівняннями. Перше з яких цих – це зміна популяції жертв, яка описується наступним чином:

$$\frac{dN_1}{dt} = r * N_1 - p_1 * N_1 * N_2 \quad (13.1)$$

- де N_1 , N_2 – це популяції жертв та хижаків;
 r – це коефіцієнт народжуваності жертви;
 p_1 – це коефіцієнт хижості для жертви (ймовірність вмерти при зустрічі з хижаким).

Динаміка популяції хижаків регулюється наступним рівнянням:

$$\frac{dN_2}{dt} = -d * N_2 - p_2 * N_1 * N_2 \quad (13.2)$$

- де d – це коефіцієнт смертності хижака;
 p_2 – це коефіцієнт хижості для хижака (ймовірність роздобути їжу для розмноження).

Завдання:

1. Відповідно до вихідних даних (табл. 13.1) в середовищі Excel сформулювати модель динаміки популяцій хижаків та їх жертв. Розрахунок провести для 250 поколінь. Результати розрахунків представити у вигляді таблиці 13.2 та рис. 13.1.

2. Сформулювати висновки, проаналізувавши характер динаміки популяції жертви та хижака.

Таблиця 13.1

Вихідні дані для формування моделі динаміки популяцій хижака та жертви

Варіант	Кількість жертв	Кількість хижаків	Народжуваність жертви	Смертність хижака	Коефіцієнт хижості для жертви	Коефіцієнт хижості для хижака
	N1	N2	r	d	P1	P2
1	1000	50	0,1	0,05	0,001	0,00005
2	1010	60	0,1	0,05	0,001	0,00005
3	1020	70	0,1	0,05	0,001	0,00005
4	1030	80	0,1	0,05	0,001	0,00005
5	1040	90	0,1	0,05	0,001	0,00005
6	1050	100	0,1	0,05	0,001	0,00005
7	1060	110	0,1	0,05	0,001	0,00005
8	1070	120	0,1	0,05	0,001	0,00005
9	1080	130	0,1	0,05	0,001	0,00005
10	1090	140	0,1	0,05	0,001	0,00005

Таблиця 13.2

Результати динаміки популяцій хижаків та жертв (для 10 поколінь)

Покоління	Кількість жертв	Кількість хижаків
1	1000	50
2	1050	50
3	1103	50
4	1157	50
5	1215	51
6	1275	51
7	1337	52
8	1401	53
9	1467	54
10	1534	55

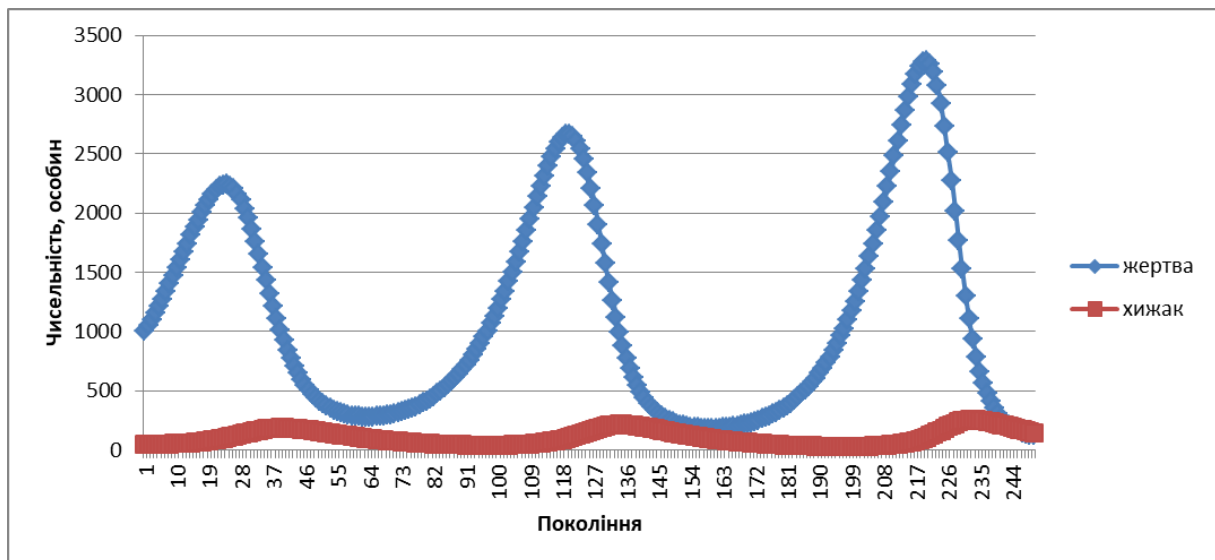


Рисунок 13.1 – Графік динаміки популяцій хижаків та жертв

Питання для самоконтролю:

