

Міністерство освіти і науки
Житомирський державний університет імені Івана Франка
Природничий факультет
Кафедра екології та географії

Хом'як І.В.

**Навчальний посібник
«Системний аналіз якості навколишнього середовища»**

Для підготовки здобувачів другого
(магістерського) рівня вищої освіти

Галузь знань Е Природничі науки
Спеціальність Е2 Екологія
Освітня програма Екологія
Факультет Природничий

Автор:
професор кафедри екології та географії **Хом'як Іван**

Житомир 2026

УДК 504.064:519.87
Х-76

Рекомендовано до друку вченою радою Житомирського державного університету імені Івана Франка (протокол № 12 від 26.06.2026).

Рецензенти:

Олександр КРАТЮК – доктор біологічних наук, професор кафедри лісового та садово-паркового господарства Поліського національного університету

Наталія БОРДЮГ – доктор педагогічних наук, професор, директор Комунального закладу позашкільної освіти «Обласний еколого-натуралістичний центр» Житомирської обласної ради;

Діана ГАРБАР – доцент, кандидат біологічних наук, доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи Житомирського державного університету імені Івана Франка.

Х-76

Хом'як І. В. Системний аналіз якості навколишнього середовища: навчальний посібник Житомир: видавництво ЖДУ ім. І. Франка, 2026. 193 с.

Навчальний посібник «Системний аналіз якості навколишнього середовища» розроблений на основі сучасних досягнень у галузі системного аналізу, екологічного моніторингу та моделювання. Матеріали видання включають новітні методики оцінки стану біосфери й відображають актуальні проблеми теоретичної та практичної складової сучасної екології. Посібник призначений для здобувачів вищої освіти.

©Житомирський державний університет імені Івана Франка, 2026

ЗМІСТ

Вступ	4
Загальна характеристика освітньої компоненти	5
Система і її характеристики	7
Холічний підхід до вивчення складних систем	30
Довкілля як система	47
Моделювання природних систем	66
Методологія і практика побудови прогностичних алгоритмів	93
Тестові завдання	118
Ситуативні задачі	130
Розрахунково-моделюючі задачі	176
Теоретичні запитання для самопідготовки	178
Рекомендована література та інтернет-ресурси	182

ВСТУП

Сучасний етап розвитку екологічної науки характеризується стрімким ускладненням екологічних проблем, що зумовлено масштабним антропогенним тиском на біосферу. Традиційні локальні підходи до оцінки стану довкілля вже не дозволяють повноцінно охопити весь комплекс взаємопов'язаних процесів, які відбуваються у природних екосистемах. Навколишнє середовище є складною, динамічною та багаторівневою системою, де зміна навіть одного компонента неминуче викликає ланцюгову реакцію в усій структурі.

Саме тому виникає об'єктивна потреба у застосуванні системного підходу, який розглядає природні та техногенні об'єкти як цілісні сукупності взаємодіючих елементів. Системний аналіз виступає ефективним методологічним інструментом, що дозволяє інтегрувати знання з різних наукових галузей – від біології та географії до математичного моделювання й кібернетики. Він забезпечує можливість не лише фіксувати поточні зміни якісних параметрів довкілля, але й прогнозувати поведінку екосистем у довгостроковій перспективі під впливом різноманітних чинників.

Актуальність впровадження системного підходу в екологічну практику зумовлена також необхідністю створення надійних систем екологічного моніторингу та управління. Без глибокого аналізу внутрішніх зв'язків у біогеоценозах неможливо розробити ефективні стратегії збереження біорізноманіття, оптимізувати природокористування чи обґрунтувати управлінські рішення для забезпечення сталого розвитку регіонів. Таким чином, засвоєння методології системного аналізу є критично важливим для формування професійних компетентностей майбутніх фахівців екологічного профілю.

Методологічну основу навчального посібника становить комплексний системний підхід, який дозволяє розглядати навколишнє середовище як цілісний об'єкт із множиною внутрішніх і зовнішніх зв'язків. У виданні поєднано фундаментальні положення загальної екології, теорії систем та математичної кібернетики. Особливу увагу приділено методам математичного моделювання, статистичного аналізу екологічних даних, а також імітаційному моделюванню динаміки біогеоценозів. Інструментальну базу посібника формують сучасні підходи до організації екологічного моніторингу, геоінформаційних технологій та методів експертного оцінювання, що забезпечують об'єктивність аналізу складноструктурованих природно-техногенних систем.

Структура навчального посібника побудована за логічно послідовним принципом – від теоретико-методологічних засад до прикладного інструментарію. Матеріал видання розподілено на кілька взаємопов'язаних розділів. У першій частині висвітлено теоретичні основи системного аналізу, визначено понятійно-термінологічний апарат та класифікацію екологічних систем. Наступні розділи присвячені конкретним завданням які дозволяють визначити рівень знань здобувачів та допоможуть їм заркіпити їх на практиці. Кожен розділ супроводжується контрольними запитаннями та типовими завданнями для самостійної роботи. Така архітектура посібника сприяє послідовному засвоєнню матеріалу та формуванню у здобувачів вищої освіти навичок самостійного проведення системного аналізу якості навколишнього середовища.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОСВІТНЬОЇ КОМПОНЕНТИ

Освітня компонента «Системний аналіз якості навколишнього середовища» є обов'язковою для вивчення здобувачів другого рівня вищої освіти спеціальності Е2 «Екологія» в перший рік їхньої підготовки (2 семестр). Вона складається із 7 кредитів (210 годин). Зміст компоненти розділено на 3 модулі. На лекції відведено 30 годин, на практичні роботи – 52, а на самостійну роботу 128 годин. Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної та індивідуальної роботи становить 64,1 % до 35,9 %. Ця освітня компонента спрямована на формування професійної готовності до розв'язання складних завдань у галузі екологічної безпеки та збалансованого розвитку. Навчання передбачає оволодіння навичками проведення самостійних наукових досліджень та впровадження еко-інновацій у специфічних ситуаціях із комплексними чи багатофакторними умовами.

Метою вивчення освітньої компоненти є формування здатності розв'язувати складні задачі і проблеми у сфері екології з використанням системних підходів. Відповідно до мети завданнями її вивчення є Формувати вміння розв'язувати складні задачі і проблеми у сфері екології, охорони довкілля та збалансованого природокористування при здійсненні професійної діяльності або у процесі навчання з використанням системних підходів. Формувати вміння застосовувати міждисциплінарні підходи при критичному осмисленні екологічних проблем. Формувати вміння до використання принципів, методів та організаційних процедур дослідницької діяльності з використанням системних підходів.

Під час вивчення освітньої компоненти здобувачі мають отримати такі програмні результати та програмні результати.

Компетентності

ЗК1. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК2. Здатність приймати обґрунтовані рішення.

ЗК3. Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

ЗК4. Здатність розробляти та управляти проектами.

СК1. Обізнаність на рівні новітніх досягнень, необхідних для дослідницької та/або інноваційної діяльності у сфері екології, охорони довкілля та збалансованого природокористування.

СК2. Здатність застосовувати міждисциплінарні підходи при критичному осмисленні екологічних проблем.

СК4. Здатність застосовувати нові підходи до аналізу та прогнозування складних явищ, критичного осмислення проблем у професійній діяльності.

СК7. Здатність до організації робіт, пов'язаних з оцінкою екологічного стану, захистом довкілля та оптимізацією природокористування, в умовах неповної інформації та суперечливих вимог.

СК9. Здатність самостійно розробляти екологічні проекти шляхом творчого застосування існуючих та генерування нових ідей.

СК10. Здатність оцінювати рівень негативного впливу природних та антропогенних факторів екологічної небезпеки на довкілля та людину.

Програмні результати навчання

ПР02. Уміти використовувати концептуальні екологічні закономірності у професійній діяльності.

ПР06. Знати новітні методи та інструментальні засоби екологічних досліджень, у тому числі методи та засоби математичного і геоінформаційного моделювання.

ПР10. Демонструвати обізнаність щодо новітніх принципів та методів захисту навколишнього середовища.

ПР12. Уміти оцінювати ландшафтне і біологічне різноманіття та аналізувати наслідки антропогенного впливу на природні середовища.

ПР13. Уміти оцінювати потенційний вплив техногенних об'єктів та господарської діяльності на довкілля.

ПР17Критично осмислювати теорії, принципи, методи і поняття з різних предметних галузей для вирішення практичних задач і проблем екології.

ПР20. Володіти основами еколого-інженерного проектування та еколого-експертної оцінки впливу на довкілля.

Зміст освітньої компоненти розділено на три модулі: «Основи системного аналізу», «Природні системи» та «Прогнозування стану довкілля». Перший модуль включає в себе теми: «Система і її характеристики» та «Холічний підхід до вивчення складних систем». Другий модуль складається із двох тем: «Довкілля як система» та «Моделювання природних систем». В третьому модулі розглядається одна тема – «Методологія і практика побудови прогностичних алгоритмів» (табл. 1).

Табл. 1. Структура освітньої компоненти

Назви тем	Кількість годин										
	Денна форма						Заочна форма				
	Всього	У тому числі					Всього	У тому числі			
		Лекції	Практичні/Семинарські заняття	Лабораторні заняття	Самостійна робота	Індивідуальні заняття		Лекції	Практичні/Семинарські заняття	Лабораторні заняття	Самостійна робота
Модуль I. Основи системного аналізу											
Тема. 1. Система і її характеристики	50	6	12		32						
Тема. 2. Холічний підхід до вивчення складних систем	54	8	14		32						
Разом за модулем 1	104	14	26		64						
Модуль II Природні системи											
Тема. 3. Довкілля як система	32	4	8		20						
Тема. 4. Моделювання природних систем	34	4	10		20						
Разом за модулем 2	66	8	18		40						
Модуль III. Прогнозування стану довкілля											
Тема. 5. Методологія і практика побудови прогностичних алгоритмів.	36	4	8		24						
	36	4	28		24						
Усього годин	210	30	52		128						

СИСТЕМА І ЇЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Сучасна екологія змінила свої акценти від вивчення взаємовідносин між організмами чи популяціями і їхнім середовищем до аналізу екосистем та біосфери як цілого. Така трансформація наукових інтересів спостерігалася в багатьох галузях науки. Її можна спостерігати як в соціальних науках і психофізіології так і в клітинній біології та генетиці. Системний підхід не просто змінив окремі науки – він трансформував сам науковий світогляд, замінивши класичний принцип «розчленуй механізм на деталі, щоб зрозуміти його» на принцип «вивчай зв'язки між деталями, щоб зрозуміти ціле». Цей перехід став домінувати у другій половині ХХ століття (переважно у 1950–1970-х роках). При цьому, ідея системності пройшла довгий шлях від інтуїтивного відчуття гармонії космосу до фундаментального методологічного інструменту. Філософія була тим майданчиком, де поняття «система» विकристалізувалося протягом тисячоліть.

В Античності термін *systema* (від грецького *συστήμα* – «складене з частин», «поєднане») означав упорядкованість, на протигагу Хаосу. Космологізм: Давні греки розглядали світ як велетенську, замкнену, гармонійну систему – Космос. Платон: У діалозі «Тімей» він описує світ як єдине живе ціле, що має душу і розум. Він говорив, що елементи, такі як вогонь, повітря, вода та земля поєднані між собою нгармонійними пропорціями. Аристотель дещо віддалявся від платонівського ідеалізму. У своїй праці «Метафізика» він пише: «Ціле більше за суму його частин». Таким чином уперше в історії було формульовано принцип ємерджентності. Також Аристотель створив першу всеосяжну систему категорій для класифікації всього суцього та побудував ієрархічну «драбину природи».

У XVII–XVIII століттях, на тлі проривів у фізиці та астрономії, філософія почала трактувати систему через призму механіцизму. Особливо це добре помітно серед прихильників раціоналізму у таких як Декарт, Спіноза та Лейбніц. Вони прагнули побудувати філософське знання як сувору геометричну систему. Бенедикт Спіноза у своїй «Етиці» виводить правила поведінки та буття як математичні теореми з єдиної першооснови. У їхніх концепціях Всесвіт розглядається як гігантський годинниковий механізм (деїзм). Система тут – це сума гвинтиків і шестерень. Зв'язки між елементами виключно лінійні та причинно-наслідкові.

Із іншого боку, сама філософія почала розглядатися як «система наук». Саме тому німецькі філософи класики перейшли від статичних механічних систем до динамічних, що розвиваються. Так, Іммануїл Кант визначив архітектоніку чистого розуму. Він зазначав, що людське знання не може бути просто безсистемним набором фактів: воно повинно мати системну єдність, підпорядковану єдиній меті. Ще далі пішов Георг Вільгельм Фрідріх Гегель. Він досягнув вершини системного мислення у філософії. Гегель створив грандіозну систему, де весь світ є процесом розвитку Абсолютної ідеї. Його діалектичні ідеї подають систему як те що розвивається через внутрішні суперечності. В основі його підходу стоїть тріада: теза – антитеза – синтез. Система у Гегеля є динамічною та органічною, де кожен елемент має сенс лише у зв'язку з цілим.

Гегеліанство породило марксизм. Карл Маркс і Фрідріх Енгельс перенесли гегелівську діалектику на матеріальний світ і суспільство, створивши історичний матеріалізм. Маркс розглядав суспільство як систему. Маркс у «Капіталі» вперше проаналізував капіталістичне суспільство як надскладну систему, де економічний базис (продуктивні сили і виробничі відносини) системно визначає надбудову (політику, право, релігію, культуру). У той же час Енгельс обґрунтував системний взаємозв'язок між різними формами руху матерії (механічною, фізичною, хімічною, біологічною, соціальною), де кожна наступна форма є складнішою системою, що включає попередні.

У ХХ столітті системний підхід функціонував в межах структуралізму та постмодернізму. У ХХ столітті системний підхід вийшов за межі чисто філософських спекуляцій і став основою конкретних методологій. К. Леві-Стросс, М. Фуко, як представники структуралізму розвинули філософсько-гуманітарний напрям. Вони стверджували що соціальні та культурні явища, такі як мова, міфи чи обряди, слід вивчати не самі по собі, а через приховані підсвідомі структури та правила, які ними керують. Людина в цій філософії є не вільним суб'єктом, а елементом, чия поведінка жорстко визначена структурою системи.

Ж. Дельоз та Ф. Гваттарі виступили проти жорстких, ієрархічних, так званих «деревоподібних» систем. Вони запровадили концепцію Ризоми (від французького *rhizome* – кореневище) – системи без єдиного центру, яка розвивається хаотично в усіх напрямках, як грибниця або сучасний інтернет. Це опис децентралізованих, нестабільних систем епохи постмодерну.

У науці Перехід до домінування системного підходу відбувався хвилями, починаючи з кінця 1940-х років, і досяг піка в 1960–1970-х. Насамперед це було пов'язано із розвитком теорії систем та кібернетики в 40-50 року ХХ століття. Початком тих подій стала книга Норьєрта Вінера «Кібернетика, або керування і зв'язок у тварині та машині». Вона запровадила поняття «зворотного зв'язку» та робіт Людвіга фон Берталанфі присвячених загальній теорії систем. Останній обґрунтував концепцію «відкритих систем», які постійно обмінюються речовиною та енергією з довкіллям, що стало важливим для сучасних біології та екології. У 1954 році прихильники Людвіга фон Берталанфі об'єдналися в США у Товариство досліджень у галузі загальної теорії систем (Society for General Systems Research). До нього увійшли провідні математики, біологи, соціологи та економісти. Розвиток комп'ютерної та обчислювальної техніки став тим інструментарієм, який дозволив здійснити системну революцію в екології. Це відобразилося в діяльності таких організацій як Римський клуб, заснований у 1968 році. На його замовлення було здійснено спробу глобального моделювання розвитку суспільства і довкілля. Джей Форрестер та група Медоуза на замовлення Римського клубу публікують результати моделювання у доповіді «Межі зростання» («The Limits to Growth»). Використовуючи комп'ютерну модель «World3», вони змоделивали взаємодію п'яти глобальних системних параметрів: швидке зростання населення, індустріалізацію, забруднення довкілля, виробництво продовольства та вичерпання ресурсів. Ця подія шокувала світ і довела, що локальні екологічні чи економічні рішення без системного аналізу глобальних наслідків ведуть до колапсу.

Розвиток теорії систем в екології пройшов через декілька етапів. Перший етап пов'язаний із концепцією гомеостазу Уолтера Кеннона (1932) та теорією систем Людвіга фон Берталанфі. Перший створив обґрунтування здатності системи автоматично підтримувати внутрішню рівновагу, таку як температура, тиск, хімічний склад за принципом негативного зворотного зв'язку. Другий довів, що живі організми – це відкриті системи, які існують лише завдяки безперервному потоку речовини та енергії ззовні та їх виведенню назовні. Як тільки потік припиняється – система прагне до максимальної ентропії.

На другому етапі відбувся екологічний зсув в системній біології та пов'язане із ним біосферне мислення. Цей етап займав 1960–1970-ті роки. Завдяки працям Юджина Одума екологія трансформувалася з описової біології («хто де живе») у системну науку про колообіг речовин та трансформацію енергії. Спільноти та фізичне середовище об'єднали в поняття екосистеми. Разом із тим з'явилася суперечлива гіпотеза Геї Джеймса Лавлока та Лінн Маргуліс. Ця смілива системна концепція розглядає всю планету Земля як суперорганізм, де біота активно регулює клімат та хімічний склад атмосфери й океанів, підтримуючи оптимальні умови для життя.

Теперішній етап розпочався на початку ХХІ століття. Він насамперед пов'язаний із удосконаленням інструментів вивчення біоти на до клітинному рівні та вдосконаленням і доступністю комп'ютерних технологій. Коли наприкінці ХХ століття вчені розшифрували геном людини, виявилось, що знання послідовності нуклеотидів не пояснює, як працює клітина. Стало зрозуміло: один ген рідко відповідає за одну функцію; зазвичай вони працюють у складних мережах. Це породило сучасну системну біологію, яка досліджує взаємодії між усіма компонентами біологічної системи за допомогою комп'ютерного моделювання. Клітина аналізується як складна комп'ютерна плата або інтернет-мережа (генетичні, метаболічні та сигнальні мережі), де порушення одного вузла може за принципом доміно змінити поведінку всієї системи (наприклад, перетворити здорову клітину на ракову). Дослідження систем змістилося на рівень величезних масивів даних: геноміка (гени), транскриптоміка (РНК), протеоміка (білки) та метаболоміка (метаболіти). Клітина аналізується як складна комп'ютерна плата або інтернет-мережа (генетичні, метаболічні та сигнальні мережі), де порушення одного вузла може за

принципом доміно змінити поведінку всієї системи. Наприклад, перетворити здорову клітину на ракову).

Завдяки комп'ютеризації системний підхід в екології перетворився з красивої теоретичної концепції на точний інструмент кількісного аналізу, що дозволяє керувати якістю довкілля на рівні математично обґрунтованих прогнозів. Якщо у XX столітті екосистеми досліджували переважно у стані відносної статичності або лінійної динаміки, яка розглядала прості баланси речовини та енергії, то сьогодні екологія має справу з надскладними, нелінійними та глобально інтегрованими системами. Цей перехід став можливим виключно завдяки вибуховому розвитку обчислювальних потужностей, великих даних (Big Data) та штучного інтелекту. Це насамперед стосувалося екосистемології та соціоекології.

У минулому столітті людину часто розглядали як «зовнішній збурювальний фактор» для дикої природи. Комп'ютерне моделювання дозволило об'єднати людську діяльність та природні процеси в єдину соціо-екологічну систему. Тепер в одну модель закладаються як кліматичні чи біологічні параметри, так і економічні та соціальні фактори, такі як поведінка, ринкові, демографія, тощо. Наприклад, комп'ютери дозволяють прораховувати, як зміна екологічного законодавства в одній країні через глобальні ринки змінює швидкість вирубки лісів на іншому континенті.

На рівні методів аналізу відбувся перехід до агентного моделювання (Agent-Based Modeling – ABM). Замість класичних диференціальних рівнянь, які описували систему «в цілому», таких як модель «хижак-жертва» Лотки-Вольтерри, сучасна екологія використовує агентне моделювання. У комп'ютерну програму закладаються тисячі або мільйони окремих «агентів» – це можуть бути окремі тварини, рослини, бактерії чи навіть люди-природокористувачі. Кожному агенту прописують прості індивідуальні правила поведінки та взаємодії із сусідніми агентами й середовищем. Запускаючи таку симуляцію на суперкомп'ютерах, екологи бачать, як із хаотичних індивідуальних дій на вищих рівнях системи самі по собі виникають складні просторові структури, міграційні хвилі або спалахи чисельності інвазійних видів.

Системний підхід XX століття страждав від дефіциту даних. Висновки про систему робилися на основі точкових польових замірів. Сьогодні екосистеми аналізуються крізь призму геоінформаційних систем (ГІС) та супутникового моніторингу. Супутникові знімки високої роздільної здатності, спектральний аналіз вегетації (NDVI) та лазерне сканування (LiDAR) дозволяють бачити екологічну систему «зверху» в динаміці. Це критично для ландшафтної екології та вивчення сукцесій (змін) лісових масивів під впливом глобального потепління чи антропогенного навантаження. Тисячі автоматичних датчиків у повітрі, воді та ґрунті передають дані в хмару щосекунди, створюючи цифрові карти екологічної якості в реальному часі.

Для аналізу таких величезних та складних і різноманітних масивів даних необхідні нові механізми, які замінять тисячі людино-годин. Штучний інтелект здатний знаходити приховані закономірності у велетенських масивах даних. Наприклад, штучний інтелект використовують для прогнозування лісових пожеж, моделювання поширення інвазійних видів рослин чи прогнозування цвітіння синьо-зелених водоростей у водоймах. Природні системи є нелінійними: невеликий поштовх може викликати катастрофічний ефект. Звичайний математичний апарат із цим не справлявся. У XXI столітті з'явилася технологія створення «цифрових двійників» окремих екосистем (наприклад, цифровий двійник Світового океану або конкретного річкового басейну), де можна безпечно тестувати різні сценарії екологічного менеджменту перед їх реальним впровадженням.

Система –це множина взаємопов'язаних елементів, що утворюють єдине ціле, взаємодіють із середовищем та між собою. Поняття системи є фундаментальною категорією сучасного наукового знання, яка визначає впорядковану цілісність взаємопов'язаних та взаємодіючих елементів. Головною ознакою будь-якої системи є наявність структури, яка забезпечує внутрішню організацію та визначає характер зв'язків між складовими частинами. Ключовою властивістю системи виступає емерджентність – поява у цілісної системи нових якісних характеристик, які не притаманні жодному з її елементів, взятому окремо. У контексті системного аналізу навколишнього середовища об'єктом дослідження стають складні утворення, де природні та

антропогенні чинники інтегровані у спільні процеси обміну речовиною, енергією та інформацією. Будь-яка система характеризується наявністю умовної або фізичної межі, що відокремлює її від зовнішнього середовища. Взаємодія з цим середовищем здійснюється через канали «входу», якими до системи надходять ресурси чи збурення, та «виходу», які відображають результати функціонування або реакції системи. Розуміння системи як цілісного організму дозволяє відійти від редукціоністського вивчення окремих ізольованих об'єктів і перейти до комплексного аналізу мережових залежностей. Це дає змогу виявляти приховані причинно-наслідкові зв'язки у складних динамічних процесах, які відбуваються в геосферах та біосфері загалом. Таким чином, дефініція системи базується на трьох обов'язкових передумовах: наявності множини індивідуальних елементів, існуванні стійких зв'язків між ними, а також досягненні загальної мети функціонування або збереження цілісності. У межах екологічного моніторингу системний підхід забезпечує теоретичну базу для оцінки якості довкілля та прогнозування наслідків техногенного навантаження.

Функціонування системи описується через низку взаємопов'язаних понять, серед яких базовими є елемент, компонент, структура, зв'язок та архітектура. Елементом називають мінімальну неділиму одиницю системи в межах конкретного завдання дослідження, яка має власні специфічні властивості. Компонент є складнішим утворенням, що може складатися з кількох елементів і виступати як підсистема нижчого рівня, наприклад, гідросфера як компонент екосистеми планети. Внутрішня організація системи фіксується через поняття структури, яка визначає сукупність стійких зв'язків між елементами, що забезпечують збереження основних властивостей системи при зовнішніх змінах. Зв'язки всередині системи можуть бути лінійними, нелінійними, прямими та зворотними. Особливе значення мають зворотні зв'язки, які поділяються на негативні, що стабілізують систему й повертають її до вихідного стану, та позитивні, що посилюють відхилення і можуть призвести до якісної перебудови або руйнації. Сукупність усіх зв'язків та елементів визначає стан системи у конкретний момент часу, який описується набором кількісних та якісних параметрів. Взаємодія компонентів у межах структури формує внутрішні інформаційні, енергетичні та речовинні потоки. Масштабність та ієрархічність передбачають, що кожна система інтегрована у надсистему вищого порядку як її складова частина, і водночас містить у собі підсистеми нижчих рівнів. Опис цих взаємозв'язків є основою математичного та комп'ютерного моделювання, що застосовується для прогнозування поведінки складних природно-техногенних комплексів та оцінки екологічних ризиків.