1. Охарактеризуйте типи відносин в екосистемах.
2. В чому полягає суть хижацтва?
3. Які Ви знаєте моделі динаміки популяцій?
4. Охарактеризуйте суть моделі Лотка-Вольтерра.
5. Як змінюється чисельність хижаків та жертв за моделлю Лотка-Вольтерра?

Практична робота № 14

Моделювання динаміки чисельності популяцій на основі моделі Ферхюльста

Мета: оволодіти навиками створення моделі динаміки чисельності популяцій із використанням моделі Ферхюльста.

Теоретичний матеріал

Для моделювання чисельності $N(t)$ популяції широко використовують логістичну модель (модель Ферхюльста), яка має наступний вигляд:

$$\frac{dN(t)}{dt} = r * N(t) * \left(1 - \frac{N(t)}{K}\right), t > 0 \quad (14.1)$$

В дані моделі члени, що описують народжуваність і смертність $rN(t)$ та внутрішньовидову конкуренцію $r * N(t) * \left(\frac{N(t)}{K}\right)$ враховують чисельність популяції в досліджуваній момент часу t . Проте часто більш реалістичною є модель, у якій в члені, який описує конкуренцію, враховують чисельність популяції у попередні моменти часу $t - T$, ніж час t , тобто цей член має вигляд $r * N(t) * \left(\frac{N(t-T)}{K}\right)$. В такому випадку рівняння, яке описує швидкість зміни чисельності, матиме наступний вигляд:

$$\frac{dN(t)}{dt} = r * N(t) * \left(1 - \frac{N(t-T)}{K}\right), t > 0 \quad (14.2)$$

де $T > 0$ – це стала, що може дорівнювати часу дозрівання особин до дорослого віку тощо.

Завдання:

1. Відповідно до вихідних даних (табл. 14.1) в середовищі *Excel* сформувані модель динаміки популяцій. Розрахунок провести для 250 поколінь Результати розрахунків представити у вигляді таблиці 14.2 та рис. 14.1.

2. Сформувані висновки, проаналізувавши динаміку популяції без урахування попередніх поколінь та із врахуванням зсуву в часі $T=10$.

Таблиця 14.1

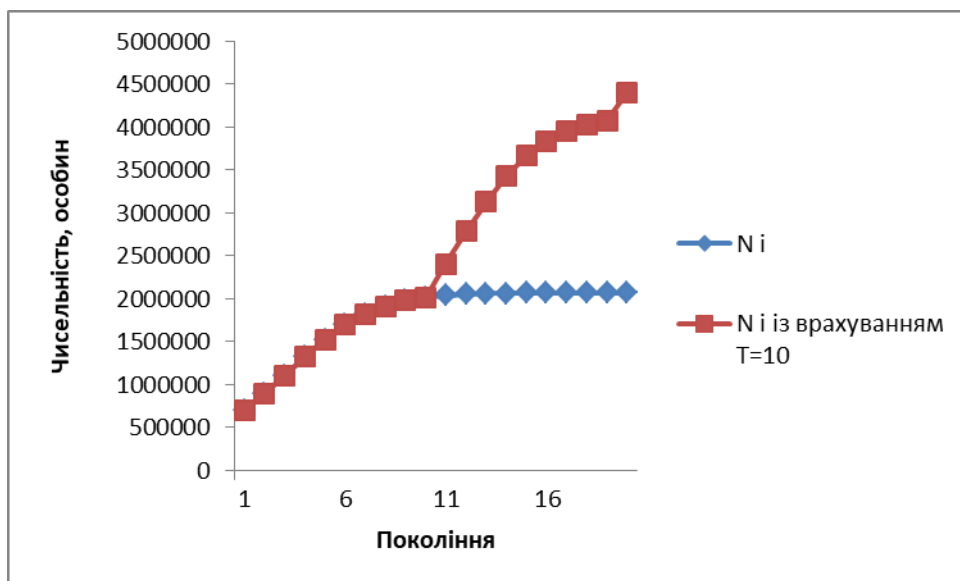
Вихідні дані для формування моделі динаміки популяцій

Варіант	Початкова популяція, тис. особин	Коефіцієнт народжуваності	Коефіцієнт смертності	Швидкість росту популяції	Місткість популяції, тис. особин
	N_0			r	K
1	700 000	14,5	10,2	1,42	7000 000
2	700050	14,5	10,2	1,42	7000500
3	700100	14,5	10,2	1,42	7001000
4	700150	14,5	10,2	1,42	7001500
5	700200	14,5	10,2	1,42	7002000
6	700250	14,5	10,2	1,42	7002500
7	700300	14,5	10,2	1,42	7003000
8	700350	14,5	10,2	1,42	7003500
9	700400	14,5	10,2	1,42	7004000
10	700450	14,5	10,2	1,42	7004500

Таблиця 14.2

Результати моделювання динаміки популяції

Проміжок часу	$N(t)$	$N(t-T)$
1	700000	700000
2	894600	894600
3	1107984	1107984
4	1324304	1324304
5	1524744	1524744
6	1693525	1693525
7	1823006	1823006
8	1914503	1914503
9	1975058	1975058
10	2013266	2013266
11	2036609	2401969
12	2050579	2780293
13	2058833	3126835
14	2063674	3423898
15	2066499	3660084
16	2068144	3833336
17	2069100	3951215
18	2069655	4026772
19	2069977	4073265
20	2070164	4403059

Рисунок 14.1 – Графік динаміки популяції без урахування попередніх поколінь та із врахуванням зсуву в часі $T=10$

Питання для самоконтролю:

1. Які фактори впливають на чисельність популяції?
2. Яку модель широко використовують для моделювання чисельності популяції.
3. Які параметри враховують при створенні моделі Ферхюльста.
4. Які ще Ви знаєте моделі динаміки популяції?

Практична робота № 15

Модель взаємодії РК-БСК для поверхневих водних систем

Мета: оволодіти навичками моделювання динаміки розчиненого кисню та органічних речовин у відкритих водних системах.

Теоретичний матеріал

РК – це вміст розчиненого кисню в воді. Це ефективний кількісний показник життєдіяльності організмів у водному середовищі. Розчинений у воді кисень бере участь в багатьох хімічних процесах, зокрема в процесах метаболізму організмів та окислювання забруднюючих речовин (органічних та неорганічних). Вміст РК залежить від інтенсивності зазначених процесів, а, отже, і від якості води – за умови якщо $RK = 0$, така вода є непридатною для життєдіяльності та споживання.

Показник РК тісно пов'язаний з показником біологічного споживання кисню (БСК) – інтегральною характеристикою, яка описує обсяг середньостатистичного споживання кисню у біохімічних процесах. Підвищення показника БСК призводить до зниження показника РК та погіршення якості води.

Внутрішня структура моделі взаємодії РК та БСК описується множиною $\{S_1\}$ функцій споживання РК та множиною $\{S_2\}$ функцій споживання БСК. Аргументи кожної функції, яка входить до $\{S_1\}$ і $\{S_2\}$, є РК та БСК (які, в свою чергу, виступають функціями координат та часу), а також їхні похідні й фактори зовнішнього середовища (функції сторонніх джерел та стоків РК та БСК).

Класична динамічна модель взаємодії РК та БСК у воді – це модель Стрітера і Фелпса. Дана модель описує розподіл РК в річці нижче за течією від джерела скиду забруднюючих речовин далеко від

естуарію. Взаємодія РК-БСК є складним багатокомпонентним і багатостадійним процесом, який в цілому можна відобразити за допомогою схеми, зображеної на рис. 15.1. Визначальні процеси взаємодії РК та БСК – це реаерація потоку води та споживання РК при окислюванні (розпаді та розкладанні) БСК. Математична модель Фелпса-Стрітера описується наступним рівнянням:

$$D = \frac{k' \times БСК(L)}{k_2' - k'} (e^{-k' \frac{x}{v}} - e^{-k_2' \frac{x}{v}}) + D_0 e^{-k_2' \frac{x}{v}}, \quad (15.1)$$

- де БСК(L) – це гранична концентрація спожитого кисню (мг/л);
- D – це концентрація розчиненого кисню у воді (мг/л);
- D₀ – це початковий дефіцит кисню (мг/л);
- k' – це константа швидкості БСК (день⁻¹);
- k₂' – це константа швидкості реаерації (день⁻¹);
- x – це відстань від джерела забруднення (км);
- v – це середня швидкість потоку води (км/день).