Динаміка та життєдіяльність системи визначаються її базовими станами та процесами взаємодії, такими як рівновага, стійкість, розвиток, адаптація та взаємодія із середовищем. Навколишнє середовище є сукупністю всіх зовнішніх об'єктів та умов, які не входять до складу системи, але впливають на неї або зазнають впливу з її боку. Стан рівноваги характеризується збалансованістю внутрішніх сил та потоків, за якої основні параметри системи залишаються незмінними у часі без зовнішніх збурень. Для відкритих природних систем притаманна динамічна рівновага, або гомеостаз, коли постійний обмін речовиною та енергією з середовищем дозволяє підтримувати стабільність параметрів. Здатність системи відновлювати свій стан або траєкторію руху після виходу з рівноваги під дією зовнішніх чинників називається стійкістю. Якщо зовнішній тиск перевищує поріг стійкості, система переходить у стан розвитку або деградації. Розвиток передбачає незворотні, спрямовані та закономірні зміни структури й функцій системи, що призводять до виникнення її нової якісної організації. Процес пристосування системи до змін умов навколишнього середовища без втрати своєї функціональної цілісності визначається як адаптація. Адаптація забезпечується внутрішніми регуляторними механізмами, які переналаштовують зв'язки між компонентами у відповідь на сигнали ззовні. Усі ці стани тісно пов'язані між собою: адаптаційні можливості системи визначають межі її стійкості, що, у свою чергу, забезпечує можливість тривалого розвитку в мінливому природному середовищі.

У системному аналізі існує розгалужена класифікація систем за різними критеріями, що дозволяє типізувати об'єкти для вибору адекватних методів дослідження. За характером взаємодії з навколишнім середовищем системи поділяють на закриті (ізольовані), які не обмінюються з оточенням ні речовиною, ні енергією, та відкриті, для яких такий обмін є обов'язковою умовою

існування. Усі екологічні та біологічні системи належать до категорії відкритих. За походженням системи диференціюють на природні (природно-екологічні комплекси, ландшафти), штучні або антропогенні (технічні засоби, заводи, інформаційні мережі) та змішані, або соціотехнічні й геотехнічні системи, де діяльність людини безпосередньо інтегрована у природне середовище. За ступенем складності та передбачуваності поведінки виокремлюють детерміновані системи, реакція яких на зовнішній вплив є однозначно визначеною, та стохастичні (імовірнісні), поведінка яких містить елемент випадковості через велику кількість нелінійних зв'язків. За динамічними характеристиками системи бувають статичними, параметри яких не змінюються в часі, та динамічними, що постійно перебувають у русі та розвитку. Також виділяють матеріальні системи, що існують в об'єктивній реальності у вигляді фізичних тіл та полів, та абстрактні (ідеальні) системи, які є продуктом людського мислення, наприклад, математичні моделі екосистем, концепції чи теорії. Оцінка якості навколишнього середовища найчастіше має справу з відкритими, складними, динамічними та стохастичними системами змішаного типу.

У контексті навколишнього середовища система розглядається як цілісна структура, де біотичні (живі організми) та абіотичні (чинники неживої природи) компоненти перебувають у безперервній взаємодії. Абіотична матриця, що включає сонячне світло, атмосферні гази, воду та мінеральні речовини ґрунту, визначає первинні фізико-хімічні умови для існування життя.

Біотичний компонент, представлений продуцентами, консументами та редуцентами, активно трансформує ці умови. Живі організми поглинають сонячну енергію та неорганічні сполуки, перетворюючи їх на органічну речовину, яка згодом передається трофічними ланцюгами та повертається у неживе середовище під час деструкції.

Цей замкнений колообіг речовин та односпрямований потік енергії зв'язує живі й неживі елементи у стійку саморегульовану систему. Будь-яка зміна в абіотичному секторі, наприклад, забруднення водойми чи коливання температури, миттєво змінює стан біоти, і навпаки – життєдіяльність організмів здатна змінювати склад атмосфери чи структуру ґрунту.

Екологічна система як глобальний об'єкт дослідження інтегрує чотири фундаментальні складові частини, що перебувають у безперервній взаємодії: атмосферу, гідросферу, літосферу та біоту. Атмосфера забезпечує систему газами, необхідними для дихання та фотосинтезу, а також виконує терморегуляційну й захисну функції. Гідросфера, що охоплює всі запаси води, виступає універсальним розчинником та головним транспортним агентом для міграції хімічних елементів. Літосфера, а саме її верхня частина – педосфера (ґрунт), є твердим надійним базисом екосистеми та основним джерелом мінерального живлення для живих організмів. Біота, яка об'єднує все розмаїття мікроорганізмів, рослин і тварин, є найбільш динамічним та активним елементом, що зв'язує та перетворює ці геосфери в єдине органічне ціле.

Поняття екологічної системи розкривається через її визначення як надскладної мережі стійких зв'язків, у межах якої здійснюються скоординовані потоки речовини, енергії та інформації. Енергетичний потік має односпрямований характер: уловлюючись рослинами через сонячне випромінювання, енергія розсіюється у вигляді тепла на кожному трофічному рівні, що вимагає її постійного надходження ззовні. На противагу енергії, речовина завдяки діяльності біоти здійснює відносно замкнені біогеохімічні колообіги між неживою природою та живими організмами. Інформаційні потоки у цій мережі забезпечують керування та координацію: вони реалізуються через генетичний код, хімічну сигналізацію між видами та поведінкові реакції. Сама мережева структура і наявність петель зворотного зв'язку гарантують стійкість екосистеми, її здатність до самоочищення та адаптації до антропогенних навантажень.

Властивості екосистеми в цілому не зводяться до простої суми властивостей її елементів через закон емерджентності, який є фундаментальним для системного аналізу. Коли окремі компоненти – абіотичні фактори, мікроорганізми, рослини та тварини – об'єднуються в єдину структуру, між ними виникають нові, складні зв'язки та синергетичні ефекти. Окремо взятий елемент має обмежений набір характеристик, але у взаємодії з іншими він стає частиною петель зворотного зв'язку, які й породжують абсолютно нові системні якості, такі як здатність до саморегуляції, продуктивність або гомеостаз. Вивчаючи лише ізольовані частини, неможливо

передбачити поведінку всієї системи, оскільки ціле формується не механічним додаванням, а інтеграцією та специфічною організацією зв'язків.

Яскравим прикладом цього при оцінці забруднення навколишнього середовища є феномен біоаккумуляції та біомагніфікації токсикантів у трофічних ланцюгах. Якщо оцінювати токсичність важких металів чи пестицидів лише на основі їхньої концентрації в абіотичних компонентах (наприклад, у воді чи ґрунті), показники можуть видатися безпечними й нижчими за гранично допустимі норми. Проте на рівні цілісної екосистеми виникає нова якість: хімічні речовини передаються по ланцюгу від нижчих трофічних рівнів до вищих. Оскільки кожен наступний організм з'їдає велику кількість попередніх, концентрація отрути в тілі хижаків на вершині піраміди зростає в тисячі разів. Цей смертельний ефект є суто емерджентною властивістю екосистеми, яку неможливо виявити, аналізуючи хімічний склад води чи біологію лише одного окремого виду.

У системному аналізі за характером взаємодії з навколишнім середовищем об'єкти поділяють на три фундаментальні типи: ізольовані, закриті та відкриті системи. Ізольовані системи є суто теоретичною абстракцією, оскільки вони повністю закриті від зовнішнього світу і не обмінюються з ним ні речовиною, ні енергією, що з часом призводить їх до стану максимальної ентропії та термодинамічного хаосу. Закриті системи є більш реалістичними; вони здатні обмінюватися з оточенням енергією у вигляді тепла, світла чи роботи, проте залишаються повністю непроникними для потоків речовини. На відміну від них, відкриті системи характеризуються постійним, інтенсивним та двостороннім обміном як енергією, так і речовиною та інформацією із зовнішнім середовищем. Саме цей безперервний транзит дозволяє відкритим системам протистояти руйнівній силі ентропії, самоорганізовуватися, підтримувати високий рівень внутрішнього порядку та тривалий час перебувати у стані динамічної рівноваги.

Класичним прикладом відкритих систем є будь-які природні екосистеми, наприклад, лісовий масив або озеро, існування яких без взаємодії з навколишнім світом неможливе. На «вхід» такої системи безперервно надходить сонячна енергія, атмосферні опади, мінеральні речовини з підземних вод та кисень чи вуглекислий газ із повітря. В середині екосистеми цей ресурсний потік переробляється біотою: рослини акумулюють світло через фотосинтез, тварини споживають біомасу, а мікроорганізми розкладають органіку. На «виході» з екосистеми у зовнішнє середовище повертаються теплова енергія, кисень, волога через транспірацію рослин, а також мігруючі організми та вимиті водою хімічні сполуки. Будь-яке штучне перекриття цих вхідних чи вихідних потоків речовини та енергії, наприклад, через ізоляцію екосистеми під герметичним куполом, швидко зупиняє внутрішні колообіги, вичерпує ресурси та призводить до деградації й повної загибелі всієї живої структури.

За походженням та характером внутрішньої структури системи в екологічному моніторингу поділяють на природні, антропогенні та геотехнічні. Природні системи, такі як праліси чи дикі озера, виникають і розвиваються виключно внаслідок природної еволюції без втручання людини. Їхньою головною рисою є високий ступінь самоорганізації, замкненість колообігів речовин та здатність до самовідновлення завдяки природним механізмам регуляції. На противагу їм, антропогенні (штучні) системи повністю створюються та контролюються людиною для задоволення її потреб. Прикладами є агроекосистеми (поля, сади) або міські парки. Такі системи позбавлені повної екологічної автономії: вони мають спрощену структуру, низьке біорізноманіття і вимагають постійного внесення зовнішньої енергії та речовини – добрив, поливу, пестицидів – без чого вони швидко деградують.

Геотехнічні системи є найскладнішим, якісно новим класом змішаних систем, що виникають у місцях щільного перетину інженерних об'єктів та дикої природи. Вони є інтегрованим конгломератом, де технічні споруди та природні екосистеми пов'язані спільними технологічними й біогеохімічними потоками. Яскравими прикладами геотехнічних систем є великі водосховища з гідроелектростанціями, гірничо-збагачувальні комплекси з хвостосховищами, або великі кар'єри. У таких структурах нежива техніка та жива природа стають взаємозалежними: режим роботи інженерних агрегатів безпосередньо диктує умови існування місцевої біоти, а природні процеси (наприклад, замулення дна чи ерозія берегів) впливають на

безпеку й тривалість експлуатації технічних споруд. Управління якістю довкілля у межах геотехнічних систем вимагає постійного пошуку компромісу між економічною доцільністю та екологічною безпекою.

У сучасному науковому дискурсі, зокрема в методології системного аналізу якості навколишнього середовища, дослідження будь-якого об'єкта неможливе без чіткого визначення механізмів його взаємодії із зовнішнім світом. Жодна реальна система, чи то промислове підприємство, чи то природний біогеоценоз, не існує в абсолютному вакуумі. Вона завжди оточена середовищем, з яким перебуває в стані безперервного обміну. Опис цієї взаємодії здійснюється через фундаментальні категорії системного аналізу – поняття «входу» та «виходу», які виступають головними інструментами для якісної та кількісної оцінки стану досліджуваного об'єкта. Межа, що відокремлює систему від її оточення, є не просто фізичним чи умовним контуром, а активною контактною зоною, через яку проходять усі керуючі, ресурсні та деструктивні імпульси.

Поняття «входу» системи охоплює всю сукупність матеріальних, енергетичних та інформаційних потоків, які надходять із навколишнього середовища і здатні змінити її внутрішній стан або траєкторію розвитку. У контексті екологічного моніторингу та оцінки якості довкілля «вхід» може мати подвійну природу. З одного боку, це природні чинники: сонячна радіація, атмосферні опади, природний приплив поверхневих вод, що забезпечують життєдіяльність екосистеми. З іншого боку, це антропогенні збурення, такі як викиди забруднюючих речовин автомобільним транспортом, скиди стічних вод підприємств або теплове навантаження від міських агломерацій. Точний облік та класифікація вхідних сигналів дозволяють дослідникам зрозуміти обсяг тиску, якого зазнає система, та визначити ключові фактори впливу.

На противагу цьому, «виходом» системи є сукупність усіх результатів її внутрішнього функціонування, що виводяться назад у навколишнє середовище як відповідь на вхідні імпульси. «Вихід» демонструє, як саме система трансформувала отриману речовину, енергію чи інформацію. Для промислової системи вихідними параметрами є не лише корисна продукція, але й відходи виробництва, димові гази та шлами, які погіршують якість довкілля. Для природної екосистеми, що зазнала антропогенного навантаження на «вході», «виходом» може стати змінений хімічний склад дренажних вод, зниження біологічної продуктивності або деградація видового різноманіття. Аналіз вихідних потоків дає змогу оцінити ефективність внутрішньої структури системи та її здатність до самоочищення й адаптації.

Таким чином, розгляд системи через призму концепції «вхід – вихід» дозволяє застосувати метод «чорної скриньки», що є критично важливим при вивченні надскладних екологічних та геотехнічних комплексів. Коли внутрішні механізми природного об'єкта є занадто заплутаними або прихованими для миттєвого аналізу, саме порівняння параметрів на вході та виході дає можливість побудувати точні математичні моделі. Розуміння цієї двосторонньої взаємодії є теоретичною основою для розробки стратегій екологічного нормування, прогнозування техногенних ризиків та оптимізації управління якістю навколишнього середовища в епоху інтенсивного антропогенного тиску на біосферу.

Поняття границі системи є однією з ключових методологічних передумов системного аналізу якості довкілля. Границя фіксує просторове, часове або функціональне обмеження, яке відокремлює досліджуваний об'єкт від зовнішнього навколишнього середовища. У реальних екологічних дослідженнях границі рідко бувають абсолютно непроникними або чітко окресленими фізично. Найчастіше вони мають умовний або компромісний характер, який визначається метою моніторингу та масштабом дослідження. Наприклад, при оцінці якості водних ресурсів границя системи може збігатися з географічними межами річкового басейну, а при аналізі міського середовища – з адміністративними кордонами населеного пункту або контурами промислової зони. Встановлення точних границь дозволяє чітко розділити процеси, що відбуваються всередині системи, від зовнішніх факторів, які діють на неї ззовні. Саме через ці границі здійснюється двостороння взаємодія об'єкта з оточенням, яка описується через категорії вхідних впливів та вихідних реакцій.

Вхідні впливи на систему формують весь спектр зовнішніх імпульсів, які надходять через її границі й вимагають внутрішньої перебудови або адаптації. У системному аналізі навколишнього

середовища ці впливи традиційно поділяють на природні фактори та антропогенне навантаження. Природні чинники – такі як сонячна інсоляція, температурний режим, рівень атмосферних опадів, геологічна структура підстилаючих порід – утворюють природний фон і визначають базовий потенціал системи. Натомість антропогенне навантаження є результатом господарської діяльності людини й найчастіше виступає як дестабілізуючий фактор. Воно включає надходження хімічних забруднювачів від промислових підприємств, фізичне руйнування біотопів при будівництві, вилучення природних ресурсів або внесення надлишкової кількості біогенів з агроценозів. Сукупність цих вхідних параметрів визначає інтегральний тиск на систему, який змушує її зміщуватися з точки динамічної рівноваги.

Вихідні реакції системи є безпосередньою відповіддю її внутрішньої структури на отримані вхідні імпульси. Вони фіксуються на границях системи у вигляді змінених параметрів її функціонування і є головним індикатором екологічної якості. Основними формами вихідних реакцій є зміна показників якості, деградація або трансформація продуктивності. Зміна показників якості відображає первинний відгук системи на забруднення, наприклад, через зростання концентрації токсикантів у воді чи зниження індексу чистоти повітря. Якщо рівень антропогенного навантаження перевищує внутрішній буферний потенціал об'єкта, вихідною реакцією стає деградація – незворотне спрощення структури системи, руйнування її зв'язків, зникнення чутливих видів і втрата здатності до самоочищення. Водночас реакція може виражатися у зміні біологічної або господарської продуктивності, коли під дією зовнішніх чинників (наприклад, теплового забруднення чи евтрофікації) різко порушуються процеси біосинтезу та колообігу енергії. Аналіз цих вихідних реакцій дозволяє кількісно оцінити екологічні ризики та розробити ефективні керуючі рішення для збереження стабільності природних комплексів.

Параметри стану системи є сукупністю кількісних та якісних характеристик, які фіксують її фізіолого-екологічний або структурний зріз у конкретний момент часу. У системному аналізі якості довкілля ці параметри виступають головними маркерами екологічного моніторингу, дозволяючи перевести абстрактний стан природи у площину точних математичних метрик. Одним із найважливіших блоків таких параметрів є концентрації забруднювачів в абіотичних компонентах – атмосферному повітрі, поверхневих водах, донних відкладах та ґрунтах. Вони відображають ступінь техногенного тиску на хімічну матрицю системи. Проте для повноцінної оцінки життєздатності об'єкта хімічних показників недостатньо, тому їх обов'язково розглядають у синергії з індексами біорізноманіття (наприклад, індексами Шеннона, Сімпсона чи Бергера-Паркера). Ці індекси описують складність, вирівняність та стійкість біотичної структури системи. Високе біорізноманіття зазвичай свідчить про наявність великої кількості дублюючих зв'язків у трофічній мережі, що робить систему менш вразливою до зовнішніх шоків, тоді як різке падіння індексів є першим сигналом системної деградації.

Функціонування та виживання будь-якої відкритої системи у мінливому середовищі базується на понятті динамічної рівноваги, або гомеостазу. На відміну від статичної рівноваги у механіці, де об'єкт нерухомий, гомеостаз екологічної системи – це стан безперервного руху та балансування. Він підтримується за рахунок постійного обміну речовиною, енергією та інформацією, а також завдяки дії внутрішніх регуляторних петель негативного зворотного зв'язку. У стані гомеостазу інтегральні параметри системи (такі як загальна біомаса, рівень первинної продукції чи швидкість колообігу азоту) коливаються навколо певного оптимального значення, не виходячи за межі критичних порогів. Самовідновлення водойми після сезонного паводку або здатність лісового фітоценозу компенсувати наслідки посухи є класичними проявами гомеостатичних механізмів, які прагнуть зберегти ідентичність системи попри зовнішні пертурбації.

Невід'ємною умовою збереження динамічної рівноваги є стійкість системи до зовнішніх збурень, яку в екології поділяють на резистентну та пружну. Резистентна стійкість відображає здатність системи чинити опір зовнішньому тиску (наприклад, антропогенному навантаженню чи кліматичним аномаліям) і зберігати свій поточний стан незмінним протягом певного часу. Пружна стійкість (або еластичність) визначає швидкість і повноту повернення системи до вихідного гомеостатичного стану після того, як зовнішній дестабілізуючий чинник припинив свою дію.

Якщо амплітуда або тривалість зовнішнього збурення перевищує внутрішній буферний потенціал системи, вона проходить через так звану точку перелому (tipping point) і втрачає стійкість. У такому разі система або безповоротно руйнується, або зазнає якісної перебудови, переходячи у зовсім інший, часто збіднений або деградований стан функціонування.

Зворотні зв'язки є ключовими механізмами регуляції та динаміки в системах навколишнього середовища, які визначають, як система реагує на внутрішні чи зовнішні зміни. Вони виникають тоді, коли результат певного процесу в екосистемі безпосередньо впливає на його початкову причину. У системному аналізі докільця ці зв'язки поділяють на дві фундаментальні категорії: негативні та позитивні.

Негативні зворотні зв'язки відіграють стабілізуючу роль, оскільки вони спрямовані на придушення, послаблення або компенсацію відхилень, що виникають у системі. Вони повертають об'єкт до стану динамічної рівноваги, забезпечуючи його гомеостаз. Класичним прикладом є процес природного самоочищення водойм після помірного органічного забруднення. Надходження поживних речовин стимулює бурхливий розвиток мікроорганізмів і водоростей, які активно розкладають та засвоюють ці сполуки. У результаті їхньої життєдіяльності концентрація забруднювачів падає, ресурсна база вичерпується, і чисельність популяцій повертається до вихідного балансового рівня, захищаючи водну екосистему від деградації.

На противагу їм, позитивні зворотні зв'язки діють як каталізатори й призводять до посилення та прискорення початкових змін. Вони виводять систему з рівноваги, розхитують її структуру і часто стимулюють лавиноподібні, нелінійні процеси. Яскравим прикладом є танення полярної криги внаслідок глобального потепління. Підвищення температури повітря спричиняє танення льодовиків, що оголює темну поверхню океану чи суші. Оскільки вода й ґрунт мають значно нижче альbedo (відбивну здатність), ніж лід, вони поглинають набагато більше сонячної радіації. Це призводить до додаткового прогрівання регіону, що, у свою чергу, викликає ще інтенсивніше танення криги. Управління екологічною якістю вимагає своєчасного виявлення таких позитивних петель, оскільки вони здатні штовхнути екосистему до критичних точок неповернення.

Процеси керування та самоорганізації в екосистемах відображають здатність складних природних систем підтримувати свою цілісність без зовнішнього примусу. Самоорганізація базується на внутрішніх інформаційних та речовинних потоках, які координують взаємодію між видами. Механізми природної адаптації дозволяють біоті пристосовуватися до змін середовища на різних рівнях: від фізіологічних реакцій окремих особин до еволюційних змін у популяціях та перебудови всієї структури трофічних мереж. Процеси відновлення, або сукцесії, забезпечують загоєння системи після катастрофічних пошкоджень (наприклад, пожеж чи вирубок). У таких випадках екосистема послідовно змінює кілька тимчасових угруповань, крок за кроком регенеруючи свій початковий стан, біорізноманіття та баланс енергії.

На відміну від природної самоорганізації, антропогенне керування якістю докільця є цілеспрямованою діяльністю людини, спрямованою на свідоме регулювання техногенного тиску. Воно реалізується через систему екологічного менеджменту та інструменти екологічної політики, де центральне місце посідає нормування викидів. Цей процес полягає у встановленні юридично та науково обґрунтованих нормативів – гранично допустимих викидів (ГДВ) для атмосфери та гранично допустимих скидів (ГДС) для водних об'єктів. Державне нормування обмежує надходження забруднювачів на «вхід» природних систем таким чином, щоб їхня концентрація не перевищувала критичних порогів. Таке зовнішнє керування підтримує природний буферний потенціал екосистем, запобігаючи руйнації їхніх внутрішніх механізмів саморегуляції.

Ієрархічність та масштабність є фундаментальними просторово-часовими характеристиками, що визначають структуру організації живої матерії та характер системного аналізу якості докільця. Будь-який екологічний об'єкт не існує ізольовано, а входить до складу складної багаторівневої системи, де кожен вищий рівень виступає в ролі надсистеми для нижчих елементів і водночас є підсистемою для масштабніших утворень. Ця вертикальна підпорядкованість зумовлює специфіку передачі речовини, енергії та інформації, де процеси на мікрорівні безпосередньо впливають на макродинаміку глобальних біосферних процесів.

На найнижчому, локальному рівні дослідження фокусується на окремому біотопі (наприклад, ділянці лісу чи ставку) або на точковому антропогенному об'єкті, такому як конкретне підприємство-забруднювач. Вплив цього підприємства спочатку фіксується у межах його санітарно-захисної зони та найближчих локальних екосистем. Проте внаслідок транскордонного перенесення повітряних мас та стоку поверхневих вод локальне забруднення неминуче масштабується, інтегруючись у регіональні екосистеми. На цьому мезорівні, який охоплює річкові басейни, великі лісові масиви чи адміністративні області, виникають нові системні ефекти, зумовлені кумулятивною дією багатьох джерел тиску та природними особливостями ландшафту.

Найвищим ступенем цієї ієрархії є глобальна біосфера – мегасистема, яка об'єднує всі живі організми планети та їхнє середовище існування. На глобальному рівні сума регіональних екологічних змін трансформується у загальнопланетарні зрушення, такі як зміна клімату, глобальне виснаження озонового шару чи повсюдне зниження біорізноманіття. Системний аналіз доводить, що неможливо забезпечити стабільність біосфери без контролю за процесами на локальних та регіональних рівнях. Екологічний менеджмент XXI століття базується саме на розумінні цього масштабу: кожне керуюче рішення на рівні окремого підприємства має оцінюватися крізь призму його потенційного внеску в інтегральний стан глобальної екосистеми Землі.

Невизначеність та ризики є невід'ємними характеристиками системного аналізу якості довкілля, оскільки природні об'єкти належать до класу надскладних динамічних систем. Складність екологічних процесів зумовлена наявністю величезної кількості взаємопов'язаних елементів та перехресних петель зворотного зв'язку, де зміна одного параметра викликає ланцюгову реакцію по всій трофічній або геохімічній мережі. Ситуація ускладнюється фактором нелінійності: відгук екосистеми на зовнішнє антропогенне навантаження часто не є пропорційним силі впливу. До певного моменту система може компенсувати тиск, але при досягненні критичного порогу (точки перелому) навіть незначний додатковий імпульс здатний викликати лавиноподібний, стрибкоподібний перехід у принципово інший, часто деградований стан.

Додатковим джерелом невизначеності виступає стохастичність (випадковість) екологічних процесів. Природні системи функціонують в умовах постійних випадкових коливань кліматичних факторів, метеорологічних аномалій та спонтанних біологічних мутацій. Через таку імовірнісну природу точно передбачити поведінку об'єкта на тривалу перспективу стає неможливо, а екологічні ризики завжди мають статистичний характер. Це накладає суворі обмеження на застосування математичних та комп'ютерних моделей при прогнозуванні екологічних катастроф.