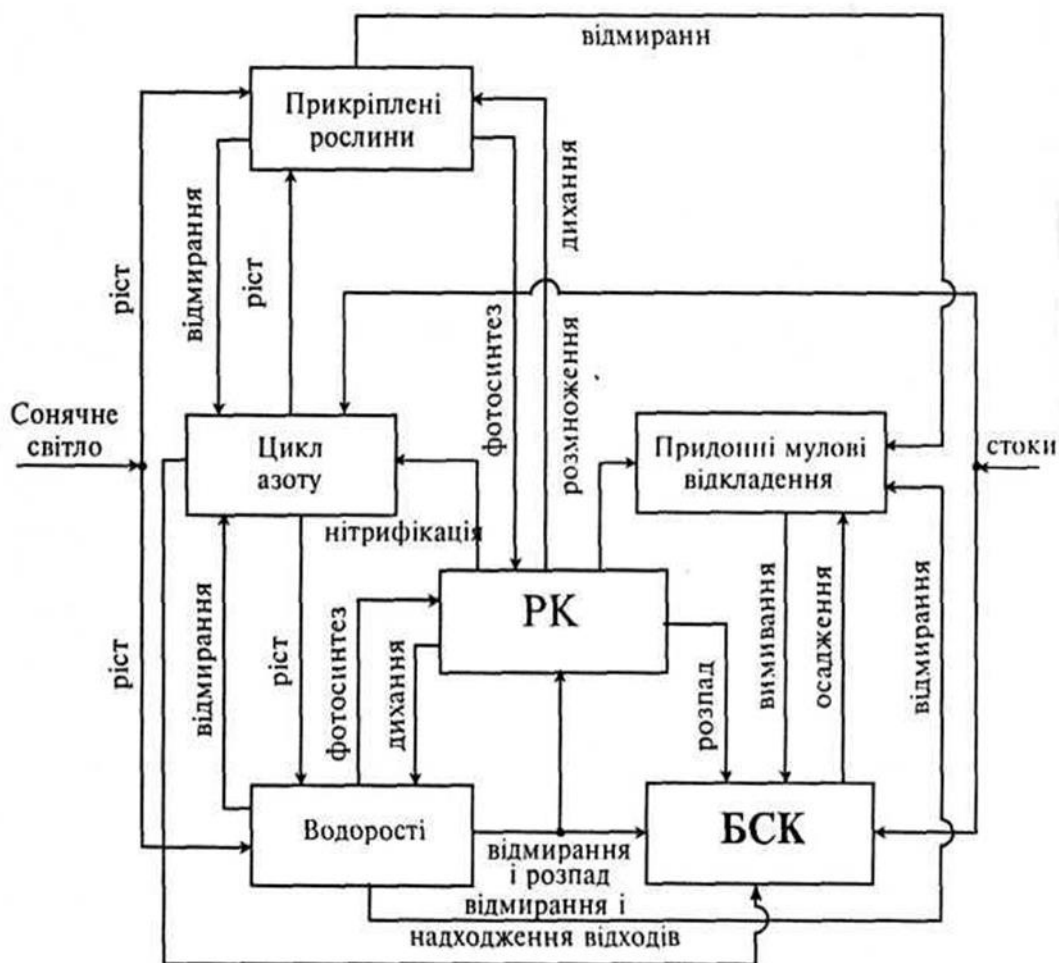


Рисунок 15.1 – Блокова модель взаємодії РК-БСК

Довідникові дані констант k' і k_2 наведені в таблиці 15.1.

Таблиця 15.1

Константи рекреації

Водний об'єкт	Діапазон k_2 за 20 ⁰ С (основа логарифму 10)	Діапазон k_2 за 20 ⁰ С (основа логарифму e)
Маленькі водойми та болота	0,05 – 0,10	0,12 – 0,23
Повільні потоки та великі озера	0,10 – 0,15	0,23 – 0,35
Великі водотоки низької швидкості	0,15 – 0,20	0,35 – 0,46
Великі водотоки нормальної швидкості	0,20 – 0,30	0,46 – 0,69
Швидкі водотоки	0,30 – 0,50	0,69 – 1,15
Водоспади	більше 0,50	більше 1,15

Значення БСК(L) визначають експериментально або ж розраховують за наступною формулою:

$$БСК(L) = \frac{БСК_5}{1 - e^{-\frac{k_2 L}{v}}} \quad (15.2)$$

Граничну відстань від джерела скиду стічних вод, при якій БСК матиме граничне значення обчислюють за наступною формулою:

$$x = vt, \quad \text{де} \quad t = \frac{1}{k_2' - k'} \ln \frac{k_2'}{k'} \left[1 - \frac{D_0(k_2' - k')}{k' \times БСК(L)} \right]$$

Завдання:

1. Відповідно до вихідних даних (табл. 15.1), на основі математичної моделі Фелпса-Стрітера спрогнозувати значення біохімічного споживання кисню (БСК) та вмісту розчиненого кисню (РК) у поверхневих водах заданого об'єкту. Для цього необхідно визначити відстань від джерела скиду побутових вод, при якій БСК матиме граничне значення; а також розрахувати зміну концентрації розчиненого кисню від місця скиду стічних вод до 2000 км униз за

течією. Результати прогнозування представити у вигляді графіку.

Додаткові параметри для розрахунку: температура води в річці 16°C , розчинений кисень досягає 100% насичення; температура стічних вод – 20°C , початкова концентрація розчиненого кисню в стічних водах – 0 мг/л; при температурі 20°C k' складає 0,197, $k'2$ – 0,587 (значення їхніх температурних коефіцієнтів при цьому становить 1,135 для k' і 1,024 для $k'2$).

2. Сформулювати висновки, охарактеризувавши особливості моделі РК-БСК та описавши отримані дані прогнозування.

Таблиця 15.1

Вихідні дані для розрахунків

Вихідні параметри	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v потоку річки, л/день	600	700	450	500	635	525	710	658	633	588
БСК ₅ у річці	1,1	1,7	1,0	1,2	1,3	1,2	1,1	1,0	1,2	1,0
v потоку ст. вод, л/день	69	100	87	72	67	82	77	84	97	92
БСК ₅ ст. вод	170	180	175	160	170	180	190	180	175	180

Питання для самоконтролю:

1. Охарактеризуйте основні фактори, які впливають на стан водного об'єкта.

2. Охарактеризуйте кисневий режим водойм та особливості деструкції органічних речовин.

3. Поясніть суть моделі РК-БСК.

4. В чому полягає суть моделі Флепса-Стрітера?

5. Які параметри враховують при побудові моделі Флепса-Стрітера для відкритих водних систем?

Практична робота № 16

Прогнозування температури повітря для певного регіону

Мета: сформулювати уявлення про глобальні кліматичні зміни; провести аналіз динаміки середньомісячної температури атмосферного повітря у певному регіоні та спрогнозувати показники на найближчі роки.

Завдання:

1. За даними таблиці 16.1 використовуючи метод екстраполяції зробити короткостроковий прогноз зміни річної та середньомісячної температури повітря до 2026 р. За результатами прогнозу побудувати графіки зміни температури (відповідно до зразка представленого на рис. 16.1).

2. На основі проведеного прогнозу зробити висновок про закономірності зміни температурного режиму на найближчі 3 роки.