Будь-яка модель є спрощенням реальності й базується на дефіциті початкової інформації або на лінеаризації завідомо нелінійних зв'язків. Моделі добре працюють у межах стабільного гомеостазу, але часто виявляються безсилими перед прогнозуванням рідкісних, катастрофічних подій – так званих «чорних лебедів» екології (наприклад, раптового колапсу популяцій чи масштабного замору водойми). Системний аналіз XXI століття змушений відмовлятися від пошуку єдиного жорсткого прогнозу на користь сценарного моделювання, оцінки спектра ймовірностей та розробки гнучких стратегій управління екологічними ризиками в умовах високої невизначеності.

Сучасний екологічний стан планети, який характеризується масштабними трансформаціями біосферних процесів під впливом антропогенної діяльності, вимагає від науки та практики принципово нових методологічних підходів. Традиційні наукові методи, що базувалися на принципах класичного детермінізму та редуccionізму – прагнення розкласти складне явище на найпростіші складові, вивчити їх окремо, а потім механічно об'єднати результати – продемонстрували свою обмеженість у вирішенні глобальних та регіональних екологічних криз. Навколишнє середовище не є простою сумою хімічних елементів, фізичних полів та біологічних видів. Оно являє собою надскладну, динамічну, відкриту та нелінійну систему. Саме тому базовим інструментом для дослідження, прогнозування та управління станом довкілля став системний аналіз.

Системний аналіз якості навколишнього середовища – це міждисциплінарна наукова дисципліна та практична методологія, яка дозволяє розглядати природні об'єкти, людське

суспільство та технологічну інфраструктуру як єдине ціле. Центральним поняттям цього підходу є «система». Розуміння сутності системи, її фундаментальних властивостей та характеристик є ключем до усвідомлення того, як функціонує наше довкілля, чому воно здатне витримувати колосальні навантаження і де пролягає та межа, за якою починається незворотна деградація природного середовища.

Перехід від лінійного, пофрагментного сприйняття природи до системного мислення є головною передумовою успішного екологічного менеджменту. Коли ми розглядаємо навколишнє середовище через призму теорії систем, ми перестаємо бачити лише «брудну воду», «забруднене повітря» чи «зникнення лісу» як ізольовані проблеми. Замість цього ми починаємо розуміти ланцюги причинно-наслідкових зв'язків, які пов'язують роботу промислового підприємства, кліматичні флуктуації, міграцію хімічних речовин у ґрунтах, стійкість живих організмів та здоров'я людських популяцій. Цей суцільний текст присвячений детальному, фундаментальному розбору поняття системи та її характеристик у контексті аналізу якості довкілля.

Слово «система» має давньогрецьке походження і буквально означає «ціле, складене з частин» або «поєднання». У сучасному системному аналізі існує безліч визначень цього терміна, проте в контексті екологічних досліджень найбільш адекватним є таке: система – це впорядкована сукупність взаємопов'язаних та взаємодіючих елементів, яка утворює єдину цілісність, має специфічні властивості, що відсутні у її окремих частин, і взаємодіє з навколишнім середовищем як єдине ціле задля досягнення певної мети або виконання певної функції.

Щоб глибше зрозуміти це визначення, необхідно розібрати його складові. Будь-яка система складається з елементів. Елемент – це мінімальна, неподільна в межах даного дослідження частина системи. Що саме вважати елементом, залежить від масштабу та завдань еколога-аналітика. Наприклад, якщо ми аналізуємо якість води у невеликому озері на локальному рівні, елементами системи можуть виступати окремі популяції риб, фітопланктону, бактерій, а також хімічні компоненти водного розчину та донні відклади. Якщо ж об'єктом нашого системного аналізу є якість довкілля цілого промислового регіону, то елементами вже будуть виступати цілі великі підсистеми: промислові комплекси, міські агломерації, лісові масиви, річкові басейни та транспортні мережі.

Природні та природно-антропогенні системи мають низку унікальних особливостей, які кардинально відрізняють їх від технічних систем (машин, комп'ютерів, заводських агрегатів).

По-перше, технічні системи проектуються людиною штучно, їхня структура є жорстко детермінованою, а поведінка – передбачуваною (в ідеальних умовах). Екологічні системи формувалися в процесі тривалої еволюції. Їхня структура є гнучкою, адаптивною, а зв'язки між елементами мають переважно ймовірнісний, стохастичний характер. У технічній системі поломка одного гвинтика або мікросхеми найчастіше призводить до повної зупинки всього апарату. В екологічній системі вилучення або пошкодження одного елемента (наприклад, зникнення одного виду рослин) може тривалий час залишатися непоміченим для системи в цілому, оскільки інші елементи перебирають на себе його функції завдяки екологічній взаємозамінності та надмірності зв'язків.

По-друге, специфіка екологічних систем полягає в їхній унікальній здатності до самоорганізації та розвитку. Технічна система з часом лише зношується і збільшує свою внутрішню неупорядкованість, якщо її не ремонтувати ззовні. Природна система, отримуючи сонячну енергію, навпаки, здатна ускладнювати свою структуру, підвищувати рівень організації та протидіяти руйнівним процесам. Ця особливість є базовою при оцінці якості навколишнього середовища: ми аналізуємо не статичний об'єкт, а динамічний живий процес, який постійно реагує на наші впливи.

Прикладом складного природного об'єкта як системи є лісовий масив, наприклад, похідні ліси Словечансько-Овруцького кряжу. Розглядаючи цей ліс як систему, ми бачимо, що його якісний стан (здоров'я дерев, чистота джерел, багатство флори) визначається не просто кількістю дубів, сосен чи беріз на один гектар. Стан лісу – це результат складної мережі взаємодій між кореневими системами, мікроскопічними грибами (мікоризою), які забезпечують дерева мінеральним живленням, комахами-запилувачами, птахами, що регулюють чисельність

шкідників, характеристиками ґрунтових вод та кліматичними параметрами повітряного басейну. Якщо в цю систему впроваджуються інвазійні види рослин, наприклад, дуб червоний чи робінія звичайна, вони починають змінювати хімічний склад лісової підстилки та перехоплювати сонячне світло. У результаті змінюється вся структура зв'язків всередині системи, що призводить до зміни вектору динаміки лісу і, зрештою, до трансформації його загальної якості як природного комплексу.

Одним із найскладніших завдань у системному аналізі якості довкілля є правильне та обґрунтоване визначення меж системи. У техніці межа системи очевидна: це корпус приладу, стіни заводу або контур автомобіля. У природі чітких, видимих «стін» не існує. Будь-яка природна система плавно переходить в іншу, утворюючи так звані екотони – перехідні зони, які мають ознаки обох суміжних систем.

Межа системи в системному аналізі – це умовна або реальна лінія (поверхня), яка відокремлює досліджуваний об'єкт від зовнішнього середовища. Усе, що знаходиться всередині цієї межі, підпорядковується внутрішнім закономірностям системи і керується її структурою. Усе, що залишається ззовні, є для системи «навколишнім середовищем» (або зовнішнім середовищем). Важливо розуміти, що зовнішнє середовище – це не просто пасивне тло, це сукупність усіх об'єктів та факторів, які не входять до складу системи, але суттєво впливають на неї або самі зазнають її впливу.

Чому визначення меж екологічної системи є проблематичним і вимагає високої кваліфікації аналітика? Розглянемо приклад міського озера, якість води в якому різко погіршилася через масове цвітіння водоростей. Якщо ми визначимо межі системи суто по береговій лінії дзеркала води, то ми зафіксуємо параметри системи (концентрацію фосфатів, нітратів, рівень кисню), але ніколи не зможемо зрозуміти причин екологічної кризи і тим більше – управляти цією ситуацією. Для системного аналізу якості цього озера межі системи необхідно суттєво розширити. До складу системи слід включити весь водозбірний басейн – ту територію навколо озера, з якої дощові та талі води стікають у водойму. Тоді в поле зору аналітика потраплять сільськогосподарські поля, на які вносяться мінеральні добрива, приватний сектор із несправними каналізаційними септиками та автомобільні дороги. Берегова лінія в такому разі стає внутрішньою межею підсистем, а зовнішня межа системи пролягає по лініях вододілів.

Неправильно встановлені межі системи призводять до системних помилок в управлінні якістю довкілля. Якщо при будівництві великого тваринницького комплексу екологи обмежать межі аналізу лише земельною ділянкою підприємства та його локальними очисними спорудами, вони проігнорують той факт, що аміачні викиди в атмосферу будуть переноситися повітряними масами на десятки кілометрів і випадати у вигляді кислотних дощів на заповідні лісові масиви сусіднього регіону. У системному аналізі існує золоте правило: межа системи має проводитися там, де інтенсивність взаємодій між елементами всередині системи стає значно вищою, ніж інтенсивність їхніх взаємодій з об'єктами ззовні.

Фундаментальною основою системного аналізу є дослідження специфічних властивостей системи, головними серед яких є цілісність та емерджентність. Ці два поняття тісно пов'язані між собою і відображають головну філософську ідею системного підходу: ціле завжди є більшим і якісно іншим, ніж проста сукупність його частин.

Цілісність системи означає, що всі елементи об'єкта настільки міцно пов'язані між собою, що зміна або вилучення будь-якого з них неминуче призводить до трансформації всієї системи в цілому. Система функціонує як єдиний організм. У цілісній системі внутрішні зв'язки завжди домінують над зовнішніми. Якщо система втрачає цілісність, вона розпадається на ізольовані фрагменти, втрачає свою якість і припиняє існування як єдиний об'єкт.

Емерджентність (від англійського слова *emergence* – поява, виникнення) – це властивість системи, яка полягає у виникненні нових інтегративних якостей та характеристик на рівні системи в цілому, які принципово відсутні у кожного з її елементів окремо. Емерджентність є наслідком складної організації та синергетичної взаємодії елементів. Неможливо передбачити властивості системи, просто досконально вивчивши властивості її складових частин.

Яскравим прикладом емерджентності в екологічному системному аналізі є здатність водойми до самоочищення. Вода як хімічна сполука не має здатності самостійно очищатися від токсичних органічних домішок. Пісок, каміння на дні, молекулярний кисень, бактерії-деструктори, вища водяна рослинність та мікроскопічні рачки – жоден із цих елементів, перебуваючи в ізоляції, не здатний очистити річку від нафтового забруднення чи каналізаційних стоків. Однак, коли всі ці елементи об'єднуються у цілісну систему водного об'єкта і між ними встановлюються трофічні, хімічні та фізичні зв'язки, виникає нова, інтегративна властивість – асиміляційна ємність та здатність до біологічного самоочищення. Річка починає працювати як природний біофільтр. Якщо ми зруйнуємо хоча б одну ланку цієї системи (наприклад, знищимо донну мікрофлору хімічними отрутами), емерджентна властивість самоочищення зникне, і водойма перетвориться на мертву стічну канаву, попри те, що фізично вода, пісок і сонячне світло залишаться на місці.

Для еколога-аналітика розуміння емерджентності є критично важливим при нормуванні якості навколишнього середовища. Довгий час у практиці охорони природи панував редуціоністський підхід, заснований на концепції Гранично Допустимих Концентрацій (ГДК) окремих речовин. Стверджувалося: якщо концентрація речовини А в повітрі не перевищує норму, і концентрація речовини Б також у межах норми, то якість повітря є задовільною. Системний аналіз довів хибність цієї логіки через прояв синергетичного ефекту (одного з проявів емерджентності). Коли в атмосферному повітрі великого міста одночасно присутні кілька різних забруднювачів (наприклад, діоксид азоту, сірчистий ангідрид та дрібнодисперсний пил), їхній спільний негативний вплив на здоров'я людини та стан рослинності не просто додається, а взаємно посилюється в рази. Сумарний ефект системи забруднювачів є якісно іншим і набагато небезпечнішим, ніж вплив кожної речовини окремо. Це і є прояв негативної емерджентності антропогенно трансформованого середовища.

У системному аналізі надзвичайно важливо класифікувати досліджувані об'єкти за характером їхньої взаємодії із зовнішнім середовищем. Від цієї класифікації залежить вибір математичного апарату для моделювання та стратегія управління екологічною безпекою. Традиційно за цим критерієм системи поділяють на три великі класи: ізольовані, закриті та відкриті.

Ізольовані системи – це теоретичні, абстрактні системи, які взагалі не обмінюються із зовнішнім середовищем ні речовиною, ні енергією, ні інформацією. У реальному фізичному світі, а тим більше в екології, ізольованих систем не існує. Ця категорія використовується лише у фундаментальній фізиці та термодинаміці для побудови ідеалізованих моделей.

Закриті системи – це системи, які обмінюються із зовнішнім середовищем енергією (та інформацією), але не обмінюються речовиною. Межі такої системи є непроникними для матеріальних об'єктів та хімічних елементів, але пропускають тепло, світло або інші види випромінювання. У наближеному, масштабному вимірі прикладом закритої системи можна вважати планету Земля в цілому (біосферу). Вона отримує колосальну кількість енергії від Сонця у вигляді випромінювання і випромінює теплову енергію в космічний простір. При цьому обмін речовиною з космосом (падіння метеоритів або витік легких газів з атмосфери) є настільки нікчемним, що ним у більшості екологічних моделей нехтують.

Відкриті системи – це системи, які безперервно обмінюються із навколишнім середовищем і енергією, і речовиною, і інформацією. Абсолютно всі природні системи локального та регіонального рівнів (екосистема лісу, болота, річки, озера, океану, а також будь-який живий організм) є виключно відкритими системами. Функціонування відкритої системи можливе лише за умови постійного проходження крізь її межі наскрізного потоку речовини та енергії. Як тільки цей потік припиняється або суттєво блокується, система починає деградувати та руйнуватися.

Розглянемо відкриту систему лісового біогеоценозу. На «вхід» цієї системи безперервно надходить сонячна енергія, атмосферні опади у вигляді дощу та снігу, вуглекислий газ із повітря, а також мінеральні речовини, що утворюються внаслідок вивітрювання гірських порід. В середині системи відбувається трансформація цих ресурсів: рослини за допомогою фотосинтезу перетворюють сонячну енергію на хімічну енергію органічних сполук, яка далі передається по трофічних ланцюгах від трав'янистих тварин до хижаків та деструкторів. На «виході» із системи ми

маємо теплову енергію, яка розсіюється в просторі, кисень, що виділяється в атмосферу, воду, яка випаровується листям (транспірація) або стікає у підземні водоносні горизонти, а також органічні та мінеральні речовини, що вимиваються поверхневим стоком за межі лісу.

Для системного аналізу якості довкілля відкритість природних систем має фундаментальне значення. Це означає, що якість конкретного екологічного об'єкта ніколи не визначається лише його внутрішнім станом. Якщо ми хочемо підтримати високу якість природного заповідника, ми не можемо просто обнести його парканом та охороняти від бракон'єрів. Заповідник як відкрита система залежить від якості повітряних мас, які приносять хмари з сусідніх промислових областей, від чистоти річок, що беруть свій початок на територіях з інтенсивним агровиробництвом, та від міграційних шляхів тварин, які перетинають межі заповідної зони. Екологічне управління відкритими системами вимагає транскордонного, басейнового та комплексного підходу.

Саме по собі наявність елементів та відкритість кордонів не роблять сукупність об'єктів системою. Головним чинником, що перетворює хаотичний набір елементів на цілісну систему, є структура. Структура системи – це сукупність стійких зв'язків, відносин та взаємодій між елементами, які визначають архітектуру системи, її внутрішню організацію та забезпечують збереження її основних властивостей при зміні зовнішніх умов.

Зв'язки в екологічних системах надзвичайно різноманітні. Їх можна класифікувати за матеріальною природою:

- Речовинні зв'язки (перенесення маси, міграція хімічних елементів, трофічні ланцюги живлення).
- Енергетичні зв'язки (передача енергії від одного трофічного рівня до іншого, тепловіддача, радіаційний обмін).
- Інформаційні зв'язки (сигнальні взаємодії між живими організмами, хімічна комунікація за допомогою феромонів та фітонцидів, генетична інформація).

За просторовою та функціональною організацією в системному аналізі виділяють кілька базових типів структур: лінійні, ієрархічні, мережеві та матричні.

Лінійні структури характеризуються послідовним зв'язком елементів, де кожен попередній елемент взаємодіє лише з одним наступним. У чистому вигляді лінійні структури в природі зустрічаються рідко і є дуже вразливими. Прикладом спрощеної лінійної структури є класичний пасовищний трофічний ланцюг: рослина (продуцент) – заць (консумент першого порядку) – вовк (консумент другого порядку). Якщо з цієї структури вилучити середню ланку (зайця), ланцюг повністю розривається, і вся лінійна підсистема припиняє функціонування.

Ієрархічні (або деревоподібні) структури є набагато поширенішими і стійкішими. Вони базуються на принципі підпорядкованості, де елементи нижчого рівня входять до складу елементів вищого рівня як підсистеми. Уся біосфера побудована за ієрархічним принципом: організмовий рівень підпорядкований популяційно-видовому, той у свою чергу – біогеоценотичному (екосистемному), далі йде регіональний (ландшафтний) рівень, і нарешті – глобальний біосферний рівень. Ієрархічна структура забезпечує високу стабільність: локальні збурення на нижчих рівнях ієрархії згладжуються і компенсуються на вищих рівнях, не руйнуючи біосферу в цілому.

Мережеві структури є найбільш характерними для природних екосистем. Вони відрізняються тим, що кожен елемент може бути пов'язаний з багатьма іншими елементами системи без жорсткої вертикальної підпорядкованості. У реальному лісі чи болоті замість простих трофічних ланцюгів існують складні, розгалужені трофічні мережі. Один і той самий вид птахів може живитися десятками видів комах, а комах у свою чергу поїдають різні види земноводних, плазунів та ссавців. Мережева структура забезпечує колосальну надійність та стійкість системи якості довкілля. Якщо один із каналів зв'язку блокується (наприклад, через вимерзання зник один вид комах), потік речовини та енергії миттєво перенаправляється по десятках інших обхідних каналів мережі.

Для системного аналітика дослідження структури є першочерговим завданням при оцінці антропогенної трансформації середовища. Коли людина втручається в природу (будує греблі, вирубує ліси під агрогоддя, здійснює хімічне забруднення), вона насамперед руйнує природну

мережеву структуру зв'язків. Антропогенна трансформація ландшафтів майже завжди призводить до спрощення їхньої структури: складна мережа багатовидового первинного лісу замінюється лінійною або монокультурною структурою кукурудзяного поля чи штучного соснового насадження. Спрощення структури системи автоматично означає катастрофічну втрату її стійкості. Моносистема стає беззахисною перед шкідниками, хворобами та кліматичними аномаліями, що вимагає постійного штучного підтримання її якості з боку людини (внесення пестицидів, добрив, полив).

Функціонування будь-якої складної динамічної системи, здатної реагувати на зовнішні впливи та підтримувати свій якісний стан, базується на механізмі зворотних зв'язків. Зворотний зв'язок – це процес, за якого результат функціонування системи (її вихідний сигнал) безпосередньо або через ланцюг інших елементів впливає на вихідні параметри або на поведінку самої системи (вхідний сигнал). Простіше кажучи, це ситуація, коли елемент А впливає на елемент Б, а елемент Б у свою чергу чинить зворотний вплив на елемент А.

У системному аналізі зворотні зв'язки поділяють на два фундаментальні типи: негативні та позитивні. Їхня роль в управлінні якістю навколишнього середовища є діаметрально протилежною.

Негативний зворотний зв'язок – це механізм взаємодії, який спрямований на зменшення, пригнічення або компенсацію первинного відхилення параметрів системи від її нормального, рівноважного стану. Негативний зворотний зв'язок діє за принципом протидії: якщо якийсь показник системи надмірно зростає, механізм зворотного зв'язку прагне його знизити; якщо показник падає – прагне його підвищити. Саме негативні зворотні зв'язки є головними архітекторами стабільності, гомеостазу та саморегуляції в природі.

Розглянемо класичний приклад негативного зворотного зв'язку в системі контролю якості водного об'єкта при природному надходженні органічних речовин (наприклад, змив листя восени). Коли в озеро потрапляє надмірна кількість органіки, це стає потужним джерелом їжі для бактерій-деструкторів. Бактерії починають бурхливо розмножуватися, їхня чисельність стрімко зростає. Велика кількість бактерій починає інтенсивно розщеплювати та мінералізувати органічні сполуки, перетворюючи їх на прості мінеральні солі та вуглекислий газ. У результаті їхньої діяльності концентрація органічного забруднення в озері падає і повертається до початкового природного рівня. Зі зменшенням кількості їжі чисельність самих бактерій також скорочується через голод. Система повернулася в стан рівноваги.

Позитивний зворотний зв'язок – це механізм, який спрямований на посилення, прискорення та мультиплікацію первинного відхилення параметрів системи від стану рівноваги. Позитивний зворотний зв'язок діє за принципом лавини або снігової кулі: якщо якийсь показник починає зростати, механізм зв'язку стимулює його ще більший і швидший ріст. Позитивні зворотні зв'язки ведуть до дестабілізації системи, руйнування її структури, виходу параметрів за критичні межі та катастрофічних якісних змін.

Яскравим і небезпечним прикладом домінування позитивного зворотного зв'язку є процес антропогенного евтрофування (заболочування та цвітіння) водойм внаслідок надмірного скидання фосфатних миючих засобів та добрив. Коли у воду потрапляє критична маса фосфору, починається вибухоподібне розмноження синьо-зелених водоростей (фітопланктону). Водорості утворюють щільну плівку на поверхні води, яка повністю перекриває доступ сонячного світла вглиб озера. Через брак світла придонні вищі водорості починають масово гинути. Це призводить до накопичення колосальної маси мертвої органіки на дні. Бактерії, що розкладають цю органіку, починають споживати весь розчинений у воді кисень. У водоймі виникає гострий дефіцит кисню (аноксія). Через брак кисню починається масовий замор риби, молюсків та ракоподібних. Їхні мертві тіла падають на дно і стають новим додатковим джерелом органічного забруднення, яке стимулює ще більше розмноження бактерій, ще сильніший дефіцит кисню і повне знищення екосистеми озера. Первинне невелике забруднення запустило ланцюг подій, який сам себе посилює і веде до повної загибелі системи.

У системному аналізі якості довкілля головне завдання управління полягає в тому, щоб вчасно виявляти та пригнічувати позитивні зворотні зв'язки, що ведуть до екологічного колапсу, і

підтримувати природні негативні зворотні зв'язки, які забезпечують безкоштовні екосистемні послуги з самоочищення середовища.

Здатність екологічних систем протидіяти зовнішнім збуренням та зберігати параметри своєї якості в певних безпечних межах описується двома найважливішими системними характеристиками – гомеостазом та стійкістю.

Гомеостаз (від грецьких слів *homoios* – однаковий, подібний та *stasis* – стан, нерухомість) – це здатність системи підтримувати динамічну рівновагу своїх внутрішніх параметрів, структури та функцій у відповідь на зміни, що відбуваються в зовнішньому середовищі або всередині самої системи. Важливо наголосити, що гомеостаз у природі – це не статичний, замерзлий стан. Це «рухома рівновага» (або квазістаціонарний стан), за якої всі ключові макропараметри системи (наприклад, температура планети, газовий склад атмосфери, кислотність морської води) здійснюють постійні коливання навколо певного оптимального значення, але ніколи не виходять за критичні межі завдяки злагодженій роботі тисяч контурів зворотних зв'язків.

Стійкість системи в системному аналізі доквілля – це її здатність витримувати зовнішні антропогенні та природні навантаження (тиск), зберігаючи при цьому свою базову структуру, функціональні зв'язки та емерджентні властивості, або самостійно повертатися до початкового стану рівноваги після того, як зовнішній тиск припинився.

У системній екології розрізняють два типи стійкості:

- Пружна стійкість (резистентність) – здатність системи чинити опір зовнішньому тиску, залишаючись практично незмінною. Система діє як жорстка стіна. Наприклад, зріла діброва має високу пружну стійкість до короткочасних посух: глибокі кореневі системи дерев дістають воду з підземних горизонтів, і ліс зовні ніяк не змінює свого стану.

- Пластична стійкість (пружність або *resilience*) – здатність системи зазнавати значних деформацій, змін структури та чисельності елементів під впливом потужного удару, але потім швидко відновлювати свій первісний якісний стан завдяки внутрішнім резервам та адаптивності. Система діє як гумова стрічка або пружина. Прикладом є лучна екосистема або пойма річки після масштабної повені чи випалювання сухої трави: біомаса знищена, але за рахунок збереженого в ґрунті насіння та кореневищ луг за один-два сезони повністю відновлює свою якість.

Стійкість навколишнього середовища не є безмежною. Кожна система має свій внутрішній резерв стійкості (ємність системи). Поки антропогенне навантаження знаходиться в межах цього резерву, система успішно справляється з ним за рахунок механізмів гомеостазу. Проте, якщо тиск перевищує певну критичну точку (поріг стійкості), внутрішні зв'язки руйнуються, негативні зворотні зв'язки вимикаються, і система зазнає системного переходу – стрибкоподібного переходу в абсолютно новий якісний стан, який найчастіше характеризується деградацією, спрощенням структури та втратою корисної для людини цінності середовища. Повернути систему з цього нового стану до початкового зазвичай або неможливо, або вимагає колосальних фінансових та енергетичних витрат з боку людства.