Таблиця 16.1

Динаміка температури повітря у м. Київ за останні 50 років

Місяць	Січ	Лют	Бер	Кві	Тра	Чер	Лип	Сер	Вер	Жов	Лис	Гру	Рік
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1969	-9,8	-7	-3,5	7,4	14,8	17,3	18,8	18,1	13,2	7,5	5,7	-6,5	6,3
1970	-5,5	-4,9	0,5	9,4	15	17,2	20,8	17,7	13,4	6,6	3,2	-2	7,6
1971	-3	-3,6	-1,7	7,4	16,1	18,1	18,4	19,1	12,1	7,3	2,1	0,9	7,8
1972	-10,9	-4,4	1,5	10,9	16	19,7	22	20,8	13,4	6,8	3,4	-0,5	8,2
1973	-6,9	-0,2	1,6	10,6	14,4	17,9	20,1	18,5	12,1	7,3	0,9	-2,6	7,8
1974	-5,7	-0,1	2,7	6,9	12,5	17	17,9	18,7	15,6	9,7	2,9	0,4	8,2
1975	0,5	-2	3,7	11,2	19	20,7	20,3	19,5	16,9	7,7	-0,3	-1,2	9,7
1976	-5,8	-8,7	-0,1	10,2	12,6	16,2	18,1	16,5	13,3	4,2	2,6	-0,8	6,5
1977	-6,4	-1	2,8	8,3	15,2	17,2	19	16,9	11,8	7,7	4,1	-4,3	7,6
1978	-5,8	-5,2	2,3	8,7	12,6	16,6	17,2	18	11,9	8,1	4,7	-6,1	6,9
1979	-5,4	-6,3	2,2	6,5	17,7	21,5	16,9	19,1	15	5,9	0,9	-0,2	7,8
1980	-7,2	-4,4	-3,6	7	11,3	17,1	18,8	17,3	13,7	8,8	0,3	-1,3	6,6
1981	-4,8	-2,2	2	5,4	16,1	21,1	20,8	18,3	14,2	9,6	1,8	-1,5	8,4
1982	-3,1	-4,9	2,1	7	15,1	16,9	18,5	19,4	15,7	8,7	4	2,2	8,5
1983	-0,5	-2,6	3,2	10,9	18	18,2	19,2	18,9	16,2	8,3	1,2	-1,4	9,1
1984	-2,4	-5,9	0,4	9,8	16,7	15,7	17,6	18,7	15,4	10,1	0,5	-5	7,6
1985	-9,5	-12,5	-3,4	9,4	17	16,7	17,9	20,7	12,6	8,1	-1,4	-1,3	6,2
1986	-2,7	-9,3	0,2	10,7	16,7	19,3	19	19,9	12,5	7,3	1,7	-3,5	7,7
1987	-13,7	-3,9	-5,7	5	14,2	18,2	20,3	16,4	13,4	6,8	2,2	-3	5,9
1988	-4,9	-3,4	1,3	8,1	15,2	18,3	18,5	21,8	14,1	7,2	-2,2	-3,1	7,6
1989	0,5	2,5	5,2	10,1	15,2	19,4	19,4	19,6	14,5	9,1	0,2	-0,2	9,6

продовження табл. 16.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1990	-0,1	2,8	6,9	9,4	14,5	16,9	18,4	18,5	12	8,6	5,2	-2,3	9,2
1991	-1,6	-5,8	0,5	9	12,8	18,5	21,2	18,9	14,8	8,8	2,4	-2,8	8,1
1992	-1,8	-1,7	3,7	7	13,6	18,7	20,7	22,9	13,5	6,4	1,6	-3,6	8,4
1993	-1,2	-2,4	0,9	8	16,5	16,7	17,9	17,5	11,5	7,8	-6	-0,2	7,3
1994	0,1	-5,8	1,4	10,9	13,1	16,3	21,1	19,1	17,8	8	1,1	-3,4	8,3
1995	-3,8	2,2	3,5	8,8	14	20,1	20,4	19,7	13,8	9	-0,3	-5,4	8,5
1996	-9,8	-7,1	-3	9,2	18,6	18,8	19,3	19,1	11,2	8,6	6,7	-3,9	7,3
1997	-5,7	-1,1	2,1	6,1	16,1	18,3	19,4	19,2	11,8	6,2	3,2	-4,2	7,6
1998	-1	0,4	1,3	10,3	15,2	19,8	19,5	18,3	14,2	7,7	-3,3	-5,1	8,1
1999	-2,2	-1,5	3,2	11,7	12,8	22,6	22,7	19,3	15,8	8,2	-0,2	-0,2	9,4
2000	-4,1	0	1,7	12,7	15,4	17,9	19,1	20,6	12,3	9,5	4,5	1,3	9,2
2001	-1	-2,5	2,7	11,2	14,2	16,7	24,6	21,1	13,8	9,3	2,3	-7,3	8,8
2002	-2,7	3,7	5,5	9,9	16,5	18,4	23,9	20,2	13,9	7	3,9	-8,4	9,3
2003	-3,8	-6,4	0,1	7	19,4	18	21,3	19,2	14,1	6,8	3,4	-0,6	8,2
2004	-4,3	-2,6	3,9	9,1	13,2	17,7	20,5	20,1	14,2	9,3	2,9	0,1	8,7
2005	-0,6	-5,1	-1,6	10,3	16,4	17,3	21,4	20	16,3	9	2,2	-1	8,7
2006	-7,5	-6,1	-0,1	9,7	14,4	18,4	20,9	19,9	15,4	9,7	3,4	2,4	8,4
2007	2,1	-4,2	6,3	9	18,4	20,4	21,3	21,5	14,8	9,4	0,6	-0,9	9,9
2008	-3	0,6	4,6	10,7	14,3	18,8	20,8	21,6	13,5	10,7	3,5	-0,7	9,6
2009	-3,3	-1,6	2,2	11,1	15,1	20,4	21,7	19,2	17,3	9,1	4,7	-3,2	9,4
2010	-8,8	-3,3	1,4	10,3	17,3	22	24,4	24,6	14,9	6,3	8	-4,2	9,4
2011	-2,4	-6,1	1,5	10,2	16,7	21,1	21,9	19,3	15,8	7,7	2,5	2,2	9,2
2012	-4	-10	2,5	11,8	18,1	20	23,7	20,4	16,2	10,1	4,7	-5	9
2013	-4,3	-0,6	-1,7	10,3	18,9	21,6	20,8	19,9	12,4	9,7	6,4	-0,2	9,4
2014	-4,8	-0,5	6,8	10,3	16,9	18,2	22	21,3	15,3	7,7	1,7	-2,1	9,4
2015	-0,7	-0,7	5,1	9,7	16	20,4	21,9	22,6	17,8	7,3	4,7	1,9	10,5
2016	-5,7	2	3,9	12,4	15,5	20,6	22,4	21,1	16,1	6,5	1,2	-1,6	9,5
2017	-4,9	-2,8	6,2	10,4	15,2	20	20,9	22,4	16,4	8,4	3,3	1,6	9,8
2018	-2,4	-3,8	-1,8	13,1	18,8	20,6	21,4	22,5	17,3	10,7	0,3	-2,2	9,5
2019	-4,5	0,6	5,1	10,6	17	23,6	19,8	20,7	15,9	11,1	4,6	2,7	10,6
2020	0,8	2,5	6,5	9,9	12,4	21,7	21,9	21,4	18,4	12,5	3,8	-0,5	10,9
2021	-2,5	-4,5	2,7	8	14,4	21,3	24,6	21,1	13,5	8,4	4,8	-1,6	9,2
2022	-1,3	1,8	2,6	8,1	14,6	21,7	20,8	22,4	12,7	10,6	3,1	-0,7	9,7
2023	-0,3	0,2	4,8	9,6	16,0	19,6	21,5	23,8	18,8				

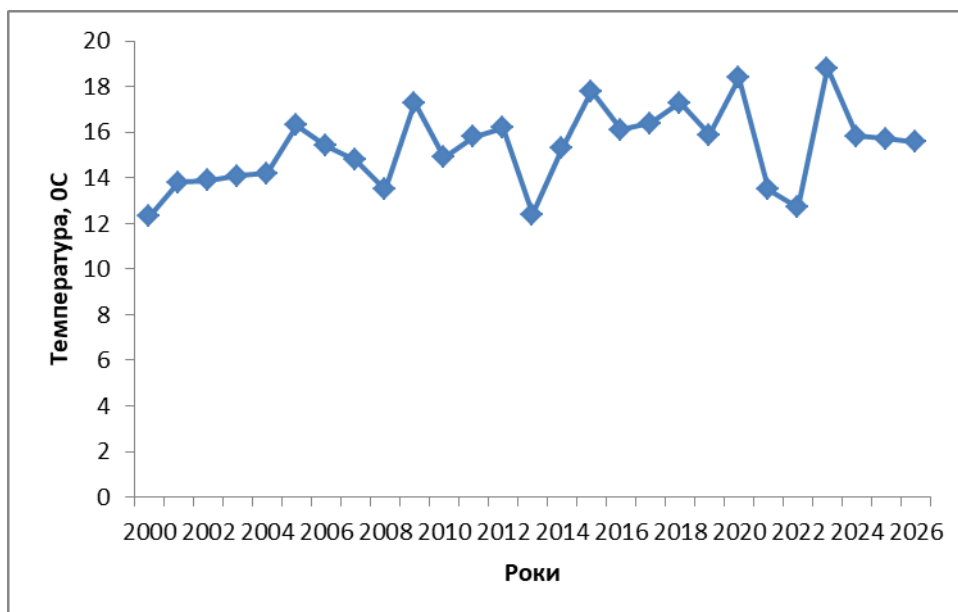


Рисунок 16.1 – Динаміка зміни середньомісячної температури у вересні з урахуванням прогнозу