Якість навколишнього середовища як об'єкта дослідження ускладнюється тим, що екологічні системи належать до класу надскладних та нелінійних систем. Ці дві характеристики зумовлюють специфічну, часто парадоксальну поведінку доквілля, яка ставить у безвихідь класичних управлінців.

Складність системи визначається не просто великою кількістю елементів (мільйони тонн води чи трильйони бактерій), а насамперед колосальною кількістю та різноманітністю зв'язків між ними, наявністю багатьох рівнів ієрархії та високим ступенем невизначеності. У складній системі кожен елемент знаходиться в одночасній залежності від сотень інших чинників.

Зі складності логічно випливає нелінійність системи. Лінійне мислення, до якого звикла людина, базується на принципі пропорційності: якщо ми вдвічі збільшимо силу впливу, то результат також збільшиться вдвічі; якщо причина є незначною, то й наслідки будуть мізерними. У нелінійних екологічних системах цей принцип не працює. Нелінійність означає, що реакція системи на зовнішній вплив не є пропорційною цьому впливу і залежить від поточного стану самого об'єкта.

В умовах нелінійності тривалий час значний антропогенний тиск може викликати ледь помітні, лінійні зміни в довкіллі. Але при досягненні критичного порогу навіть мікроскопічний додатковий вплив (остання крапля) запускає вибухову, лавиноподібну реакцію системи. У теорії систем це явище пов'язане з поняттям детермінованого хаосу, або так званого «ефекту метелика». Цей термін ілюструє ідею про те, що помах крил метелика в одній частині планети може через складний ланцюг нелінійних атмосферних взаємодій викликати ураган в іншій півкулі.

Стосовно моніторингу якості навколишнього середовища нелінійність створює величезні труднощі для довгострокового прогнозування. Розглянемо поведінку системи тайги або тундри в умовах глобального потепління. Підвищення середньорічної температури на невелику частку градуса спочатку викликає лише незначне зміщення меж рослинності. Однак це незначне потепління запускає процес танення вічної мерзлоти. У мерзлоті заблоковані колосальні об'єми метану – потужного парникового газу, який за своїм ефектом значно перевершує вуглекислий газ. Танення мерзлоти вивільняє метан, який потрапляє в атмосферу і різко посилює парниковий ефект, що призводить до ще більш стрімкого танення мерзлоти. Система виходить із-під контролю, демонструючи нелінійну, вибухову поведінку, яку неможливо передбачити за допомогою простих графіків екстраполяції.

Поведінка системи – це її здатність змінювати свій стан, переходити з одного стану в інший з плином часу під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів. Через нелінійність поведінка довкілля часто має запізнений характер (часовий лаг). Наслідки екологічного злочину чи неправильного проекту природокористування можуть проявитися не відразу, а через роки або навіть десятиліття, коли зміняться покоління елементів системи. Це вимагає від системного аналітика розробки динамічних моделей, які здатні зазирнути далеко в майбутнє і врахувати приховані системні затримки.

Однією з найважливіших архітектурних характеристик навколишнього середовища є його ієрархічність (багаторівневність). Принцип ієрархічності (або принцип інтегративних рівнів) стверджує, що весь матеріальний світ організований у вигляді вертикальної структури підпорядкованих один одному рівнів, де кожен вищий рівень утворений з елементів нижчого рівня, але має свої унікальні емерджентні властивості, які не зводяться до властивостей складових. Для системного аналізу якості довкілля розуміння ієрархічності є ключовим з кількох причин.

По-перше, процеси та закони, які діють на одному рівні ієрархії, категорично не можна автоматично переносити на інші рівні. Те, що є благом для окремого організму, може виявитися катастрофою для популяції чи екосистеми, і навпаки. Наприклад, якщо ми внесемо на поле потужний мінеральний засіб для стимулювання росту окремої рослини кукурудзи, ми покращимо її індивідуальну якість. Але на рівні екосистеми змив цих добрив дощами у сусідню річку викличе евтрофування і загибель усього водного біоценозу.

По-друге, ієрархічність вимагає від аналітика правильного масштабування при побудові моделей та систем моніторингу. Неможливо оцінити якість повітря планети за допомогою одного датчика на вулиці Житомира. Так само не можна управляти екологічною безпекою міста, спираючись лише на глобальні супутникові знімки біосфери. Кожен рівень ієрархії вимагає своїх специфічних індикаторів, методів вимірювання та інструментів управління. При цьому вищі рівні завжди виступають як обмежувачі (рамки) для нижчих рівнів: стан біосфери диктує кліматичні рамки для розвитку конкретного лісового ландшафту, а стан ландшафту визначає ресурси для існування конкретних популяцій.

При оцінці та моделюванні якості навколишнього середовища однією з найважливіших граничних характеристик системи є пропускну спроможність (або ємність навколишнього середовища). Ця концепція лежить в основі розробки стратегій сталого розвитку та визначення екологічних меж економічного зростання.

Ємність навколишнього середовища – це максимальний рівень антропогенного навантаження (вилучення природних ресурсів, залучення територій, скидання відходів та забруднюючих речовин), який екологічна система здатна витримати протягом тривалого часу без незворотного руйнування своєї структури, втрати саморегуляторних функцій та погіршення своїх основних якісних параметрів.

Ємність середовища є комплексною характеристикою і складається з кількох підсистемних ємностей:

- Ресурсна ємність – межа вилучення відновлюваних природних ресурсів (води, деревини, риби), перевищення якої веде до їхнього повного виснаження та зникнення, оскільки швидкість споживання стає вищою за швидкість природного відтворення.
- Просторова (територіальна) ємність – гранична площа території, яка може бути вилучена під будівництво міст, доріг та заводів без порушення екологічного балансу ландшафту, який підтримується за рахунок збережених диких природних територій.
- Асиміляційна ємність – здатність системи поглинати, нейтралізувати, переробляти та виводити зі свого контуру забруднюючі речовини (токсиканти) завдяки внутрішнім хімічним, фізичним та біологічним процесам самоочищення, не змінюючи при цьому свій якісний стан.

Яскравим прикладом порушення асиміляційної ємності є хронічне забруднення атмосфери великих промислових центрів вихлопними газами автотранспорту. Поки кількість автомобілів невелика, зелені насадження міста (парки, сквери, лісосмуги) успішно поглинають вуглекислий газ, затримують пил та виділяють фітонциди, які знешкоджують патогени. Повітряний басейн за рахунок вітрового перемішування та турбулентної дифузії швидко очищується. Але як тільки інтенсивність руху перевищує асиміляційну ємність урбоєкосистеми, зелені насадження починають хворіти і всихати через отруєння свинцем та оксидами азоту. Процес самоочищення блокується, і місто занурюється в хронічний токсичний зміг.

В системному аналізі розрахунок ємності середовища є основою для так званого екологічного проектування та екологічного аудиту. Будь-яка господарська діяльність має плануватися не з позицій «скільки ми хочемо отримати прибутку», а з позицій «якою є вільна асиміляційна ємність даної природної системи». Перевищення цієї ємності є перетином червоної лінії, за якою починається лавиноподібна деградація середовища.

Стан екологічної системи та параметри його оцінки

У будь-який момент часу екологічна система характеризується певним станом. Стан системи – це сукупність суттєвих властивостей та параметрів об'єкта в даний часовий проміжок, які відображають його внутрішню динаміку, рівень організації, якість функціонування та характер взаємодії із зовнішнім середовищем.

Для оцінки стану в системному аналізі якості докільця використовують три великі групи параметрів: параметри входу, параметри стану (внутрішні змінні) та параметри виходу.

Параметри входу характеризують усі потоки речовини, енергії та інформації, які надходять у систему ззовні. Стосовно екологічного аналізу якісними параметрами входу є кліматичні фактори (кількість опадів, тривалість сонячного сьйва), а також антропогенне навантаження – обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферу від фабрик, скиди стічних вод, кількість внесених на поля добрив.

Параметри стану (внутрішні змінні) – це показники, які описують безпосередній внутрішній зміст системи в даний момент. Сюди належать: видове багатство екосистеми, чисельність та біомаса ключових видів організмів, концентрація хімічних елементів у різних депо середовища (у воді, ґрунті, тканинах рослин), рівень внутрішньої організації та ентропії.

Параметри виходу відображають результат функціонування системи, те, що вона виділяє чи повертає у зовнішнє середовище. Наприклад, для лісового масиву параметрами виходу є об'єм кисню, що надходить в атмосферу, об'єм і чистота води, яка профільтрувалася через лісову підстилку і поповнила річки, а також об'єм деревини або інших ресурсів, які вилучає людина.

Оцінка стану системи є основою для встановлення екологічного діагнозу. У системному аналізі стан середовища класифікують за шкалою від нормального (природного) до катастрофічного. Нормальним вважається стан, за якого система повністю зберігає свій гомеостаз, структуру, емерджентні властивості та має максимальний резерв стійкості. Кризовим (або стресовим) є стан, коли під впливом антропогенного тиску резерв стійкості вичерпується, система починає втрачати другорядні елементи та зв'язки, а параметри стану наближаються до критичних меж. Катастрофічний стан означає повне руйнування структури системи, вимикання контурів

саморегуляції, втрату цілісності та перехід об'єкта в стан незворотної деградації (наприклад, перетворення лісу на пустелю, а озера – на болото).

Головне завдання системного екологічного моніторингу – вчасно зафіксувати перші симптоми переходу системи з нормального стану в кризовий, використовуючи так звані індикатори стану (види-біоіндикатори або специфічні хімічні маркери), щоб встигнути вжити керуючих заходів до того, як відбудеться системний перехід у катастрофічний стан.

Кінцевою практичною метою вивчення системи та її характеристик у рамках даної дисципліни є розробка методології управління якістю довкілля та мінімізація екологічних ризиків. Екологічний ризик у системному аналізі – це ймовірність настання несприятливих, негативних змін у стані навколишнього середовища (або окремих його підсистем) внаслідок антропогенного впливу чи природних катастроф, які оцінюються за масштабністю наслідків для біосфери та здоров'я людини.

Системний підхід до аналізу ризиків кардинально відрізняється від класичного інженерного підходу. Інженерний підхід оцінює ризик аварії конкретного апарату: яка ймовірність того, що на заводі прорве трубу з хімікатами. Системний екологічний аналіз починає свою роботу там, де інженерна аварія вже відбулася, і досліджує поведінку всієї мегасистеми довкілля у відповідь на цей удар.

Процес системного аналізу екологічних ризиків включає кілька обов'язкових етапів, кожен з яких спирається на розглянуті вище характеристики системи:

- Ідентифікація джерела небезпеки та визначення меж системи. На цьому етапі аналітик чітко окреслює просторові та часові кордони, в межах яких буде досліджуватися ризик. Наприклад, при оцінці ризику будівництва нового радіаційного сховища межі системи встановлюються не по паркану об'єкта, а охоплюють усі підземні водоносні горизонти та трофічні мережі регіону на десятиліття вперед.

- Аналіз структури зв'язків та шляхів міграції. Досліджується, як саме токсична речовина або фактор небезпеки буде переміщатися всередині системи. Будуються концептуальні моделі мереж, які показують ланцюги перенесення: від викиду в повітря – через випадання з опадами на ґрунт – через поглинання корінням рослин – до потрапляння в їжу тварин і, зрештою, на стіл до людини.

- Оцінка чутливості та стійкості системи (гомеостатичного потенціалу). Аналітик з'ясовує, чи здатна система самостійно асимілювати та нейтралізувати цей ризик за рахунок негативних зворотних зв'язків та процесів самоочищення. Визначається поріг стійкості системи: яка концентрація речовини є критичною для руйнування цілісності об'єкта.

- Оцінка нелінійних ефектів та кумулятивного ризику. Враховується той факт, що ризик від нового підприємства буде накладатися на вже існуюче забруднення середовища. Оцінюються синергетичні ефекти взаємодії різних речовин та ймовірність лавиноподібного погіршення стану екосистеми при перетині порогів стійкості.

- Розробка прогностичних сценаріїв та алгоритмів управління. На основі зібраних даних будуються імітаційні моделі поведінки системи за принципом «що буде, якщо...». Моделюються різні варіанти розвитку подій: оптимістичний (система справляється з навантаженням), песимістичний (відбувається екологічна катастрофа та перехід у деградований стан) та управлінський (впроваджуються технології захисту та відновлення середовища).

Системний аналіз доводить, що намагання повністю ліквідувати будь-які ризики в нашому техногенному світі є ілюзією. Головне завдання екологічного менеджменту полягає в оптимізації системи – підтриманні такого балансу у взаємодії між людським суспільством, технікою та природою, за якого антропогенний тиск ніколи не перевищує пропускну спроможність та асиміляційну ємність навколишнього середовища. Якість довкілля є найвищою цінністю, оскільки саме вона забезпечує біологічні та соціальні умови для існування самої людської цивілізації. Розгляд природи як складної, цілісної, емерджентної системи є єдиним науковим шляхом до подолання глобальних криз та переходу до епохи гармонійного співіснування людини і біосфери.

Питання та завдання для самоконтролю

Теоретичні запитання:

1. Що таке екологічна система в контексті системного аналізу і які її головні відмінності від технічних систем?
2. Дайте визначення поняттю «межі системи» стосовно об'єктів навколишнього середовища та поясніть складнощі їх визначення.
3. Охарактеризуйте властивість цілісності (емерджентності) екосистеми та наведіть приклад її прояву при оцінці якості довкілля.
4. Які системи називаються відкритими і чому всі природні екологічні системи належать саме до цього класу?
5. Опишіть поняття структури системи та поясніть, як зміна структури впливає на функціонування природно-антропогенних комплексів.
6. Що таке синергетичний ефект у системному аналізі якості навколишнього середовища і як він проявляється при комбінованому забрудненні?
7. Поясніть сутність властивості гомеостазу екологічної системи та механізм її підтримання.
8. Яку роль відіграють зворотні зв'язки (позитивні та негативні) у стабілізації чи деградації стану довкілля?
9. Дайте оцінку поняттю «стійкість системи» та назвіть основні види стійкості біосферних систем до антропогенного навантаження.
10. Як у системному аналізі екологічних об'єктів трактується характеристика «складність системи»?
11. Поясніть різницю між поняттями «функція системи» та «поведінка системи» на прикладі моніторингу якості атмосферного повітря.
12. Що таке ієрархічність (багаторівневність) екологічних систем і як цей принцип враховується при моделюванні навколишнього середовища?
13. Охарактеризуйте властивість адаптивності природних систем в умовах глобальних кліматичних змін та техногенного пресингу.
14. Поясніть поняття «пропускна спроможність системи» (ємкості середовища) як граничної характеристики екосистеми.
15. Що розуміють під станом екологічної системи і за якими основними параметрами його оцінюють у системному аналізі?
16. Як властивість нелінійності розвитку екологічних систем ускладнює прогнозування якості навколишнього середовища?
17. Визначте поняття «критична точка» (або поріг стійкості) системи та наслідки її перетину для природного середовища.
18. Опишіть сутність інформаційних взаємодій всередині екосистем та їхнє значення для збереження якісних характеристик біосфери.
19. Що таке еволюційність системи і як природний розвиток довкілля співвідноситься з антропогенною трансформацією?
20. Яким чином цільова спрямованість (цілепокладання) використовується при управлінні якістю навколишнього природного середовища як складною системою?

Тестові завдання

Яка властивість екологічної системи відображає появу нових інтегративних якостей на рівні цілого, що відсутні у її окремих компонентів?

- А) Адаптивність
- Б) Емерджентність
- В) Гомеостаз
- Г) Ієрархічність

До якого класу систем за характером взаємодії з навколишнім середовищем належать усі природні екосистеми?

- А) Закриті системи
- Б) Ізольовані системи
- В) Відкриті системи
- Г) Статичні системи

Як у системному аналізі якості довкілля називається здатність системи повертатися до стану динамічної рівноваги після зовнішнього антропогенного впливу?

- А) Синергізм
- Б) Стійкість системи
- В) Структурованість
- Г) Еволюційність

Що відбувається в екологічній системі, якщо в ній починає домінувати позитивний зворотний зв'язок після скидання забруднюючих речовин?

- А) Система стабілізує свій якісний стан
- Б) Посилюються процеси самоочищення середовища
- В) Відбувається стрімке відхилення від рівноваги та деградація системи
- Г) Система переходить у стан ізоляції

Яка характеристика визначає сукупність стійких зв'язків та взаємодій між елементами екологічної системи, що забезпечують її цілісність?

- А) Функція системи
- Б) Стан системи
- В) Поведінка системи
- Г) Структура системи

Як називається явище, коли сумарний токсичний ефект від одночасної дії кількох забруднювачів перевищує просту суму їхніх індивідуальних впливів?

- А) Гомеостаз
- Б) Синергетичний ефект
- В) Диференціація
- Г) Адитивність

Яка властивість екосистеми забезпечує її здатність підтримувати стабільність своїх внутрішніх параметрів (наприклад, хімічного складу води чи повітря) через внутрішні регуляторні механізми?

- А) Гомеостаз
- Б) Ієрархічність
- В) Нелінійність
- Г) Емерджентність

Що є «входом» у системі моніторингу якості навколишнього середовища з погляду теорії систем?

- А) Екологічні стандарти та нормативи (ГДК)
- Б) Первинні дані вимірювань концентрацій забруднюючих речовин
- В) Прогнозні моделі розвитку екологічної ситуації
- Г) Управлінські рішення щодо обмеження викидів підприємств

Яка системна характеристика описує граничну здатність екосистеми витримувати антропогенне навантаження без незворотного порушення її структури та функцій?

- А) Еволюційність середовища
- Б) Пропускна спроможність (ємність) середовища
- В) Дискретність системи
- Г) Невизначеність системи

Розрахунок індексів якості води на основі спостережень за багатьма гідрохімічними показниками є прикладом реалізації якого системного принципу?

- А) Декомпозиції системи

- Б) Агрегування інформації
- В) Ізоляції підсистем
- Г) Випадкового пошуку

Ситуаційні задачі

На промисловому підприємстві модернізували очисні споруди, встановивши новітні фільтри для вловлювання конкретного газоподібного забруднювача. Однак за кілька місяців з'ясувалося, що загальний екологічний тиск на місцеву екосистему не зменшився, оскільки уловлена речовина у процесі утилізації почала потрапляти у стічні води у більш токсичній формі. Поясніть цей результат з позицій властивості цілісності системи та ефекту перенесення проблеми між підсистемами довкілля.

Екологічна інспекція зафіксувала одночасне скидання у водойму відходів від деревообробного заводу та хімічного комбінату. Окремо кожен із цих видів стоків у наявних концентраціях не викликав масової загибелі гідробіонтів під час лабораторних тестів, але їхнє змішування у річці призвело до екологічної катастрофи. Яку властивість системи та який специфічний системний ефект ілюструє ця ситуація?

Гірська лісова екосистема протягом тривалого часу зазнавала впливу атмосферних викидів металургійного підприємства, проте її зовнішній вигляд, видовий склад та ключові функції залишалися візуально незмінними. Проте після незначного літнього паводку відбулося раптове і масштабне всихання дерев та руйнування ґрунтового покриву. Опишіть поведінку системи, використовуючи поняття гомеостазу, внутрішнього резерву стійкості та критичної точки (порогу) переходу системи в новий стан.

У степовому заповіднику з метою охорони рідкісних видів рослин повністю заборонили випас копитних тварин та будь-яке втручання людини. Замість очікуваного розквіту біорізноманіття, через кілька років заповідна ділянка заросла чагарниками та агресивними бур'янами, що призвело до зникнення тих самих охоронюваних видів. Проаналізуйте помилку в управлінні екосистемою з погляду ігнорування її властивості як відкритої системи та порушення природних зв'язків між підсистемами.

Під час проектування нового водосховища автори проекту врахували лише гідрологічні та геологічні параметри території. Після наповнення чаші водосховища піднявся рівень ґрунтових вод, що викликало підтоплення навколишніх сіл, зміну мікроклімату регіону та масове розмноження синьо-зелених водоростей. Який принцип системного аналізу щодо визначення меж системи та врахування зв'язків із навколишнім середовищем було порушено?

Державна служба моніторингу аналізує якість атмосферного повітря великого міста. Для цього використовуються дані постів спостереження, інформація про інтенсивність руху автотранспорту, метеорологічні умови та технологічні звіти фабрик. Усі ці розрізнені дані об'єднуються в єдину інформаційну мережу для прийняття рішень мерією. Визначте, що в цій системі управління якістю середовища виступає як «вхід», «структура», «процес» та «вихід».

Озеро, що розташоване поруч із аграрними угіддями, регулярно отримує змиви мінеральних добрив. Спочатку екосистема успішно компенсувала цей вплив за рахунок розростання вищої водної рослинності. Проте згодом процес набув лавиноподібного характеру: розмноження мікробіотів спричинило дефіцит кисню, загибель риби, загнивання біомаси, що ще більше погіршило якість води. Охарактеризуйте зміну типу зворотного зв'язку в системі (від негативного до позитивного) у процесі її деградації.

Для боротьби зі шкідником лісу в екосистему штучно завезли новий вид комахоїдних птахів. Новий вид успішно знищив шкідника, але згодом витіснив корінних співочих птахів, переключився на поїдання корисних комах-запилювачів і спричинив спалах хвороб серед лісової фауни. Поясніть, чому спроба точкового керування складною природною системою без урахування її емерджентних властивостей призвела до непередбачуваної поведінки об'єкта.

Науковці досліджують вплив глобального потепління на зону тундри. Вони виявили, що танення вічної мерзлоти призводить до виділення парникових газів, які, потрапляючи в

атмосферу, посилюють парниковий ефект, що викликає ще більш інтенсивне танення мерзлоти. Визначте архітектуру цього процесу з позицій теорії систем та опишіть роль цього контуру взаємодії у втраті стійкості екосистеми.

Регіональний ландшафтний парк поділений на кілька зон: заповідну, рекреаційну та господарську. Кожна зона функціонує за своїми правилами, але разом вони забезпечують збереження біорізноманіття всього регіону та сталий розвиток місцевих громад. Охарактеризуйте цю структуру за допомогою принципу ієрархічності та поясніть, чому якість функціонування всього парку не тотожна функціонуванню лише однієї з його зон.

ХОЛІСНИЙ ПІДХІД ДО ВИВЧЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Холісний (цілісний) підхід є світоглядним та методологічним ядром системного аналізу якості навколишнього середовища. Його головний постулат базується на знаменитій аристотелівській тезі: ціле завжди більше за просту суму його частин. У ХХІ столітті, на тлі безпрецедентного антропогенного тиску на біосферу, класичний науковий редукціонізм, який намагався вивчати екологічні об'єкти через розчленування їх на ізольовані елементи, виявився безсилим перед обличчям глобальних криз. Холізм пропонує принципово інший оптику дослідження. Він зміщує фокус аналізу з вивчення окремих гвинтиків – концентрації конкретної речовини у воді чи фізіології одного виду – на архітектуру зв'язків, нелінійні динамічні процеси та наскрізні потоки речовини, енергії й інформації. Саме в межах холістичної парадигми виникає поняття емерджентності, коли інтеграція компонентів породжує абсолютно нові системні якості доквілля, такі як гомеостаз, самоочищення та стійкість. Освоєння холістичного підходу дозволяє майбутнім фахівцям сприймати навколишнє середовище не як набір ізольованих геосфер, а як єдину, чутливу соціо-екологічну систему, де локальне втручання здатне викликати лавиноподібні відгуки на глобальному рівні.

Філософсько-методологічні витоки холізму сягають корінням глибокої давнини, беручи свій початок у натурфілософських концепціях античності. Сам термін походить від грецького слова «holos», що означає «цілий», «весь», «інтегральний». Ще Аристотель у своїй «Метафізиці» сформулював засадничу ідею цього напрямку, зазначивши, що ціле завжди є чимось більшим, ніж проста сума його складових частин. Проте як самостійна філософсько-наукова концепція холізм оформився лише у першій половині ХХ століття. Офіційне формулювання та легітимізацію принципу холізму здійснив південноафриканський філософ і політичний діяч Ян Смятс у своїй фундаментальній праці «Холізм та еволюція» (1926). Він запропонував розглядати холізм як універсальну рушійну силу еволюції, яка спрямовує розвиток Всесвіту шляхом створення дедалі складніших, інтегрованих та саморегульованих цілісностей.

В історії науки розвиток холізму відбувався через жорстке інтелектуальне протиставлення класичному науковому редукціонізму, який панував у природознавстві з епохи Ньютона та Декарта. Редукціонізм стверджував, що будь-яку складну систему можна повністю зрозуміти й описати через її розчленування на найдрібніші ізольовані елементи та вивчення властивостей цих частин. На противагу такому механістичному підходу, холізм (або інтегралізм) наполягає на пріоритеті цілого над його компонентами. Холістична парадигма доводить, що при розчленуванні складної системи руйнуються унікальні внутрішні зв'язки, які й забезпечують її життєздатність. Для системного аналізу якості доквілля це протистояння стало визначальним: воно ознаменувало перехід від ізольованого вивчення хімічних елементів до комплексного дослідження живих екосистем як неподільних природних комплексів.

Головний постулат холізму в екологічному моніторингу базується на законі емерджентності, який стверджує, що цілісна система володіє унікальними властивостями, які відсутні у її окремих елементів. У контексті оцінки навколишнього середовища це означає, що інтегральна екологічна якість території ніколи не дорівнює простій сумі характеристик її складових. Навіть найповніший аналіз ізольованих параметрів атмосфери, гідросфери, літосфери чи біоти не здатен дати адекватного уявлення про стан системи. Природне середовище – це не склад хімічних речовин і біомаси, а жива мережа переплетених зв'язків, де взаємодія між геосферами породжує абсолютно нові системні якості.

Ці нові якості, такі як стабільність клімату, регенеративний потенціал, здатність до самоочищення та підтримання гомеостазу, виникають лише на рівні інтегрованого цілого. Наприклад, родючість ґрунту або здатність лісу очищувати повітря є результатом складних петель зворотного зв'язку між мікроорганізмами, рослинами, підземними водами та мінеральною основою, а не механічним додаванням їхніх властивостей. Холістичний екологічний моніторинг відмовляється від суто покомпонентного підходу, оскільки руйнування хоча б одної ланки у цій

взаємодії може лавиноподібно знищити життєздатність усієї екосистеми, навіть якщо інші елементи формально залишатимуться в межах норми.

Об'єктом холистичного аналізу в системному аналізі якості довкілля виступають складні соціо-екологічні системи (SES – Socio-Ecological Systems). Сучасна наука відмовляється від штучного розділення світу на «дику природу» та «людську цивілізацію», оскільки антропогенна діяльність охопила всю планету. Соціо-екологічна система – це інтегрований конгломерат, у якому людське суспільство, створені ним інженерно-технічні комплекси та природні ландшафти пов'язані щільними двосторонніми зв'язками й функціонують як єдиний, нерозривний організм. У межах такого об'єкта біогеохімічні цикли природи та соціоекономічні процеси людства більше не існують паралельно; вони злилися в спільні потоки речовини, енергії та інформації, де зміна в одному секторі миттєво відгукується в іншому.

Специфіка інтеграції соціо-екологічних систем полягає в тому, що технічні споруди та соціальні інститути стають специфічними факторами еволюції біосфери, а природні екосистеми, у свою чергу, жорстко диктують межі економічного розвитку. Наприклад, сучасний мегаполіс разом із його промисловими зонами, транспортними артеріями, приміськими агроценозами та залишками природних лісів є класичним прикладом соціо-екологічної системи. Економічні рішення людей визначають обсяг антропогенного навантаження на «вході» системи, інженерні мережі трансформують ці впливи, а природні компоненти реагують зміною своєї продуктивності чи деградацією, що зрештою б'є по якості життя самого суспільства. Холистичний підхід до вивчення таких систем вимагає одночасного врахування екологічних, технологічних та соціальних параметрів, оскільки спроба керувати ними відірвано один від одного неминуче призводить до системних криз.

Методологічні відмінності між холизмом та редукціонізмом при оцінці якості довкілля визначають два принципово різні вектори наукового пошуку. Редукціоністський підхід базується на аналітичному розчленуванні складного об'єкта та фокусується на ізольованому вивченні його окремих елементів або факторів. У практиці екологічного моніторингу це виражається у рутинному вимірюванні концентрацій конкретних токсикантів в атмосферному повітрі, воді чи ґрунті та порівнянні їх із фіксованими гранично допустимими концентраціями (ГДК). Головний недолік такої методології полягає в ігноруванні системного контексту: вона не враховує ефекти синергізму, коли сумішна дія кількох безпечних речовин стає смертельною, а також виносить за дужки реакцію живої речовини на цей хімічний тиск.

На противагу цьому, холистична методологія пропонує інтегральний підхід, орієнтований на дослідження функціонального стану всієї екосистеми як цілісного організму. Замість фіксації статичних хімічних показників, холізм спрямовує увагу на динамічні мережеві процеси, зокрема на біоаккумуляцію та біомагніфікацію речовин у трофічних ланцюгах. Холистичний аналіз оцінює якість довкілля через інтегральний відгук біоти: інтенсивність фотосинтезу, швидкість деструкції органіки, зміну індексів біорізноманіття та загальну стабільність гомеостазу. Екологічний моніторинг, побудований на принципах холізму, дозволяє виявити приховані хронічні зміни у системі задовго до того, як хімічне забруднення окремих компонентів досягне критичних нормативних порогів, забезпечуючи значно вищу точність екологічного прогнозу.

Концепція біосфери, розроблена видатним українським ученим Володимиром Івановичем Вернадським, є класичним і одним із перших у світовій науці прикладів глибокого холистичного мислення. У часи, коли геологія, біологія та хімія розвивалися як ізольовані дисципліни, Вернадський здійснив грандіозний методологічний прорив, запропонувавши розглядати планету Земля не як випадковий набір гірських порід та населяючих їх істот, а як єдину, цілісну, живу глобальну систему. У межах його вчення біосфера постає як організована динамічна оболонка планети, де живі організми та абіотичне середовище пов'язані нерозривними, тисячолітніми зв'язками обміну речовиною та енергією. Центральною категорією цього підходу стало поняття «живої речовини» – сукупності всіх організмів, яка виступає як найпотужніша геологічна та космічна сила, що активно трансформує вигляд планети.

Холистична суть концепції Вернадського найяскравіше розкривається через генетичний взаємозв'язок між геохімічною діяльністю живої речовини та стабільністю кліматичних і газових

параметрів Землі. Учений переконливо довів, що сучасний хімічний склад атмосфери, прозорість гідросфери та структура літосфери є прямим продуктом роботи живих організмів. Газова функція біоти повністю сформувала киснево-азотний баланс повітряного басейну, а постійне зв'язування вуглекислого газу в процесі фотосинтезу та відкладення карбонатів на морському дні створили природний терморегуляційний механізм планети. Саме жива речовина протягом геологічної історії виступала головним координатором, який через петлі зворотного зв'язку утримував клімат Землі у вузькому діапазоні, придатному для існування життя. Розгляд біосфери за Вернадським доводить, що будь-яке локальне руйнування біотичних зв'язків неминуче дестабілізує макропараметри всієї планетарної системи, що робить його праці теоретичним фундаментом сучасного глобального екологічного моніторингу.

Холістичний погляд на екологічні ланцюги та потоки є наріжним каменем системного аналізу, оскільки він дозволяє досліджувати динаміку довкілля не через статичні елементи, а через транзитні процеси. У межах цієї парадигми будь-яка екосистема розглядається як відкритий трансформатор, функціонування якого підпорядковане фундаментальним законам термодинаміки. Холістичний аналіз чітко розмежує два взаємопов'язані процеси: наскрізні біогеохімічні колообіги речовини та односпрямовані потоки енергії. Якщо хімічні елементи (вуглець, азот, фосфор) здатні нескінченно циркулювати всередині системи, повертаючись із абіотичного екрана до живих організмів завдяки роботі редуцентів, то енергія підпорядковується закону ентропії. Вона надходить від Сонця, розсіюється на кожному трофічному рівні у вигляді тепла і не може бути використана повторно, що вимагає постійного зовнішнього підживлення системи.

У цій потоковій структурі складні трофічні мереживиступають головним каркасом, який забезпечує збереження структурної цілісності системи в умовах інтенсивного антропогенного тиску. Холістичний підхід доводить, що розгалуженість харчових мереж та наявність великої кількості дублюючих екологічних зв'язків визначають буферну ємність довкілля. Коли техногенний фактор знищує певний вид або розриває один із ланцюгів (наприклад, через вибіркоче токсичне ураження чи вирубку), стійка холістична система миттєво перенаправляє потоки речовини та енергії через альтернативні канали. Проте якщо антропогенна деструкція стає хронічною і спрощує трофічну архітектуру, система втрачає свою цілісність, її внутрішні колообіги стають розірваними, що призводить до лавиноподібного винесення біогенів та незворотної деградації всього природного комплексу.

Поняття екологічного здоров'я (Ecosystem Health) постає як фундаментальний холістичний індикатор, який дозволяє оцінити стан навколишнього середовища не через фіксацію окремих симптомів, а крізь призму життєздатності всього природного комплексу. Тривалий час в екологічному моніторингу панував редуціоністський підхід, орієнтований на покомпонентний аналіз забруднення – вимірювання сухих концентрацій хімічних речовин та порівняння їх із нормативами. Проте такий метод часто не відображає реальної картини, адже він ігнорує приховані хронічні зміни та кумулятивні ефекти. Концепція екологічного здоров'я пропонує рішучий перехід від фіксації ізольованих хімічних параметрів до вимірювання інтегральних характеристик системи, розглядаючи її як єдиний, живий і функціонуючий організм.

У межах холістичної діагностики здоров'я екосистеми оцінюють за трьома основними критеріями: рівнем організації (структурна складність), стійкістю (резистентність до стресу) та бадьорістю, або метаболізмом. На практиці це виражається в аналізі таких макропараметрів, як сумарна біологічна продуктивність, інтенсивність колообігу поживних речовин та дихання всієї системи. Невід'ємною складовою є індекси біорізноманіття, які вказують на складність трофічних мереж, та оцінка регенеративного потенціалу – здатності системи до самовідновлення після антропогенних шоків. Здорова екосистема демонструє збалансований метаболізм та ефективно утримує біогеохімічні цикли від розпаду. Якщо ж під дією техногенного тиску система втрачає стабільність, її «здоров'я» погіршується, що проявляється у збідненні видового складу, падінні продуктивності та руйнуванні внутрішніх зв'язків задовго до того, як хімічні токсиканти досягнуть формальних критичних меж.

Проблема нелінійності та точок перелому (Tipping Points) є одним із найскладніших викликів у системному аналізі якості довкілля, оскільки вона руйнує класичні уявлення про

передбачуваність природних процесів. У холистичних системах відгук на зовнішній тиск майже ніколи не буває прямолінійним чи пропорційним. Довгий час екосистема може зазнавати хронічного антропогенного навантаження (наприклад, накопичення важких металів у ґрунті або біогенів у водоймі), зовні залишаючись стабільною завдяки внутрішнім буферним механізмам гомеостазу. Проте при досягненні певної критичної межі – точки перелому – навіть незначне додаткове збурення здатне миттєво вивести систему з ладу, запустивши незворотні руйнівні процеси.

Головним рушієм таких кардинальних змін є лавиноподібні ефекти та позитивні зворотні зв'язки, які починають домінувати в системі після перетину критичного порогу. Замість того, щоб гасити відхилення, вони починають їх мультиплікувати й посилювати. Яскравим прикладом є евтрофікація закритих водойм: тривалий скид фосфатів непомітно накопичується в донних відкладах, але в один момент викликає лавиноподібне цвітіння водоростей. Це призводить до дефіциту кисню, масової загибелі риби та редуцентів, що, у свою чергу, викидає у воду ще більше поживних речовин. Система здійснює стрімкий режимний зсув (regime shift), переходячи з чистого стану в деградоване болото.

Ця нелінійна специфіка зумовлює сувору обмеженість локальних прогнозів. Моделі, побудовані на екстраполяції поточних лінійних трендів або вивченні ізольованих точкових чинників, виявляються абсолютно безсилими перед прогнозуванням моментів перелому. Холистичний аналіз доводить, що оцінювати якість довкілля лише за поточними середніми показниками небезпечно, оскільки система може перебувати у фазі уявного благополуччя за крок до масштабного системного колапсу.

Схема проблеми не лінійності екологічних ситсем м включає в себе чотири взаємопов'язані аспекти, які пояснюють механізми та наслідки таких процесів (рис. 1). Верхня частина ілюструє класичну модель «кульки в чаші», що представляє два альтернативні стійкі стани екосистеми: State A (здорова, стійка) та State B (деградована). Червона кулька під дією антропогенного тиску рухається до критичного порогу (Tipping Point), після якого відбувається незворотний зсув у деградований стан. Графіки поруч показують, як система втрачає пружність перед колапсом. Ліва частина демонструє, як невеликі зміни (наприклад, накопичення біогенів або вирубка лісів) запускають петлі позитивного зворотного зв'язку, які лавиноподібно прискорюють зсув режиму. Також наведено графік, що показує нелінійний відгук системи та специфічні індикатори (збільшення варіабельності, автокореляція), які можуть сигналізувати про наближення до критичної точки. Наприклад це зсув режиму мілководного озера (Shallow Lake Regime Shift): Права частина ілюструє класичний приклад евтрофікації озера. State A (домінують макрофіти, чиста вода) та State B (домінують водорості, каламутна вода, замор риби). Графік «Концентрація фосфору / Час» показує різкий перехід між станами та гістерезис (складність відновлення) після перетину точки перелому. Нижня частина схеми підсумовує проблему. Графік порівнює лінійний відгук (традиційні передбачення) та реальний нелінійний відгук із порогом. Ілюстрація підкреслює, що нелінійність створює виклики для прогнозування та вимагає впровадження «управління стійкістю» (Resilience Management) замість спрощених лінійних моделей.

Практичне застосування холізму в сучасному екологічному менеджменті маркує перехід від галузевого, ізольованого використання окремих ресурсів до стратегії інтегрованого управління природними ресурсами (ГУПР). Традиційні адміністративні підходи, що розцінювали ліс, воду чи ґрунт як автономні економічні активи, регулярно зазнавали фіаско, оскільки ігнорували транскордонні природні зв'язки. Інтегроване управління, навпроти, розглядає певну територію як цілісну соціо-екологічну систему, де будь-яке господарське втручання в один компонент неминуче трансформує стан усіх інших, вимагаючи узгодження економічних інтересів із природними лімітами біосфери.

Найбільш виразимим практичним втіленням холистичного підходу є басейновий принцип управління водними ресурсами. Замість штучних адміністративних чи державних кордонів за основу управління береться природна гідрографічна одиниця – річковий басейн. Оскільки поверхневий і підземний стік пов'язує в єдину систему всі ліси, агроценози, промислові центри та населені пункти від витoku до гирла, якість води в річці стає інтегральним дзеркалом

господарування на всьому водозборі. Басейновий підхід вимагає спільного моніторингу та регулювання викидів усіх підприємств у межах басейну, оскільки локальне забруднення притоки на верхів'ях неминуче дестабілізує всю гідроєкосистему нижче за течією.

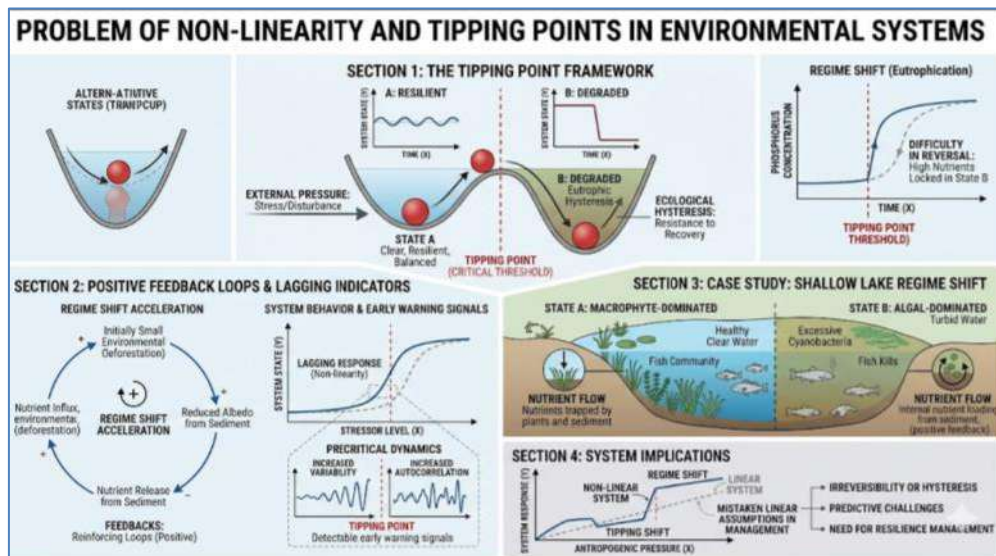


Рис. 1 Ілюстрація аспектів проблеми нелінійності та точок перелому (Tipping Points)

Паралельно з цим ландшафтне планування виступає як холістичний інструмент організації простору суші. Воно базується на аналізі ландшафту як цілісного геокомплексу і спрямоване на збереження його екологічного каркаса – мозаїки природних ядер (заповідників, лісів) та екологічних коридорів (річкових долин), які забезпечують міграцію видів та стійкість біотичних колообігів. Ландшафтне планування гармонійно інтегрує урбанізовані зони, промисловість та сільське господарство у природну матрицю так, щоб антропогенний тиск не перевищував буферну ємність території. Поєднання басейнового принципу та ландшафтного проектування дозволяє реалізувати холістичну модель сталого розвитку, захищаючи екологічне здоров'я регіону в цілому.

Попри високу методологічну цінність, практична реалізація холістичного підходу в системному аналізі якості довкілля стикається із низкою фундаментальних обмежень та викликів XXI століття. Головною бар'єром на шляху від теорії до практики є так зване «прокляття розмірності» даних (Big Data). Оскільки холізм вимагає відмови від спрощень і наполягає на врахуванні максимальної кількості зв'язків між геосферами, техногенними об'єктами та соціумом, обсяг параметрів для моніторингу зростає експоненціально. Дослідники опиняються в ситуації інформаційного перевантаження, коли збирання, структурування та обробка гігантських масивів різномірних даних – від супутникових знімків ландшафтів до хімічних аналізів та демографічних показників – вимагають колосальних часових і фінансових ресурсів, але все одно залишають високий рівень системної невизначеності.

Ця невизначеність посилюється нелінійною і стохастичною природою екосистем, де мікроскопічні похибки у початкових даних можуть повністю спотворити довгостроковий макропрогноз. Як наслідок, класичні аналітичні методи виявляються безсилими, що зумовлює гостру потребу в надпотужних комп'ютерних моделях нового покоління. Для реалізації холістичного аналізу сьогодні залучають методи агентного моделювання, які дозволяють імітувати поведінку тисяч незалежних елементів (від окремих організмів до підприємств), та концепцію цифрових двійників екосистем (Environmental Digital Twins). Створення таких віртуальних копій реальних природних комплексів потребує використання суперкомп'ютерів, технологій штучного інтелекту та хмарних обчислень. Таким чином, головний виклик сучасного холізму полягає в тому, що його повноцінне втілення напряму залежить від технологічного прогресу та обчислювальних потужностей людства.

Сучасна екологічна наука та практика управління якістю навколишнього середовища перебувають на етапі глибокої зміни наукових парадигм. Протягом кількох століть у

природознавстві панував класичний аналітичний підхід, який базувався на принципах детермінізму та редукціонізму. Цей підхід, що досяг свого розквіту в епоху Ньютона та Декарта, стверджував, що будь-яке складне явище чи об'єкт можна повністю зрозуміти, якщо розкласти його на найпростіші складові частини, детально вивчити кожна з них окремо, а потім механічно об'єднати отримані знання. Однак, зіткнувшись із масштабними екологічними кризами ХХ та ХХІ століть – такими як глобальні кліматичні зміни, деградація річкових басейнів, масове вимирання видів та руйнування біогеохімічних циклів – редукціоністська наука продемонструвала свою системну неспроможність. З'ясувалося, що жива природа, біосфера та навіть локальні екосистеми не є механічними автоматами, які можна розібрати на гвинтики без втрати їхньої сутності.

На протигагу редукціонізму виник і сформувався холічний (або холістичний) підхід. Слово «холізм» походить від давньогрецького «холос», що означає «цілий», «цілісний», «всеохоплюючий». Як самостійна методологічна концепція холізм був чітко сформульований у першій половині ХХ століття філософом і політичним діячем Яном Сметсєм у його фундаментальній праці «Холізм і еволюція». Головне гасло холізму, яке згодом стало фундаментальною аксіомою теорії систем та системного аналізу, звучить так: ціле є принципово більшим, ніж проста сукупність або механічна сума його частин.

У контексті дисципліни «Системний аналіз якості навколишнього середовища» холічний підхід виступає не просто як абстрактне філософське вчення, а як жорстка, практично зумовлена методологічна вимога. Навколишнє середовище за своєю природою є інтегральним, нерозривним і суцільним. Хімічні елементи, геологічні структури, водні потоки, повітряні маси та живі організми переплетені такою щільною мережею прямих і зворотних зв'язків, що спроба вивчати їх у повній ізоляції один від одного призводить до викривлення реальності та ухвалення хибних, а часто й катастрофічних управлінських рішень. Холістичний підхід вимагає від еколога-аналітика перенесення фокусу дослідження з аналізу окремих елементів на аналіз взаємозв'язків між ними, вивчення інтегральних властивостей системи як єдиного цілого та розуміння динаміки об'єкта в його соціоприродному контексті.

Щоб повною мірою осягнути цінність холістичного підходу, необхідно простежити історію його формування в процесі гострого інтелектуального протистояння з редукціоністською моделлю мислення. Починаючи з ХVІІ століття, успіхи фізики та механіки сформували у вчених переконання, що Всесвіт – це гігантський і складний годинниковий механізм. Робота годинника повністю визначається формою, розміром та взаємодією його коліщаток, пружин і гвинтиків. Якщо годинник зупиняється, майстер розбирає його, знаходить зламану деталь, замінює її, і механізм знову працює як раніше.

Цей «годинниковий» погляд був перенесений і на живу природу. Ботаніки століттями займалися тим, що збирали гербарії, класифікували види за зовнішніми ознаками, вивчали анатомію окремої рослини, повністю ігноруючи її зв'язки з ґрунтом, мікрофлорою та іншими членами біоценозу. Хіміки аналізували токсичність окремої молекули в пробірці, вважаючи, що її поведінка в реальній річці чи лісовій підстилці буде абсолютно тотожною. Такий підхід мав колосальний успіх у розвитку вузьких дисциплін, але він виявився сліпим до масштабних екологічних ефектів.

Криза редукціонізму в екології наочно проявилася в середині ХХ століття, коли людство почало стикатися з так званими «непередбачуваними наслідками» своєї господарської діяльності. Класичним прикладом редукціоністської помилки стала історія з масовим застосуванням пестициду ДДТ для боротьби зі шкідниками сільського господарства та малярійними комарами. З погляду редукціоністської хімії та агрономії, задача була простою і лінійною: є шкідник (елемент А), є хімічна отрута (елемент Б), яка вбиває елемент А. У лабораторії на ізольованих комах усе працювало бездоганно.

Проте, коли ДДТ почали масово розпилювати в реальному навколишньому середовищі, екологи зіткнулися з проявом холістичної природи біосфери. Отрута не залишилася на полях. Вона включилася в глобальні потоки речовини: змивалася дощами у водойми, поглиналася фітопланктоном, передавалася по трофічних ланцюгах до дрібних риб, потім до великих хижих риб і, зрештою, накопичувалася в організмі хижих птахів (орланів, пеліканів, сапсанів). При цьому

з'ясувалося, що через ефект біологічного посилення концентрація ДДТ у тканинах птахів зростала в тисячі й мільйони разів порівняно з її початковим вмістом у воді. Це призвело до витончення шкаралупи яєць і катастрофічного падіння чисельності пернатих хижаків по всьому світу. Більше того, ДДТ було виявлено навіть у печінці пінгвінів в Антарктиді, де цей пестицид ніколи не застосовувався.

Цей випадок жорстоко довів людству: природа – це не набір ізольованих коробок, а суцільна система, де холістичні зв'язки миттєво переносять локальний вплив на глобальний рівень. Саме усвідомлення подібних взаємозв'язків підштовхнуло вчених до розробки загальної теорії систем (Людвіг фон Берталанфі) та інтеграції холістичного підходу в практику системного аналізу якості середовища.

Центральною категорією холістичного підходу є поняття «цілісності». У системному аналізі цілісність трактується не просто як наявність усіх шматочків пазлу, а як особливий стан організації об'єкта, за якого його внутрішні зв'язки та взаємодії між елементами є настільки міцними, глибокими та визначальними, що вони повністю підпорядковують собі поведінку окремих частин. У цілісній системі елемент втрачає свою автономію; він може існувати і виконувати свої функції лише доти, доки існує саме ціле.

У контексті аналізу якості навколишнього середовища принцип цілісності означає, що будь-який природний об'єкт (наприклад, Словечансько-Овруцький кряж, долина річки Тетерів або ландшафт Центрального Полісся) має вивчатися як неподільна геосистема. Спроба висмикнути з цієї системи один компонент і проаналізувати його стан без урахування інших є методологічним злочином.

Розглянемо як приклад цілісної системи верхове болото. З погляду редуccionіста, болото – це просто заліснена земельна ділянка з надмірною кількістю брудної води, торфу та специфічної мохової рослинності (сфагнуму). Відповідно, логіка інженерного освоєння такої території в минулому столітті була простою: якщо воду висушити за допомогою меліоративних каналів, ми отримаємо цінну землю для сільського господарства або лісівництва, а також зможемо видобувати торф як паливо.

Холістичний аналіз показує, що болото – це надзвичайно складна, цілісна саморегульована система, яка виконує найважливіші біосферні функції. Вода, торф і мох сфагнум перебувають у стані нерозривного генетичного зв'язку. Мох сфагнум має унікальну здатність утримувати кількість води, яка в десятки разів перевищує його власну вагу. Відмираючи без доступу кисню у водному середовищі, мох формує поклади торфу. Торф, у свою чергу, виступає як гігантський природний губчастий фільтр, який акумулює воду під час весняних паводків і поступово, дозовано віддає її протягом літньої посухи, живлячи малі річки та підтримуючи рівень ґрунтових вод на величезних прилеглих територіях ландшафту. Одночасно болото є потужним планетарним депо вуглецю: воно консервує вуглекислий газ на тисячоліття, ефективно протидіючи глобальному парниковому ефекту.