Питання для самоконтролю:

1. Назвіть основні причини глобального потепління.
2. Назвіть основні наслідки глобального потепління.
3. У чому полягає суть методу екстраполяції при прогнозуванні.
4. Охарактеризуйте основні етапи прогнозування зміни температури.
5. Які моделі змін клімату Ви знаєте?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бараннік В. О. Конспект лекцій з дисципліни «Моделювання та прогнозування стану довкілля» (для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 101 – Екологія.) / В. О. Бараннік ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 46 с.
2. Бараннік В. О. Методичні вказівки до виконання практичних занять, курсової та самостійної роботи з дисципліни «Моделювання та прогнозування стану довкілля» (для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 101 Екологія) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 25 с.
3. Іваненко О.Г. Математичне моделювання гідроекологічних систем: навчальний посібник. Одеса, Вид-во «Екологія», 2006. 141 с.
4. Ковальчук П. І. Моделювання та прогнозування стану навколишнього природного середовища: навч. посібник. Київ: Либідь, 2003. 208 с.
5. Комп'ютерне моделювання в біології: навчальний посібник / Упорядники О.В. Оглобля, М.С. Мірошніченко, С.О. Костерін. Київ: Видавничий центр «Азбука», 2012. 120 с.
6. Лаврик В. І. Моделювання і прогнозування стану довкілля: підручник. Київ, 2010. 400 с.
7. Ладогубець Т. С., Фіногенов О. Д. Математичне моделювання: комп'ютерний практикум з дисципліни «Математичне моделювання: навч. посіб. для студ. спеціальності 113 «Прикладна математика», спеціалізації «Наука про дані та математичне моделювання». КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 58 с.
8. Моделювання та прогнозування стану довкілля. Лабораторний практикум : навчальний посібник / Під ред. В.Б. Мокіна. Вінниця: ВНТУ, 2018. 84 с.
9. Просунко В.М., Космік Н.М. Методика прогнозування температури повітря і кількості опадів. Меліорація і водне господарство. Вип. 97. 2009. С. 261-271.
10. Рибалова О.В. Моделювання та прогнозування стану довкілля: Курс лекцій. Для студентів денної форми навчання. Спеціальність 101 «Екологія» Освітньо-кваліфікаційний ступінь «бакалавр».. Харків: НУЦЗУ, 2016. 221 с.

11. Роман Л. Ю., Чундак С.Ю., Марійчук Р.Т. Методичні вказівки до лабораторного практикуму з дисципліни «Моделювання та прогнозування стану довкілля» для студентів хімічного факультету, спеціальності 6.101 Екологія. Ужгород, 2021. 54 с.

12. Фесюк В. О. Географічне моделювання і прогнозування: курс лекцій. Луцьк : ПП Іванюк В. П., 2021. 132 с.

13. Фесюк В. О. Кількісні методи в географії: робочий зошит. Луцьк : ПП Іванюк В. П., 2020. 128 с.

14. Хусаїнов Д.Я., Харченко І.І., Шатирко А.В. Введення в моделювання динамічних систем: навч. посібник. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2010. 132 с.

15. Ясковець І.І., Протас Н.М., Осипова Т.Ю., Касаткін Д.Ю. Моделювання та прогнозування стану довкілля: підручник. Київ: НУБіП України, 2018. 566 с.

Навчальне видання

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ
ГЕОСИСТЕМ**

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт

Укладачі:

КОЛЯДА Ольга Василівна
ГОЛОВАНЬ Лариса Володимирівна
ЧУПРИНА Юлія Юріївна
БУЗІНА Ірина Миколаївна

Підписано до друку 15.06.2023 р.
Формат 60 x 84 1/16. Гарнітура Garamond. Умовн. друк. арк. – 4,6.
Наклад – 100 прим.
Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44