Що відбувається, коли людина руйнує цю цілісність шляхом осушення? Знищення водного балансу призводить до миттєвого відмирання мохового покриву. Торф під дією кисню починає мінералізуватися та розкладатися, виділяючи в атмосферу колосальні об'єми парникових газів. Ландшафт втрачає свій природний регулятор: навколишні ліси та поля починають страждати від хронічних посух, міліють річки, падає рівень води в колодязях місцевих жителів. Осушене болото перетворюється на зону підвищеної пожежної небезпеки, де торф'яні пожежі роками знищують якість атмосферного повітря в усьому регіоні. Цей приклад наочно демонструє, що якість болота як системи не зводиться до суми цінності торфу та деревини. Болото як ціле виконує функцію кліматичного та гідрологічного стабілізатора регіону, і руйнування цієї цілісності викликає ланцюгову деградацію всього довкілля.

Якщо цілісність – це внутрішня архітектура холістичного об'єкта, то емерджентність – це зовнішній прояв цієї архітектури, її головний феномен та доказ. Як уже зазначалося, емерджентність полягає у появі абсолютно нових, якісно унікальних інтегративних властивостей на рівні системи, які не притаманні жодному з її елементів, взятому окремо. У холістичній

методології емерджентність розглядається як наслідок переходу кількості елементів та складності їхніх взаємозв'язків у нову системну якість.

У системному аналізі якості навколишнього середовища емерджентність є базовим орієнтиром для розробки критеріїв оцінки стану екосистем. Більшість ключових екологічних понять, якими оперують сучасні дослідники – такі як стійкість екосистеми, біотичний потенціал, асиміляційна ємність, здоров'я ландшафту, екологічна ніша – є суто емерджентними характеристиками. Їх неможливо виміряти безпосередньо у окремого мікроорганізму, рослини чи хімічної речовини.

Розглянемо феномен асиміляційної ємності річкової системи (її здатності до самоочищення від забруднень). Якщо ми візьмемо окремі елементи річки: молекули води, пісок донних відкладень, іони розчинених мінеральних солей, окрему особину бактерії, одну водорість чи одного річкового рака – і почнемо ретельно вивчати їх у лабораторних умовах, ми не виявимо у них властивості «очищати річковий басейн». Вода є просто розчинником, пісок – пасивним сорбентом, бактерія здатна лише поглинути мікроскопічну частку органіки для власного виживання.

Однак, коли ці елементи об'єднуються у холистичну структуру річкової екосистеми, виникає дивовижна емерджентна властивість. Потік води забезпечує насичення киснем (аерацію) на перекатах. Вища водяна рослинність (очерет, рогоз) перехоплює своїм корінням надлишок нітратів та фосфатів, виступаючи як механічний та біологічний бар'єр. Колонії придонних бактерій-деструкторів, закріплені на камінні та піску, утворюють біоплівку, яка безперервно переробляє та мінералізує величезні об'єми органічних стоків. Тварини-фільтратори (молоски, ракоподібні) прокачують крізь себе воду, очищуючи її від каламуті та зважених часток. Річка перетворюється на гігантський, живий, саморегульований біореактор.

Емерджентна якість самоочищення працює бездоганно доти, доки людина не порушує структуру зв'язків цієї системи. Якщо хімічний комбінат здійснить залповий скид важких металів, які отруять придонну мікрофлору, або якщо гідроенергетики збудують греблю, яка зупинить течію і перетворить річку на ланцюг застійних ставків, емерджентна властивість самоочищення зникне. Елементи (вода, пісок, залишки рослин) залишаться на місці, але система як холистичне ціле припинить своє існування, і якість середовища катастрофічно впаде.

Застосування холистичного підходу в реальній науковій практиці та системному аналізі стикається з серйозною гносеологічною проблемою, яка в методології отримала назву «холистичного парадоксу». Суть цього парадоксу полягає в логічному замкненому колі: для того, щоб адекватно зрозуміти та описати властивості холистичного цілого, нам необхідно детально знати властивості та функції його частин; однак для того, щоб зрозуміти справжнє значення, роль та функції цих частин, нам необхідно вже заздалегідь знати та розуміти властивості всього цілого, оскільки саме ціле визначає поведінку своїх частин.

Цей парадокс часто паралізує класичних дослідників. Якщо ми хочемо вивчити якість і динаміку похідних лісів Словечансько-Овруцького кряжу під дією рослинних інвазій, з чого нам почати? Якщо ми почнемо з детального вивчення фізіології інвазійного дуба червоного чи робінії звичайної в лабораторії, ми втратимо системний контекст (вплив ґрунтів, клімату, місцевих шкідників). Якщо ми спробуємо відразу охопити поглядом увесь лісовий масив кряжу в цілому, ми отримаємо лише поверхневий, розмитий опис без розуміння конкретних механізмів витіснення аборигенних видів.

У системному аналізі якості навколишнього середовища для подолання холистичного парадоксу розроблена спеціальна процедура, яка базується на принципі методологічного човника (або системного ітераційного циклу). Процес дослідження складного об'єкта будується не як лінійний рух від частин до цілого або від цілого до частин, а як безперервний, циклічний рух по спіралі між рівнями системи:

Етап макроаналізу (погляд згори): Дослідження починається з холистичного сприйняття об'єкта. Аналітик розглядає систему як «чорну скриньку», визначає її межі, її головні інтегративні властивості, параметри входу (зовнішні впливи, клімат, антропогенний тиск) та параметри виходу (продуктивність, якість середовища).

Етап мікроаналізу (погляд зсередини): Спираючись на загальне розуміння цілого, аналітик здійснює декомпозицію системи – умовно розділяє її на великі підсистеми та елементи. Але при цьому вивчення кожного елемента проводиться виключно через призму його ролі у підтримці цілого.

Етап синтезу (системне об'єднання): Отримані дані про елементи інтегруються в єдину модель зв'язків. Аналітик досліджує, як взаємодія цих елементів народжує емерджентні властивості, зафіксовані на першому етапі.

Ітераційне уточнення: Якщо модель не повністю пояснює поведінку системи, цикл повторюється на вищому рівні точності.

Такий підхід дозволяє поєднати переваги аналітичного розчленування та холістичного синтезу, уникаючи при цьому редукаціоністської сліпоти та холістичної розмитості.

Сучасний етап розвитку людської цивілізації, який багато вчених називають епохою антропоцену, призвів до того, що на планеті практично не залишилося абсолютно чистих, незайманих природних систем. Будь-який ландшафт, річковий басейн чи атмосферний простір перебуває під постійним, хронічним впливом людської діяльності. Тому в системному аналізі якості навколишнього середовища об'єктом дослідження все частіше виступають не просто екосистеми, а складні соціоекологічні системи (СЕС).

Соціоекологічна система – це інтегральна, холістична мегасистема, яка об'єднує в єдине ціле три головні компоненти: природне середовище (біоту, ландшафт, ресурси), людське суспільство (соціальні інститути, культуру, потреби) та технологічну інфраструктуру (промисловість, міста, транспорт, сільське господарство). Холістичний підхід стверджує, що СЕС не є набором трьох окремих коробок, які випадково опинилися поруч. Це єдиний, нерозривний організм, де соціальні закони людства та біологічні закони природи переплетені через тисячі контурів прямих і зворотних зв'язків.

Розглянемо як приклад соціоекологічної системи сучасний агломераційний регіон, у якому функціонує великий видобувний та металургійний комплекс (наприклад, промислова зона Житомирщини, пов'язана з видобутком титанових руд чи гранітів). Спроба проаналізувати якість довкілля в цьому регіоні з вузьких, ізольованих позицій приречена на провал. Якщо ми будемо залучати лише інженерів-металургів, вони запропонують встановити потужні фільтри на трубах заводи, вважаючи проблему вирішеною. Якщо ми залучимо лише економістів, вони проаналізують прибутки та податки, проігнорувавши збитки від руйнування здоров'я людей. Якщо ми залучимо лише класичних біологів, вони зафіксують деградацію лісів навколо кар'єрів і зажадають повної заборони виробництва, що викличе соціальний вибух та безробіття.

Холістичний аналіз соціоекологічної системи розглядає ситуацію в комплексі. Видобуток руди (техносфера) змінює рівень ґрунтових вод і знищує лісові масиви (біосфера). Деградація лісів та пилове забруднення повітря призводять до зростання захворюваності органів дихання у місцевого населення (соціальна сфера). Хворе населення втрачає працездатність, зростають витрати бюджету на медицину (економіка). Для компенсації збитків підприємство змушене збільшувати обсяги видобутку, що ще сильніше тисне на природу.

Ми бачимо замкнений, нелінійний контур взаємодії. Якість життєвого середовища людини в такому регіоні не є простою сумою концентрації пилу в повітрі. Вона визначається стійкістю та збалансованістю всієї соціоекологічної системи. Управління такою системою вимагає ухвалення холістичних рішень, які одночасно оптимізують технологічні процеси, компенсують екологічні збитки шляхом рекультивації кар'єрів, створюють зелені бар'єри навколо міст та інвестують у здоров'я та екологічну культуру громад.

Реалізація холістичного підходу на практиці вимагає принципово нової організації наукових знань та експертної діяльності. Оскільки складні природні та соціоекологічні системи перетинають кордони традиційних наукових кафедр та інститутів, системний аналіз якості навколишнього середовища за своєю суттю є міждисциплінарною та трансдисциплінарною методологією.

Довгий час наука розвивалася шляхом монодисциплінарності – поглиблення спеціалізації. Ботанік вивчав рослини, гідролог – воду, метеоролог – повітря, соціолог – людей. Кожен мав свою

специфічну мову, свої прилади та свої ізольовані теорії. Коли виникала складна екологічна проблема, збиралася комісія з представників різних наук. Це був етап мультидисциплінарності (або багатодисциплінарності). Вчені сідали за один стіл, кожен зачитував свій звіт, написаний своєю науковою мовою, після чого ці звіти просто підшивалися під одну палітурку. Холістичного бачення проблеми при цьому не виникало, оскільки зв'язки між дослідженнями залишалися нерозкритими.

Наступним кроком став перехід до міждисциплінарності. На цьому етапі відбувається реальна інтеграція методів та мов різних наук. Виникають стикові дисципліни: геохімія ландшафтів, екологічна економіка, біогеоценологія. Вчені починають спільно розробляти моделі, де параметри виходу однієї науки (наприклад, об'єм стічних вод з погляду гідрології) стають параметрами входу для іншої науки (швидкість сукцесії рослин з погляду ботаніки).

Найвищою формою реалізації холістичного підходу сьогодні є трансдисциплінарність. Трансдисциплінарність – це методологія, яка виходить за межі конкретних наукових дисциплін і розглядає проблему в її повній, життєвій цілісності, об'єднуючи не лише академічні наукові знання, а й практичний досвід управлінців, традиційні знання місцевих громад, етичні норми та юридичні закони.

Прикладом трансдисциплінарного холістичного дослідження є розробка стратегії сталого розвитку для Центрального Полісся в умовах сучасних кліматичних змін та інвазійних процесів. У таку наукову групу входять не лише екологи, лісівники та математики-моделісти. Обов'язковими учасниками є представники місцевого самоврядування, фермери, керівники лісових господарств та громадські активісти. Наукові моделі динаміки лісів поєднуються з аналізом економічних стратегій громад, юридичними рамками земельного законодавства України та етичними цінностями збереження заповідних територій Словечансько-Овруцького кряжу. Тільки таке трансдисциплінарне холістичне об'єднання знань здатне сформувавши програму дій, яка буде реально працювати на практиці та забезпечить високу якість навколишнього середовища для майбутніх поколінь.

Найбільш масштабним, яскравим і водночас дискусійним втіленням холістичного підходу на глобальному планетарному рівні стала гіпотеза Гайї (Землі як суперорганізму), сформульована наприкінці 1960-х років видатним британським екологом і хіміком Джеймсом Лавлоком та підтримана американською мікробіологинєю Лінн Маргуліс.

До появи цієї гіпотези в класичній науці панував редуціоністський погляд на геосферу Землі. Стверджувалося, що атмосфера, гідросфера та літосфера є пасивним, мертвим фізико-хімічним тлом, яке сформувалося внаслідок геологічних процесів та космічних чинників. Живі організми (біосфера) розглядалися лише як пасажери на цьому мертвому кораблі, які змушені пасивно пристосовуватися до наявних умов середовища (температури, хімічного складу повітря, кислотності океану).

Джеймс Лавлок, аналізуючи якість атмосфери Землі в порівнянні з атмосферами Марса та Венери, прийшов до холістичного висновку, який кардинально змінив хід наукової думки. Він зауважив, що хімічний склад атмосфери Землі є глибоко аномальним і термодинамічно нестабільним: у ній одночасно співіснують величезні об'єми активного кисню та горючого метану, які за законами чистої хімії мали б миттєво прореагувати і перетворитися на вуглекислий газ та воду (як це відбулося на сусідніх планетах). Той факт, що цей аномальний склад атмосфери, а також середня температура планети та солоність океану залишаються сталими протягом мільярдів років, попри постійне зростання світності Сонця, доводить наявність глобального механізму саморегуляції.

Лавлок сформулював холістичну тезу: Земля – це єдина, жива, саморегульована система (суперорганізм, названий ім'ям давньогрецької богині Землі Гайї), в якій сукупність усіх живих організмів (біота) безперервно й активно контролює, підтримує та оптимізує параметри якості фізико-хімічного середовища планети, створюючи максимально сприятливі умови для власного існування. Жива речовина не просто пристосовується до середовища, вона сама створює і конструює це середовище.

Розглянемо холистичний механізм контролю глобальної температури за гіпотезою Гайї на прикладі взаємодії між вуглекислим газом, силікатними гірськими породами та мікроскопічними морськими водоростями (коколитофоридами). Вуглекислий газ надходить в атмосферу внаслідок виверження вулканів та дихання організмів, посилюючи парниковий ефект та підвищуючи температуру планети. Коли температура зростає, активізуються ґрунтові бактерії та коріння рослин. Вони виділяють органічні кислоти, які різко прискорюють процес хімічного вивітрювання силікатних порід на суші. Під час цього процесу вуглекислий газ зв'язується і у вигляді іонів кальцію та карбонату змивається річками в океан. В океані мікроскопічні водорості підхоплюють ці іони і будують з них свої міцні вапнякові скелети. Відмираючи, водорості падають на дно, назавжди консервуючи вуглець у вигляді покладів крейди та вапняку. Вміст вуглекислого газу в повітрі падає, парниковий ефект слабшає, і планета охолоджується. Якщо планета стає занадто холодною, діяльність бактерій і водоростей сповільнюється, вивітрювання припиняється, вулканічний вуглекислий газ знову накопичується, і планета нагрівається.

Цей гігантський планетарний контур негативного зворотного зв'язку є чистим проявом глобального холізму. Біосфера працює як єдиний термостат. З позицій системного аналізу якості навколишнього середовища гіпотеза Гайї дає нам найважливіший урок: руйнуючи цілісність біотичних спільнот (наприклад, вирубуючи тропічні ліси Амазонії чи знищуючи фітопланктон океану пластиком забрудненням), людство руйнує органи саморегуляції планетарного організму. Це позбавляє Землю здатності компенсувати антропогенні викиди парникових газів і штовхає всю систему планети до нелінійного теплового стрибка, небезпечного для існування людської цивілізації.

Однією з найважливіших особливостей складних холистичних систем, яку необхідно враховувати при оцінці якості довкілля, є їхня здатність формувати кумулятивні (накопичувальні) та запізнілі (відтерміновані у часі) екологічні ефекти. Ці ефекти є прямим наслідком складної мережевої структури зв'язків та наявності внутрішніх буферів і депо всередині системи.

Редукціоністський підхід зазвичай оперує миттєвими та лінійними зв'язками за принципом «причина-наслідок»: фабрика викинула токсикант сьогодні – сьогодні ми зафіксували отруєння риби в річці. Проте в реальних холистичних системах довкілля поведінка об'єкта є набагато підступнішою.

Кумулятивний ефект полягає в тому, що система здатна протягом тривалого часу безперервно вловлювати, сорбувати та накопичувати всередині себе незначні, субтоксичні дози забруднюючих речовин, які надходять із зовнішнього середовища. При цьому зовнішні параметри якості середовища (наприклад, концентрація важких металів у воді річки) можуть залишатися ідеальними і не перевищувати встановлені нормативи. Проте речовина накопичується в акумулюючих підсистемах: у донних відкладах, у гумусовому горизонті ґрунту або в жирових тканинах довгоживучих організмів.

Запізнілий ефект (або часовий лаг) – це проміжок часу між початком антропогенного впливу на систему та моментом прояву реальних системних наслідків цього впливу. Часовий лаг може тривати роками або навіть десятиліттями. Протягом цього часу система здається абсолютно здоровою, оскільки її внутрішні гомеостатичні механізми успішно компенсують руйнівний вплив за рахунок внутрішніх резервів. Проте, коли внутрішні буферні ємності повністю заповнюються, відбувається ефект «хімічної бомби уповільненої дії». Навіть незначний додатковий вплив або природна флуктуація (наприклад, весняний паводок чи зміна кислотності дощової води) призводить до раптового, масового вивільнення накопичених токсикантів у рухому, біологічно доступну форму.

Прикладом кумулятивного та запізнілого ефекту в холистичному контексті є процес деградації лісових екосистем Словечансько-Овруцького кряжу під впливом хронічного промислового запилення та кислотних опадів. Металургійні чи енергетичні підприємства, розташовані за сотні кілометрів, роками викидають в атмосферу незначні об'єми діоксиду сірки та оксидів азоту. Ці речовини випадають на лісові масиви кряжу. Протягом перших десятиліть ліс демонструє високу стійкість. Ґрунти кряжу, що мають певний буферний потенціал (наприклад, за

рахунок вмісту кальцію), успішно нейтралізують кислотність. Деревя продовжують рости, а зовнішні показники якості лісу здаються стабільними.

Однак у ґрунтовій системі безперервно йде прихований кумулятивний процес: іони кальцію вимиваються, а на їхнє місце стають токсичні іони вільного алюмінію, які руйнують кореневі волоски дерев. Одночасно кислотність знищує мікоризні гриби, позбавляючи дерева можливості засвоювати воду та поживні речовини. І ось, через тридцять років хронічного тиску, буферна ємність ґрунту вичерпується до нуля. Настає критичний момент. Після абсолютно звичайної, помірної літньої посухи в лісі починається раптове, лавиноподібне і масштабне всихання тисяч гектарів зрілих дерев. Для редуціоніста причиною катастрофи здається «літня посуха». Холістичний системний аналіз доводить, що посуха стала лише тригером, а справжньою причиною є тридцятирічний кумулятивний процес прихованої деградації внутрішньої структури системи, який призвів до повної втрати її стійкості.

Розуміння холістичної природи навколишнього середовища вимагає кардинальної перебудови практичних інструментів екологічного менеджменту: методів проектування господарської діяльності (Оцінки впливу на довкілля – ОВД) та систем екологічного моніторингу.

Традиційний, редуціоністський моніторинг довкілля будується за так званім інгредієнтним принципом. Створюється мережа постів спостереження, які з певною періодичністю відбирають проби повітря чи води і вимірюють у них концентрацію обмеженого набору речовин (наприклад, вміст чадного газу, пилу, фенолів). Отримані цифри порівнюються з нормативами Гранично Допустимих Концентрацій (ГДК). Якщо перевищень немає, стан середовища оголошується безпечним.

Холістична методологія доводить глибоку обмеженість інгредієнтного моніторингу. По-перше, неможливо виміряти тисячі хімічних сполук, які людина щодня викидає в природу. По-друге, цей метод повністю ігнорує синергетичні ефекти, кумуляцію та реакцію самих живих систем. Тому сучасний системний аналіз впроваджує холістичний (екосистемний) моніторинг. Його головними інструментами є:

Біоіндикація та біотестування: Замість того, щоб аналізувати хімічний склад води за допомогою складних приладів, ми запитуємо саму природу про її стан. Ми досліджуємо здоров'я та поведінку живих організмів-індикаторів (наприклад, стан хвої сосни, видовий склад донних безхребетних у річці, генетичні аномалії у клітинах рослин). Живий організм є холістичним інтегратором: він усім своїм тілом реагує на всю сукупність хімічних, фізичних та кліматичних стресів одночасно, проявляючи приховані кумулятивні та синергетичні ефекти, які прилади зафіксувати не здатні.

Вимірювання інтегральних системних параметрів: Оцінюються характеристики, які описують стан екосистеми як цілого. Сюди належать: чиста первинна продукція біомаси, загальне дихання екосистеми, швидкість кругообігу ключових елементів, індекси біорізноманіття (наприклад, індекс Шеннона), рівень термодинамічної ентропії системи.

Відповідно змінюється і методологія проектування. При розробці нових промислових об'єктів холістичний підхід вимагає переходу від точкової оцінки викидів до концепції стратегічної екологічної оцінки (СЕО) ландшафтів. Головним критерієм при проектуванні стає не просто «не перевищити ГДК на виході з труби», а зберегти вільну асиміляційна ємність екосистеми в цілому. Господарський проект розглядається як новий елемент, який впроваджується в наявну холістичну структуру соціоекологічної системи, і аналітик повинен змодельювати всі нелінійні наслідки цього впровадження для цілісності та стійкості регіону.

Для остаточного закріплення теми розглянемо кілька детальних практичних ситуацій (кейсів), які яскраво ілюструють триумф холістичного мислення над редуціоністськими помилками в реальному управлінні якістю навколишнього середовища.

Велика річка, що протікає через кілька областей, почала стрімко міліти, замулюватися, а вода в її нижній течії стала непридатною для пиття через постійне цвітіння та високу концентрацію токсикантів.

Редуціоністське рішення: Адміністрація кожної області почала діяти ізольовано в межах своїх адміністративних кордонів. У верхній течії збудували потужні бетонні набережні для

захисту від ерозії. У середній течії виділили кошти на механічне очищення плеса річки від водоростей за допомогою спеціальних суден-земснарядів. На очисних спорудах міст встановили додаткові хлоратори. Результат: кошти витрачені, але через два роки ситуація погіршилася, річка продовжує деградувати, риба гине, витрати на очищення води зростають.

Холістичне системне рішення: До аналізу залучили групу системних екологів, які реалізували басейновий холістичний підхід. Межі системи були розширені від русла річки до меж усього водозбірного басейну, включаючи всі притоки, підземні води, ліси та сільськогосподарські угіддя.

Аналіз виявив, що замулення річки та цвітіння води були викликані масовою вирубною заплавних лісів та розорюванням прибережних захисних смуг під агрополя у верхів'ях приток. Через відсутність лісового бар'єру дощові води безперешкодно змивали з полів мільйони тонн родючого ґрунту (замулення) разом із фосфатними добривами (тотальний стимул для цвітіння водоростей). Бетонні набережні лише прискорили течію, знищивши природні мілководдя, де відбувалося біологічне самоочищення води за рахунок очерету та моллюсків.

Замість точкової боротьби з симптомами (очищення плеса), було реалізовано холістичну програму відновлення структури системи. Запроваджено жорстку заборону на розорювання земель у радіусі прибережних смуг по всьому басейну. Проведено масштабне фітомеліоративне відновлення – висаджено заплавні ліси та створено штучні водно-болотні угіддя (біоплато) в гирлах малих приток для перехоплення агрогенних добрив. Демонтовано частину бетонних укріплень і відновлено природні меандри (вигини) річки з піщаними перекатами для активізації природної аерації та самоочищення води бактеріями. Через кілька років емерджентна властивість самоочищення річки повністю відновилася, якість води повернулася до норми, а витрати на штучне хімічне очищення на водоканалах міст знизилися в рази.

У лісових масивах Центрального Полісся (зокрема на Словечансько-Овруцькому кряжі) спостерігається стрімке поширення інвазійного виду – дуба червоного, який витісняє аборигенний дуб черешчатий та сосну звичайну, утворюючи щільні одновидові зарості підліску, під якими зникає будь-яка інша рослинність.

Редукціоністське рішення: Лісівники розцінили проблему як суто механічну та конкурентну: інвазійне дерево росте швидше і забирає світло у місцевих сіянців. Було прийнято рішення про масштабне проведення санітарних рубок – випилювання дорослих дерев дуба червоного та ручне викошування його підліску. Результат: на місці вирубок із пнів та сплячих бруньок у ґрунті наступного року піднялася ще більш густа, щільна стіна інвазійної поросли, з якою ручна праця вже не могла впоратися. Якість лісу як джерела біорізноманіття катастрофічно впала.

Холістичне системне рішення: Системний аналіз ситуації показав, що успіх інвазії дуба червоного зумовлений не просто його швидким ростом, а глибокою трансформацією всієї холістичної структури лісової екосистеми:

Зміна ґрунтової підсистеми: Листя дуба червоного містить величезну кількість специфічних дубильних речовин (танінів), які є токсичними для місцевих ґрунтових черв'яків, комах та мікроорганізмів-деструкторів. Опале листя інвазійного виду не перегниває роками, утворюючи щільну, суху, багатошарову «ковдру» на поверхні ґрунту.

Руйнування зв'язків нижніх ярусів: Ця дубильна ковдра повністю блокує проростання насіння місцевих трав'янистих рослин, чагарників та аборигенних дерев (дуба черешчатого, беріз, сосон). Насіння місцевих видів просто не може пробитися до ґрунту через цей сухий ізолюючий шар. При цьому сам дуб червоний має великі, важкі жолуді з колосальним запасом поживних речовин, які легко пробивають власну лісову підстилку.

Трофічні ланцюги: Місцеві види комах-шкідників та птахів не адаптовані до живлення листям та жолудями дуба червоного, тому він опиняється в стані «екологічного вакууму» – без природних регуляторів чисельності.

Спираючись на холістичне розуміння контуру взаємодії, екологи запропонували відмовитися від суто механічного випилювання. Програма управління якістю лісу була переорієнтована на відновлення внутрішніх біотичних бар'єрів системи:

Замість суцільних вирубок впроваджено технологію вибіркового затінення: створення умов, за яких зберігається щільний намет зрілих аборигенних дерев, що пригнічує світлолюбні сходи інвазійного виду.

Проведено штучну реінтродукцію та підтримку популяцій диких кабанів та великих гризунів (сонь, лісових мишей), які активно поїдають жолуді дуба червоного в зимовий період, розриваючи ланцюг його насінневого розмноження.

Проведено експериментальне внесення специфічних штамів місцевих грибів-деструкторів, здатних прискорено розкласти таніни в лісовій підстилці, що руйнує ізолюючу «ковдру» і відкриває шлях для природного поновлення аборигенної флори.

Цей кейс доводить: перемогти екологічну загрозу можна лише тоді, коли ми розглядаємо її не як ізольованого ворога, а як системну перебудову зв'язків, і діємо на рівні відновлення холістичного гомеостазу всього природного комплексу.

Холістичний підхід є теоретичним фундаментом та практичним компасом сучасного системного аналізу якості навколишнього середовища. Перехід від редукціоністського розчленування природи до холістичного синтезу – це не просто зміна наукових методів, це зміна всього світогляду людства в епоху глобальних екологічних викликів.

Природа, біосфера та соціоекологічні системи демонструють нам дивовижні емерджентні властивості, глибоку цілісність та нелінійну поведінку, які неможливо прорахувати за допомогою простих, ізольованих формул чи механістичних моделей. Кожен елемент нашого довкілля пов'язаний з іншими тисячами невидимих ниток прямих і зворотних зв'язків. Локальне втручання в екосистему болота, лісу чи річки без урахування цих зв'язків неминуче викликає ланцюгову реакцію деградації середовища, кумулятивні та запізнілі ефекти якої можуть стати фатальними для майбутніх поколінь.

Для еколога-аналітика холізм диктує головні правила професійної діяльності: завжди визначати межі системи з урахуванням басейнових та ландшафтних зв'язків; оцінювати стан середовища за допомогою холістичних індикаторів біоіндикації; ухвалювати управлінські рішення на основі міждисциплінарного та трансдисциплінарного аналізу соціоекологічних систем; і найголовніше – пам'ятати, що головне завдання людини полягає не в підкоренні або штучній перебудові природи, а в глибокому розумінні та підтримці її дивовижних емерджентних механізмів саморегуляції, гомеостазу та стійкості. Тільки такий холістичний шлях дозволить зберегти високу якість навколишнього середовища та забезпечити гармонійний, сталий розвиток людської цивілізації в єдиній і цілісній системі біосфери Землі.

Питання та завдання для самоконтролю

Теоретичні запитання:

1. У чому полягає сутність холічного підходу в системному аналізі та яка його головна філософська теза?
2. Чим холістичний підхід принципово відрізняється від редукціоністського при дослідженні складних екологічних об'єктів?
3. Поясніть поняття «емерджентність» як ключову характеристику холізму на прикладі функціонування природної екосистеми.
4. Чому вивчення окремих ізольованих компонентів довкілля є недостатнім для прогнозування загальної якості навколишнього середовища?
5. Як холістичний підхід трактує поняття «цілісність» стосовно біосфери та її регіональних підсистем?
6. Опишіть роль взаємозв'язків та синергетичних ефектів між елементами системи з погляду холістичної методології.
7. Як холістичний принцип «ціле передує своїм частинам» застосовується при моделюванні антропогенного навантаження на урбоекосистеми?
8. У чому полягає складність практичної реалізації холічного підходу в екологічному моніторингу та менеджменті?

9. Поясніть концепцію «організмичного» бачення складних систем і як вона трансформувалася в сучасну екологічну науку.
10. Як холистичний підхід допомагає виявити приховані або запізнілі критичні зміни (точки перегину) в стані якості довкілля?
11. Охарактеризуйте зв'язок між холистичним мисленням та міждисциплінарним характером системного аналізу якості навколишнього середовища.
12. Що розуміють під «холистичним парадоксом» (необхідністю знати ціле для розуміння частин і навпаки) і як він вирішується в системних дослідженнях?
13. Як принципи холізму відображені в концепції сталого розвитку та управлінні природокористуванням?
14. Поясніть роль зворотних зв'язків у підтримці цілісності та динамічної рівноваги екологічних систем у рамках холистичного підходу.
15. Чому холистичний підхід є обов'язковим при оцінці кумулятивного впливу багатьох джерел забруднення на навколишнє середовище?
16. Як категорія «організація системи» розглядається в холистичній методології системного аналізу?
17. У чому полягає значення екоцентричного (холистичного) світогляду для розробки стратегій екологічної безпеки?
18. Як холистичний підхід враховує нелінійність та непередбачуваність поведінки складних соціоекологічних систем?
19. Яким чином концепція «Гайї» (Землі як живого організму) Джеймса Лавлока ілюструє крайній прояв холистичного підходу в екології?
20. Які математичні та імітаційні методи системного аналізу найкраще адаптовані для збереження холистичного принципу при дослідженні якості довкілля?

Тестові завдання

Яке головне філософсько-методологічне гасло найкраще описує сутність холистичного підходу в системному аналізі?

- А) Частина завжди важливіша за ціле
- Б) Ціле є більшим, ніж проста сума його частин
- В) Будь-яку складну систему можна звести до набору простих хімічних реакцій
- Г) Взаємозв'язки між елементами не впливають на властивості системи

Який підхід до дослідження довкілля є протилежним (антагоністичним) до холистичного?

- А) Синергетичний
- Б) Екоцентричний
- В) Редукціоністський
- Г) Інтегральний

З погляду холізму, чому неможливо повністю спрогнозувати якість річкової води, вивчаючи токсичність кожної забруднюючої речовини окремо в лабораторії?

- А) Через неможливість точного вимірювання концентрацій
- Б) Через прояв емерджентних властивостей та синергетичних ефектів у реальній екосистемі
- В) Через постійну зміну об'єму річкового стоку
- Г) Через відсутність стандартизованих методик аналізу

Як холистичний підхід розглядає співвідношення між цілою екосистемою та її окремими компонентами?

- А) Компоненти системи мають досліджуватися як повністю ізольовані об'єкти
- Б) Властивості цілого визначаються виключно механічним додаванням властивостей компонентів

В) Ціле передреє своїм частинам і визначає їхні функції та поведінку в системі

Г) Стан цілої системи не залежить від змін у її структурі

Яка екологічна концепція ХХ століття, що розглядає Землю як єдиний саморегульований суперорганізм, є яскравим прикладом радикального холізму?

- А) Концепція екологічної ніші
- Б) Гіпотеза Гайї (Джеймса Лавлока)
- В) Теорія екологічного переходу
- Г) Закон мінімуму Лібіха

Що є головною перевагою застосування холістичного підходу при оцінці антропогенного впливу на навколишнє середовище?

- А) Можливість врахувати кумулятивні, запізнілі та приховані системні ефекти
- Б) Спрощення математичних розрахунків у моделях
- В) Можливість відмовитися від інструментального моніторингу довкілля
- Г) Зведення екологічного аналізу до вивчення лише одного базового показника

У чому полягає сутність «холістичного парадоксу» в системних дослідженнях якості довкілля?

А) Екосистема одночасно є і відкритою, і повністю закритою для речовини
Б) Для розуміння цілого потрібно знати його частини, але для розуміння частин необхідно вже знати властивості цілого

В) Збільшення кількості інформації про систему призводить до повного зникнення зв'язків між елементами

- Г) Антропогенне навантаження одночасно підвищує і знижує біопродуктивність

Який тип мислення та організації досліджень є обов'язковим для реалізації холістичного аналізу складних соціоекологічних систем?

- А) Вузькоспеціалізований (монодисциплінарний)
- Б) Міждисциплінарний та трансдисциплінарний
- В) Суто теоретичний без залучення емпіричних даних
- Г) Спонтанний (інтуїтивний)

Як у рамках холістичної методології трактується поняття «організація системи»?

- А) Юридичний статус підприємства, що забруднює довкілля
- Б) Спосіб і характер взаємодії між елементами, що підтримує цілісність системи
- В) Проста кількість живих організмів на одиницю площі
- Г) Процес видалення пошкоджених компонентів з екосистеми

Який світоглядний принцип логічно впливає з холістичного підходу до аналізу системи «людина – техніка – довкілля»?

- А) Антропоцентризм (людина як господар природи)
- Б) Екоцентризм (людина як рівноправна частина єдиної біосфери)
- В) Технократизм (технології спроможні повністю замінити природні системи)
- Г) Споживацький підхід до природних ресурсів

Ситуаційні задачі

Науково-дослідний інститут отримав завдання оцінити екологічний стан річкового басейну. Лабораторія гідрохімії детально вивчила хімічний склад води в усіх притоках, а лабораторія гідробіології – видовий склад риб. Коли звіти об'єднали, виявилось, що загальна екологічна траєкторія розвитку річки та причини її замулення залишилися незрозумілими. Обґрунтуйте з позицій холізму, чому механічне додавання результатів двох ізольованих редукціоністських досліджень не дозволило отримати адекватне уявлення про якість річкової системи як єдиного цілого.

Для ліквідації наслідків розливу нафтопродуктів на узбережжі екологи вирішили використати потужні хімічні детергенти, які пройшли успішні випробування у закритих акваріумах і показали високу ефективність у розщепленні плівки. Після масштабного застосування речовини на узбережжі нафта дійсно зникла, але це спровокувало повне вимирання донних

безхребетних і колапс місцевого рибного промислу. Поясніть цю управлінську помилку через призму холистичного принципу взаємозв'язку та емерджентності складних природних об'єктів.

Екологічний аудитор намагається оцінити якість навколишнього середовища в місті, аналізуючи виключно звіти промислових підприємств про обсяги їхніх технологічних викидів у повітря. При цьому він ігнорує особливості міської забудови, специфіку локальних вітрових потоків та реакцію зелених насаджень. Використовуючи холистичну тезу «ціле передреує своїм частинам», поясніть, чому такий ізольований аналіз окремих джерел тиску не здатний відобразити реальну екологічну якість міського простору.

У лісовому масиві, що зазнає хронічного впливу кислотних дощів, ботаніки почали досліджувати стійкість головної лісоутворюючої породи дерев. Вони вивчали окремо листя, кору та кореневу систему в контрольованих умовах теплиці. Проте в реальному лісі дерева почали гинути значно швидше через руйнування мікоризних зв'язків із грибами та зміну кислотності ґрунту під дією мікроорганізмів. Опишіть, як «холистичний парадокс» проявляється у даному дослідженні та як аналітику розв'язати проблему вивчення цієї системи.

Міжнародна комісія розробляє стратегію збереження унікального водно-болотного угіддя. Частина експертів пропонує зосередити всі фінансові ресурси на охороні одного рідкісного виду птахів, який є символом цієї території. Інша група наполягає на фінансуванні збереження гідрологічного режиму та рослинних асоціацій усього регіону. Порівняйте ці два підходи (редукціоністський та холистичний) і докажіть перевагу екоцентричного холистичного мислення для забезпечення довгострокової якості середовища.

Під час оцінки впливу на довкілля майбутнього гірничо-збагачувального комбінату розробники проекту детально описали окремо вплив на повітря, окремо на підземні води та окремо на локальну флору. Проте вони не врахували кумулятивний синергетичний ефект, коли одночасне зниження рівня ґрунтових вод і запилення атмосферного повітря запускає нелінійний процес деградації всього регіонального ландшафту. Сформулюйте зауваження до цього проекту з позицій холистичної методології системного аналізу.

Кліматологи та екологи обговорюють гіпотезу Джеймса Лавлока про те, що жива речовина планети активно регулює стан атмосфери та океану, підтримуючи оптимальні умови для життя. Один із критиків стверджує, що глобальний клімат є результатом суто геологічних і фізико-хімічних процесів взаємодії газів. Спростуйте позицію критика, спираючись на організмичний (холистичний) погляд на біосферу як на єдину складну саморегульовану систему.

Управління екологічної безпеки зіткнулося з проблемою деградації великого озера через масове розмноження водоростей. Адміністрація вирішила застосувати метод механічного очищення плеса від біомаси. З погляду холистичного підходу, поведінка озера визначається не просто наявністю водоростей, а глибинною структурою зв'язків у системі «водозбірний басейн – агроландшафт – озеро». Чому точкове усунення симптому без холистичного аналізу причин не покращить якість водного об'єкта в майбутньому?

Наукова група розробляє комп'ютерну модель соціоекологічної системи регіону для прогнозування її сталого розвитку. Розробники вагаються: будувати модель як простий набір лінійних рівнянь для кожного екологічного фактора окремо чи використовувати апарат імітаційного моделювання складних мереж із нелінійними зворотними зв'язками. Який вибір відповідає принципам холізму і чому саме він дозволить уникнути непередбачуваної поведінки моделі?

У промисловому регіоні спостерігається погіршення здоров'я населення. Медичні служби звинувачують у цьому хімічний завод, соціологи – низький рівень життя, а екологи – загальну деградацію екосистем. Жодна з груп не може запропонувати ефективну програму дій. Як холистичний підхід та залучення трансдисциплінарної методології системного аналізу можуть допомогти об'єднати ці розрізнені погляди для покращення якості життєвого середовища людини?

ДОВКІЛЛЯ ЯК СИСТЕМА

Поняття «довкілля» з позицій загальної теорії систем розглядається не як пасивне тло для існування живих організмів, а як складна, динамічна та відкрита надсистема. У цьому контексті екологічні системи визначаються як цілісні об'єкти, утворені сукупністю живих організмів та середовища їхнього існування, які пов'язані між собою постійним обміном речовини, енергії та інформації. Головною особливістю таких систем є наявність емерджентних властивостей, що робить їх саморегульованими та здатними до підтримання внутрішньої динамічної рівноваги. Оскільки довкілля є безперервним просторовим континуумом, визначення його структурних меж завжди є одним із ключових методологічних завдань системного аналізу.

Для виділення меж екологічних систем сучасна наука спирається на три основні групи критеріїв: природні ландшафтні, басейнові та адміністративно-територіальні. Природні ландшафтні критерії базуються на геоботанічних, ґрунтових чи геоморфологічних характеристиках території, фіксуючи природні рубежі певних біогеоценозів. Басейновий принцип використовує межі річкових водозборів, що є найбільш об'єктивним підходом для моделювання потоків речовини та міграції хімічних елементів. Адміністративно-територіальні межі є суто штучними, проте вони є критично важливими для практичного екологічного менеджменту, оскільки саме в їхніх межах ухвалюються управлінські рішення, здійснюється фінансування природоохоронних заходів та ведеться правове регулювання якості середовища.

Важливою складовою системного аналізу довкілля є класифікація систем за ступенем їхньої антропогенної трансформації. За цим критерієм системи поділяють на природні (первинні екосистеми, що зберегли здатність до повної саморегуляції без втручання людини), антропогенно-змінені або похідні (селитебні зони, лісові насадження, де природні зв'язки частково деформовані) та штучні (агроценози, урбанізовані території, промислові комплекси). Штучні та глибоко трансформовані системи повністю залежать від постійного зовнішнього субсидування енергією та ресурсами з боку людського суспільства, що докорінно змінює їхній соціо-екологічний метаболізм та вимагає специфічних інструментів моніторингу.

Компонентна структура та архітектура довкілля представляє собою високоорганізовану просторову мозаїку, у якій кожен елемент виконує чітко визначену функцію в забезпеченні глобальної життєдіяльності. На макрорівні інтегральна система навколишнього середовища формується шляхом тісного переплетення чотирьох основних підсистем: атмосфери, гідросфери, літосфери (включно з її поверхневим шаром – педосферою) та біоти. Газова оболонка атмосфери виступає кліматичним регулятором та захисним екраном від космічного випромінювання. Гідросфера забезпечує транзит і депонування вологи, яка є універсальним розчинником та транспортним засобом для біогеохімічних колообігів. Літосфера та її педосферна складова (ґрунтовий покрив) забезпечують механічну опору та є головним резервуаром мінеральних елементів живлення. Нарешті, біота – сукупність усіх живих організмів – виступає активним ядром цієї архітектури, що пронизує та трансформує всі абіотичні геосфери, зв'язуючи їх у єдиний функціональний вузол.

На мезо- та мікрорівнях системного аналізу архітектура довкілля декомпонується на елементарні структурні блоки, якими є екотоп та біоценоз. Екотоп, що часто визначається як абіотичний екран або матриця, об'єднує сукупність усіх неживих факторів конкретної території, включаючи клімато- (режими світла, температури, вологості) та едафотоп (хімічні та фізичні властивості ґрунто-ґрунтів). Біоценоз, навпаки, є інтегральним біотичним блоком, який складається з фітоценозу, зооценозу та мікробіоценозу. У системному аналізі якості довкілля екотоп і біоценоз ніколи не розглядаються ізольовано. Екотоп задає жорсткі фізико-хімічні ліміти та ресурсні обмеження для живих організмів, тоді як біоценоз через процеси метаболізму, фотосинтезу та деструкції безперервно модифікує параметри самого екотопу. Прояв екологічної якості виникає саме на перетині цих двох блоків, де їхня нерозривна взаємодія формує елементарну екосистему (біогеоценоз), здатну до тривалого автономного існування та протидії зовнішньому антропогенному пресингу.

Взаємозв'язок та екологічні канали комунікації між геосферами визначають динамічну цілісність доквілля, перетворюючи ізольовані оболонки планети на єдину, чутливу систему. Ці канали комунікації функціонують через зони безпосереднього контакту геосфер, де атмосфера, гідросфера, літосфера та біота безперервно обмінюються потоками інформації, речовини та енергії. Головними рушійними силами, що забезпечують цей міжкомпонентний перенос, виступають сонячна радіація, гравітаційне поле та метаболічна активність живої речовини. Механізми переносу включають широкий спектр фізико-хімічних та біологічних процесів: від випаровування, конденсації та турбулентної дифузії в атмосфері до капілярного підняття вологи, абсорбції, фільтрації та біогенної міграції атомів. Через ці канали будь-яка речовина, потрапляючи в одну підсистему, неминуче залучається до глобального транзиту.

Тісна комунікація між геосферами зумовлює високу вразливість доквілля до антропогенного тиску, оскільки зміна екологічного стану однієї підсистеми ланцюговою реакцією погіршує якість інших. Яскравим прикладом такого системного ефекту є процеси, що відбуваються в педосфері. Грунт, виступаючи потужним геохімічним бар'єром, здатний тривалий час акумулювати стійкі техногенні забруднювачі, такі як важкі метали чи пестициди. Проте при зміні фізико-хімічних умов (наприклад, при кислотних дощах, зумовлених викидами в атмосферу) відбувається десорбція цих токсикантів. Запускається механізм міжкомпонентного переносу: забруднювачі вимиваються з ґрунтового профілю фільтраційними водами і мігрують у підземні водоносні горизонти або змиваються в поверхневі водойми.

Цей процес демонструє, як локальне забруднення суші трансформується у масштабну гідроекологічну кризу, отруюючи питні ресурси та руйнуючи водні біоценози. Системний аналіз доводить, що через наявність таких наскрізних каналів комунікації неможливо забезпечити екологічну безпеку окремої геосфери, не враховуючи її інтегральних зв'язків із рештою підсистем навколишнього середовища.

Специфіка доквілля як відкритої термодинамічної системи полягає в її здатності безперервно обмінюватися потоками речовини, енергії та інформації з космічним простором і внутрішніми шарами планети. На відміну від закритих чи ізольованих систем, які неминуче прагнуть до максимальної ентропії (хаосу) та термодинамічної рівноваги, екологічні системи підтримують високий рівень внутрішньої впорядкованості за рахунок постійного припливу зовнішніх ресурсів. Головним зовнішнім енергетичним процесором для біосфери виступає Сонце. Сонячна радіація є первинним «входом» системи, який запускає кліматичні механізми, зумовлює рух повітряних мас і кругообіг води. На біотичному рівні цей квантовий потік уловлюється автотрофними організмами за допомогою фотосинтезу, перетворюючись на хімічну енергію органічних сполук, яка згодом живить усі трофічні ланцюги доквілля.

Потокова структура доквілля базується на чіткому балансі між вхідними та вихідними компонентами. На «вхід» системи, окрім сонячної енергії, надходять космічний пил, метеорна речовина та внутрішнє ендегенне тепло Землі. У ХХІ столітті цей вхід штучно перевантажується антропогенними потоками синтетичних речовин та техногенної енергії. На «виході» з екологічної системи відбувається випромінювання низькотемпературного тепла в космічний вакуум, винесення речовини в процесі геологічного кругообігу та розсіювання відпрацьованої енергії. Поряд із речовиною та енергією критично важливими є інформаційні потоки: вхідні сигнали про зміну сонячної активності чи магнітного поля трансформуються всередині системи в адаптивні генетичні, біохімічні та поведінкові реакції біоти.

У класичній фізиці термодинамічна рівновага означає повну зупинку будь-яких макроскопічних процесів, що для екологічної системи було б еквівалентно біологічній смерті. Тому жива природа існує в стані стійкої нерівноваги. Завдяки концепції Іллі Пригожина екосистеми класифікуються як дисипативні структури – відкриті нелінійні системи, які, перебуваючи далеко від термодинамічної рівноваги, активно розсіюють (дисипують) енергію, що надходить ззовні. Цей постійний транзит енергетичного потоку дозволяє системі доквілля динамічно самоорганізовуватися, локально зменшувати власну ентропію, ускладнювати свою структуру та підтримувати стабільний гомеостаз в умовах мінливого зовнішнього середовища.

Інформаційні потоки та сигнали в навколишньому середовищі є вищою формою системної інтеграції довкілля, яка забезпечує координацію всіх його фізичних, хімічних та біологічних елементів. У системному аналізі якість середовища оцінюється не лише за матеріально-енергетичним балансом, але й за станом його інформаційного поля. Інформаційний потік у контексті екосистем – це безперервний процес передачі, сприйняття та кодування сигналів різної природи, які несуть відомості про зміни у внутрішній структурі системи чи в зовнішньому просторі. Ці сигнали можуть бути фізичними (зміна інтенсивності світла, температурні коливання, електромагнітні поля), хімічними (концентрації летких речовин, феромони, рН середовища) або структурно-морфологічними. Вони пронизують усі геосфери, виконуючи роль сполучного клею, який дозволяє екосистемі функціонувати як єдине ціле і вчасно реагувати на екологічні виклики.

Фундаментальну роль у підтриманні цієї системної організації відіграє трирівнева матриця, що складається з генетичної, біохімічної та поведінкової інформації. Гетерогенність та життєздатність біоти базується на генетичній інформації – закодованій в ДНК пам'яті поколінь, яка визначає еволюційний потенціал видів та їхню здатність адаптуватися до довгострокових змін клімату чи антропогенного пресингу. Біохімічна інформація забезпечує оперативне управління системою: через виділення фітонцидів, метаболітів та інших сигнальних молекул рослини і мікроорганізми регулюють щільність популяцій, блокують розвиток конкурентів або стимулюють симбіотичні зв'язки, формуючи стійку мережу гомеостазу. На вищому трофічному рівні поведінкова інформація, притаманна тваринам (акустичні сигнали, міграційні маршрути, територіальне маркування), синхронізує просторово-часову структуру біоценозу. Руйнування будь-якого з цих інформаційних рівнів, наприклад, через хімічний шум або деградацію біорізноманіття, призводить до дезорганізації всієї системи.

Оперативна адаптація довкілля до динаміки космічних та планетарних процесів реалізується через прямі й зворотні сигнальні зв'язки між біотою та чинниками неживої природи. Жива речовина безперервно сканує стан абіотичного екрана, використовуючи природні індикатори як тригери для запуску масштабних внутрішніх перебудов. Яскравим прикладом такої взаємодії є фенологічні маркери: зміна тривалості світлового дня (фотоперіодизм) та температурного режиму слугує для рослин і тварин сигналом до початку вегетації, цвітіння, скидання листя або сезонних міграцій. Водночас сигнальні зв'язки чітко проявляються під час реакції на екологічні стрес-фактори. Посуха, різке засолення ґрунту чи поява токсикантів сприймаються рецепторними системами організмів як аварійний сигнал, що запускає каскад захисних механізмів – від синтезу стресових білків до переходу клітин у стан анабіозу. Системний аналіз розглядає ці сигнальні мережі як головний інструмент екологічного моніторингу, адже за спотвореннями фенологічних ритмів та стресовими реакціями біоти можна діагностувати системні збої в якості довкілля на ранніх етапах.

Гомеостаз навколишнього середовища відображає його фундаментальну здатність підтримувати динамічну стабільність, структуру та функціональні параметри у вузькому діапазоні значень, незважаючи на постійні зовнішні збурення. З позицій системного аналізу ця властивість зумовлена кібернетичною природою екологічних систем. Екосистеми можна розглядати як складні кібернетичні пристрої, які не мають єдиного керуючого центру, але функціонують на основі децентралізованих мереж обміну інформацією та речовиною. У цих контурах живі організми та елементи абіотичного середовища одночасно виступають і датчиками, і регуляторами стану системи. Завдяки такій архітектурі довкілля самостійно оптимізує свої внутрішні процеси – від регуляції газового складу атмосфери до контролю чисельності окремих видів у біоценозах, демонструючи дивовижну автономію та здатність до самоорганізації.

Головним інструментом демпфування (гасіння) зовнішніх антропогенних та природних збурень у цій кібернетичній структурі є контури негативного зворотного зв'язку. Механізм їхньої дії полягає в тому, що будь-яке відхилення системи від оптимального стану викликає у відповідь реакцію, спрямовану на протидію цьому відхиленню та повернення до вихідної норми. Наприклад, якщо природний спалах чисельності фітофагів призводить до надмірного виїдання рослинності, це автоматично стимулює розмноження хижаків і паразитів, а також спричиняє дефіцит корму. Як наслідок, чисельність шкідників стрімко падає, і баланс відновлюється. Аналогічно, при

помірному надходженні органічного забруднення у річку активізується метаболізм гетеротрофних бактерій-деструкторів, які швидко мінералізують надлишок речовин, повертаючи водойму до первинного рівня чистоти. Негативні зворотні зв'язки забезпечують еластичність довкілля, дозволяючи йому поглинати зовнішні шоки без руйнування своєї архітектури.

Проте здатність довкілля до саморегуляції не є безмежною і лімітується межами стійкості, які в системному аналізі визначаються як буферна ємність системи. Буферна ємність – це інтегральна міра здатності екосистеми протистояти деструктивному впливу зовнішніх чинників (хронічному хімічному забрудненню, механічному пошкодженню ландшафтів, кліматичним аномаліям) без зміни своєї базової структури. Вона залежить від внутрішнього багатства системи: що вищим є біорізноманіття, складнішими – трофічні мережі та потужнішими – біогеохімічні бар'єри, то більший антропогенний тиск здатне компенсувати довкілля. Якщо масштаби або швидкість техногенного пресингу перевищують цей критичний буферний поріг, контури негативного зворотного зв'язку блокуються або заміщуються руйнівними позитивними зв'язками. У цей момент система втрачає гомеостаз, руйнується її структурна цілісність, і вона нелінійно переходить у новий, часто деградований стан, запуск якого свідчить про повне вичерпання екологічного ресурсу самовідновлення.

Динамічність та часові виміри функціонування довкілля визначають хронологічну архітектуру екосистем, у межах якої всі біотичні та абіотичні компоненти перебувають у стані безперервного руху та змін. Навколишнє середовище не є статичною структурою; його якість та функціональні показники жорстко підпорядковані астрономічним, геологічним та біологічним ритмам. Головною формою прояву цієї динамічності є циклічні процеси, що охоплюють добову, сезонну та багаторічну періодичність екологічних параметрів. Добова періодичність, зумовлена обертанням Землі навколо своєї осі, визначає коливання освітленості, температури та вологості, задаючи добові ритми фотосинтезу рослин і активності тварин. Сезонна періодичність, пов'язана з рухом планети навколо Сонця, формує річні цикли вегетації, міграцій та анабіозу біоти, що докорінно змінює ємність та продуктивність екосистем у різні пори року. На вищому рівні багаторічна періодичність, викликана циклами сонячної активності (наприклад, 11-річними циклами) або глобальними кліматичними осциляціями, зумовлює довгострокові хвилі динаміки зволоження та температурного режиму ландшафтів. Поряд із регулярною циклічністю, системний аналіз часових вимірів довкілля оперує поняттями про флуктуації, сукцесійні тренди та еволюційний розвиток природних систем. Флуктуації є ненаправленими, зворотними коливаннями стану екосистеми навколо певного середнього рівня, які викликані випадковими погодними аномаліями або короточасним антропогенним тиском; після їх припинення система повертається до вихідного гомеостазу. Натомість сукцесійні тренди представляють собою спрямований, закономірний і послідовний процес зміни однієї біотичної спільноти іншою на певній території під впливом внутрішніх або зовнішніх факторів. Сукцесія (наприклад, заростання лісових згарищ, кар'єрів або евтрофікація водойм) веде систему до відносно стабільного, зрілого стану – клімаксу, де потоки речовини та енергії максимально збалансовані. Найбільшим часовим масштабом володіє еволюційний розвиток природних систем, який відображає незворотні, якісні зміни біосфери в масштабах геологічного часу. Для системного аналізу якості довкілля розуміння цих часових координат є критичним, оскільки воно дозволяє відрізнити природні коливання параметрів середовища від небезпечних антропогенних деформацій.

Антропогенна складова в системі довкілля в XXI столітті трансформувалася з простого зовнішнього фактора збурення на повноправний, потужний ендегенний елемент. Сучасний екологічний менеджмент описує цю нову реальність через концепцію соціо-екологічного метаболізму, яка розглядає людське суспільство та його господарську інфраструктуру як специфічний внутрішній орган глобальної біосфери. У межах цієї концепції промислові центри, агроценози, транспортні мережі та житлова забудова об'єднуються в поняття техносфери. Техносфера функціонує як штучний метаболічний вузол, який, подібно до гетеротрофного організму, споживає гігантські обсяги природних ресурсів і виділяє у довкілля продукти своєї життєдіяльності. Проте, на відміну від природної біоти, цей штучний елемент не має внутрішніх

механізмів замкненого самовідновлення, через що його інтеграція в природну матрицю ландшафтів супроводжується жорсткими системними деформаціями.

Головна суперечність між природним та соціо-екологічним метаболізмом полягає в архітектурі їхніх матеріально-енергетичних потоків. Якщо природні системи базуються на циклічному русі речовини, то техносфера створює наскрізні, лінійні потоки ресурсів та відходів. На «вході» цієї антропогенної підсистеми відбувається колосальне вилучення відновлюваних і невідновлюваних багатств – від викопного палива та мінеральної сировини до прісної води та біомаси лісів. Ці ресурси проходять крізь каскад виробничих процесів, деградують і на «виході» перетворюються на хаотичний потік відходів: пластик, токсичні шлами, парникові гази та важкі метали. Такий лінійний характер антропогенного метаболізму створює подвійний пресинг на довкілля, виснажуючи природні резервуари з одного боку та переважуючи буферну ємність геосфер шлаками й емісіями з іншого.

Цей транзитний характер людської діяльності призводить до масштабного порушення природних балансів через розрив біогеохімічних колообігів. Природний гомеостаз мільйони років утримувався завдяки тому, що редуценти повністю мінералізували органічні залишки, повертаючи елементи в новий цикл. Людство кардинально зламало ці замкнені контури. Яскравими прикладами є розрив вуглецевого циклу через спалювання викопного палива, що викидає в атмосферу законсервованій на мільйони років вуглець, а також деформація циклів азоту й фосфору через масове виробництво мінеральних добрив. Вилучені з надр елементи лавиноподібно змиваються в гідросферу, викликаючи глобальну евтрофікацію водойм. Системний аналіз доводить, що розімкненість біогеохімічних циклів через антропогенну діяльність є головною причиною падіння екологічного здоров'я біосфери, оскільки природна біота не встигає утилізувати лінійні потоки речовин штучного походження.

Системні ефекти та емерджентні властивості довкілля відображають фундаментальний принцип цілісності, згідно з яким складні природні комплекси володіють якість, що відсутні у їхніх окремих компонентів. У системному аналізі закон емерджентності (або закон системної інверсії) є ключовим методологічним критерієм при оцінці якості середовища. Він доводить, що екосистема – це не просто механічна сума атмосфери, гідросфери, ґрунту та біоти, а якісно нове утворення із унікальною архітектурою внутрішніх зв'язків. Прояв емерджентності полягає в тому, що інтегральна стійкість, здатність до самоочищення та регенеративний потенціал ландшафту виникають лише в результаті синергетичної взаємодії всіх його частин. Спроба оцінити стан довкілля, ігноруючи ці системні ефекти, призводить до хибних управлінських рішень та недооцінки екологічних ризиків.

Саме тому інтегральний стан довкілля принципово неможливо оцінити шляхом простого арифметичного додавання показників забруднення окремих компонентів. Традиційний редуцціоністський підхід, який ізольовано порівнює концентрації токсикантів у повітрі, воді чи ґрунті з гранично допустимими нормативами, не враховує ефекти синергізму та антагонізму. У реальному середовищі сумісна дія кількох забруднювачів (наприклад, одночасна присутність важких металів та кислих опадів) часто викликає мультиплікативний ефект, коли їхній сумарний токсичний вплив на біоту зростає експоненціально, перевищуючи суму окремих ефектів. Крім того, просте додавання цифр ігнорує трофічні ланцюги, через які відбувається біоаккумуляція речовин. Холістичний аналіз доводить, що лише інтегральні індекси екологічного здоров'я, які базуються на метаболізмі системи та реакції біоіндикаторів, здатні адекватно відобразити реальну якість навколишнього середовища.

Методологічні засади моделювання довкілля в системному аналізі базуються на послідовному спрощенні складної природної реальності для побудови її адекватного наукового відображення. Цей процес реалізується через три ключові принципи: концептуальне, матричне та комп'ютерне моделювання екосистем. Концептуальне моделювання є первинним етапом, на якому дослідник формує якісну схему системи, визначаючи її головні елементи, вектори потоків речовини та контури зворотних зв'язків. Матричне моделювання дозволяє структурувати ці зв'язки у вигляді математичних та табличних залежностей, де фіксуються коефіцієнти міжкомпонентного переносу та інтенсивність антропогенного впливу. Нарешті, комп'ютерне моделювання

переводить ці матриці у динамічні цифрові алгоритми, що дає змогу імітувати поведінку довкілля у часі, прогнозувати відгук біоти на екологічні стреси та програвати різноманітні сценарії природокористування до їх реального втілення.

Проте практичне застосування цих принципів натрапляє на серйозну проблему дефіциту інформації та високого рівня невизначеності при побудові інтегральних індексів якості навколишнього середовища. Оскільки екосистеми є стохастичними та нелінійними, дослідникам завжди не вистачає точних моніторингових даних про стан прихованих підсистем чи кумулятивні ефекти нових хімічних речовин. Дефіцит інформації змушує вчених закладати у моделі певні припущення, що автоматично збільшує похибку розрахунків. При агрегуванні сотень різнорідних параметрів у єдиний інтегральний індекс виникає небезпека «втрати» критично важливих локальних сигналів про деградацію середовища. Системний аналіз розв'язує цей виклик шляхом впровадження ймовірнісних підходів, методів інтервальної математики та нечіткої логіки, які дозволяють будувати надійні екологічні прогнози навіть в умовах суттєвого браку первинних даних.

Людська цивілізація ХХІ століття опинилася в унікальній історичній точці, яку вчені дедалі частіше називають антропоценом – епохою, коли діяльність людини стала визначальною геологічною та екологічною силою планетарного масштабу. Масштабні трансформації ландшафтів, хронічне хімічне забруднення геосфер, деградація біорізноманіття та глобальні кліматичні девіації чітко продемонстрували, що класичні інструменти природокористування та охорони навколишнього середовища вичерпали свій потенціал. Протягом століть людина взаємодіяла з природою на основі утилітарного, лінійного та фрагментарного підходу. Довкілля сприймалося як пасивний склад безкінечних ресурсів та одночасно як бездонний приймач для відходів промисловості. Кожна проблема – будь то забруднення конкретної річки, всихання лісового масиву чи смог над мегаполісом – розглядалася ізольовано, як локальний технічний промах, який можна виправити точковим інженерним рішенням.

Такий редукаціоністський підхід зазнав краху. Спроби очистити воду в одному місці призводили до отруєння ґрунтів в іншому, а будівництво вищих димових труб на заводах не вирішувало проблему забруднення повітря, а лише переносило її на тисячі кілометрів, викликаючи кислотні дощі над заповідними територіями суміжних держав. Стало очевидним, що навколишнє середовище не є механічним конгломератом води, повітря, каміння та живих істот. Воно являє собою надскладну, інтегральну, динамічну та відкриту систему.

Системний аналіз якості навколишнього середовища виник як відповідь на цей виклик, запропонувавши фундаментально нову методологічну парадигму. У центрі цієї парадигми стоїть концепція «Довкілля як система». Системне бачення вимагає від дослідника та управлінця відмови від спрощеного, пофрагментного аналізу компонентів природи та переходу до вивчення мережі взаємозв'язків, синергетичних ефектів, контурів саморегуляції та інтегральних властивостей середовища. Розуміння довкілля як єдиної системи є єдиним науковим шляхом до розробки ефективних стратегій екологічної безпеки, нормування антропогенних навантажень та забезпечення сталого розвитку людства в межах біосфери. Цей суцільний текст присвячений детальному, фундаментальному розкриттю сутності довкілля як складної системи, аналізу її структури, властивостей та закономірностей функціонування.

Щоб глибоко зрозуміти сутність системи довкілля, необхідно звернутися до етимології та еволюції системних уявлень у науці. Термін «система» має давньогрецьке коріння і буквально означає «ціле, складене з частин» або «упорядковане поєднання». У сучасному системному аналізі під системою розуміють сукупність елементів, що перебувають у взаємозв'язках і взаємодіях один з одним, яка утворює певну цілісність, єдність і набуває нових інтегративних властивостей, не притаманних цим елементам окремо.

Стосовно навколишнього середовища системні ідеї визрівали в надрах різних наук протягом усього ХІХ та ХХ століть. Видатний природознавець Олександр фон Гумбольдт одним із перших описав взаємозв'язок між кліматом, рельєфом та географічним поширенням рослинних спільнот, заклавши основи ландшафтного мислення. Наприкінці ХІХ століття німецький біолог

Ернст Геккель увів у науковий обіг термін «екологія», визначивши її як науку про взаємини живих організмів між собою та з навколишнім органічним і неорганічним середовищем.

Справжній методологічний прорив відбувся у 1935 році, коли англійський ботанік Артур Тенслі запропонував поняття «екосистема». Тенслі наголошував, що для еколога окремі живі організми не можуть розглядатися ізольовано від їхнього фізичного оточення. Екосистема, за Тенслі, – це комплекс, що включає не лише комплекс організмів, але й весь комплекс фізичних факторів, що утворюють те, що ми називаємо середовищем проживання. Майже одночасно видатний український та радянський учений Володимир Вернадський розробив вчення про біосферу як глобальну живу систему планети, довівши, що жива речовина є найпотужнішим трансформатором енергії та геологічною силою, яка повністю сформувала сучасний хімічний склад атмосфери, океану та верхніх шарів літосфери. У другій половині XX століття, завдяки загальній теорії систем Людвіга фон Берталанфі, ці ідеї оформилися в цілісний методологічний апарат системного аналізу.

Специфіка довкілля як системи полягає в тому, що воно є природно-історичним об'єктом, який формувалася протягом мільярдів років еволюції. На відміну від штучних технічних систем (комп'ютерів, автомобілів, заводів), створених людиною за жорстко зафіксованими кресленнями, система довкілля не має єдиного геометричного чи механічного центру керування. Її стабільність, адаптивність та розвиток забезпечуються розподіленою мережею взаємодій між мільйонами живих і неживих компонентів. Технічна система при виході з ладу одного ключового елемента зазвичай повністю зупиняється. Система довкілля має колосальний рівень структурної та функціональної надмірності: якщо зникає або зазнає деградації один елемент (наприклад, певний вид рослин), його екологічні функції перебирають на себе інші елементи завдяки механізмам взаємозамінності. Це робить довкілля унікальним об'єктом, управління яким вимагає не жорсткого механістичного втручання, а тонкого і гнучкого регулювання.

Система довкілля має складну внутрішню архітектуру, яку можна структурувати на кілька взаємопов'язаних геосферних підсистем. Традиційно в системному аналізі виділяють абіотичний (неживий) та біотичний (живий) компоненти, які перебувають у безперервному кругообігу речовини та потоці енергії.

Абіотична підсистема включає три основні оболонки планети. Атмосфера (повітряний басейн): Виступає як газове середовище системи, забезпечує кліматичну регуляцію, перенесення тепла та вологи, а також захист від жорсткого космічного випромінювання. У системному аналізі якості повітря атмосфера розглядається як динамічне середовище, де відбуваються процеси адвекції (горизонтального перенесення вітром) та дифузії забруднюючих речовин.

Гідросфера (водний басейн): Охоплює всі океани, моря, річки, озера, болота та підземні води. Вода є універсальним розчинником та головним транспортним конвеєром системи довкілля, який переносить хімічні елементи та тепло по всій планеті.

Літосфера (тверда оболонка) та її верхній шар – педосфера (грунти): Грунт є унікальною підсистемою, «шкірою Землі», де абіотична речовина безпосередньо стикається і взаємодіє з живою речовиною. Грунт виконує функцію гігантського геохімічного бар'єра та буфера, що акумулює і фільтрує забруднювачі.

Біотична підсистема (біота) – це сукупність усіх живих організмів, які за своїми системно-екологічними функціями поділяються на три фундаментальні групи:

Продуценти (автотрофи): Переважно зелені рослини та фотосинтезуючі мікроорганізми. Вони виконують функцію «вхідних воріт» енергії в систему довкілля. Використовуючи сонячне світло, продуценти перетворюють прості неорганічні молекули (вуглекислий газ, воду, мінеральні солі) на складні енергоємні органічні сполуки.

Консументи (гетеротрофи): Тварини, а також людина. Вони виступають як споживачі та трансформатори органічної речовини, забезпечуючи її перерозподіл по трофічних мережах системи та виконуючи регуляторні функції щодо чисельності інших видів.

Деструктори (редуценти): Бактерії, гриби, ґрунтові безхребетні. Вони виконують замикаючу, фінальну функцію в системі. Деструктори розщеплюють мертву органіку (опале листя,

тіла тварин) назад до простих неорганічних компонентів, повертаючи їх в атмосферу та ґрунт для нового використання продуцентами.

Системний аналіз доводить, що жодна з цих підсистем не може існувати самотійно. Якість довкілля – це не статична характеристика окремої геосфери, а динамічний баланс у взаємодії між ними. Розглянемо як приклад лісову систему Центрального Полісся, зокрема ліси Словечансько-Овруцького кряжу. Якість цього природного комплексу визначається не просто сумою кубічних метрів деревини сосни чи дуба. Стан лісу – це результат нерозривної взаємодії: кореневі системи дерев утримують ґрунт від ерозії та регулюють рівень підземних вод (зв'язок біоти з літосферою та гідросферою); листя дерев поглинає вуглекислий газ і виділяє кисень та фітонциди, формуючи унікальний мікроклімат (зв'язок біоти з атмосферою); мертвий опад переробляється ґрунтовою мікрофлорою, створюючи гумус, який забезпечує ліс мінеральним живленням (внутрішній кругообіг системи). Якщо в цю систему впроваджуються інвазійні види рослин, наприклад, дуб червоний чи робінія звичайна, вони починають виділяти в ґрунт специфічні хімічні сполуки (таніни), які пригнічують діяльність місцевих деструкторів. Кругообіг речовин сповільнюється, змінюється хімічний склад лісової підстилки, що призводить до ланцюгової трансформації якості всього лісового ландшафту.

Для системного аналітика довкілля володіє низкою фундаментальних властивостей, які визначають його поведінку під впливом антропогенних навантажень. Головними серед цих властивостей є цілісність, емерджентність та синергізм.

Цілісність системи довкілля означає, що всі її компоненти пов'язані між собою настільки міцними і глибокими зв'язками, що зміна, пошкодження або вилучення будь-якої однієї ланки неминуче викликає ланцюгову реакцію трансформацій по всій системі. Довкілля реагує на зовнішній вплив як єдине ціле. Цілісність забезпечується наскрізними потоками речовини та енергії, які пронизують усі геосфери.

Емерджентність – це властивість системи, яка полягає у виникненні нових інтегративних якостей на рівні системи в цілому, які принципово відсутні у її окремих складових частин. Емерджентність є головним запереченням редукціонізму і доводить, що ціле не дорівнює сумі частин. Переважна більшість екологічних характеристик, які ми використовуємо для нормування якості середовища – такі як асиміляційна ємність, біотична стійкість чи здоров'я ландшафту – є суто емерджентними властивостями.

Яскравим прикладом емерджентності в системному аналізі є здатність природного водного об'єкта (наприклад, озера чи річки) до самоочищення від органічного забруднення. Якщо ми дослідимо окремо хімічні властивості молекули води, фізичні параметри кварцового піску на дні, молекулярний кисень атмосферного повітря чи фізіологію окремої бактерії, ми не знайдемо у них властивості «самоочищення». Вода – це просто розчинник, пісок – пасивне русло, бактерія лише споживає поживні речовини для поділу клітини. Але коли всі ці елементи об'єднуються у цілісну систему водойми, виникає нова якість. Річка перетворюється на гігантський природний біофільтр: течія насичує воду киснем, вища водяна рослинність перехоплює надлишок нітратів, колонії бактерій на донних каменях розщеплюють токсичну органіку, а молюски-фільтратори очищують воду від каламуті. Виникає емерджентна властивість – асиміляційна ємність водойми. Якщо людина зруйнує структуру системи (наприклад, зацементує береги, знищивши рослинність, або отруїть донну мікрофлору хімічними скидами), емерджентна якість зникне, і річка перетвориться на мертву стічну канаву, попри те, що фізично вода і пісок залишаться на місці.

Синергізм (синергетичний ефект) – це прояв емерджентності в динаміці взаємодії факторів, коли сумарний ефект від одночасної дії кількох чинників суттєво перевищує просту механічну суму ефектів від дії кожного фактора окремо. В екологічному системному аналізі синергізм має колосальне значення при оцінці токсичного навантаження на середовище. Довгий час у практиці охорони природи панував підхід, заснований на ізольованому нормуванні речовин за Гранично Допустимими Концентраціями (ГДК). Вважалося: якщо завод викидає речовину А в межах норми, а сусідній завод викидає речовину Б також у межах норми, то якість повітря є задовільною. Системний аналіз спростував цю логіку. Коли в атмосферному повітрі міста одночасно присутні, наприклад, діоксид азоту та сірчистий ангідрид, під дією сонячної радіації вони вступають у

взаємодію, взаємно посилюючи токсичність один одного та утворюючи фотохімічний смог. Їхній спільний руйнівний вплив на здоров'я людини та хвою прилеглих лісів є в рази вищим, ніж математична сума їхнього ізольованого впливу. Це і є прояв негативного синергізму антропогенно трансформованої системи довкілля.

Одним із найскладніших методологічних завдань у системному аналізі є обґрунтоване визначення меж досліджуваної системи. У технічних чи соціальних науках межі часто є очевидними: корпус приладу, територія заводу, державний кордон. У природі чітких, видимих «стін» не існує. Система довкілля є безперервною, і один ландшафт плавно переходить в інший через екотони – перехідні зони, що поєднують ознаки суміжних систем.

Межа системи в системному аналізі – це умовна або реальна лінія (поверхня), яка відокремлює досліджуваний об'єкт від зовнішнього середовища. Усе, що знаходиться всередині межі, підпорядковується внутрішній структурі системи і керується її закономірностями. Зовнішнє середовище – це сукупність усіх об'єктів та факторів, які не входять до складу системи, але суттєво впливають на неї або самі зазнають її впливу.

Неправильно проведені межі системи призводять до фатальних помилок в управлінні якістю довкілля. Розглянемо ситуацію з малим міським озером, якість води в якому різко погіршилася через масове цвітіння та дефіцит кисню. Якщо екологи обмежать межі досліджуваної системи береговою лінією дзеркала води, вони зможуть зафіксувати симптоми (концентрацію фосфатів, біомасу водоростей), але ніколи не зможуть управляти якістю водойми. Для вирішення проблеми межі системи необхідно розширити на ландшафтному рівні, включивши до її складу весь водозбірний басейн – ту територію, з якої дощові та талі води стікають в озеро. Тоді в контур системи потраплять сільськогосподарські поля, де застосовуються добрива, тваринницькі ферми та автомобільні дороги. Берегова лінія в такому разі стає лише внутрішньою межею між підсистемами, а зовнішня межа системи пролягає по лініях вододілів. У системному аналізі діє правило: межа має проводитися там, де інтенсивність внутрішніх взаємодій між елементами стає набагато вищою, ніж інтенсивність їхніх взаємодій з об'єктами ззовні.

За характером взаємодії із зовнішнім середовищем системи поділяються на ізольовані (не обмінюються нічим), закриті (обмінюються енергією, але не речовиною) та відкриті (безперервно обмінюються і речовиною, і енергією, і інформацією). Абсолютно всі системи довкілля локального та регіонального рівнів (ліс, річка, болото, океан, місто) є виключно відкритими системами. Функціонування відкритої системи можливе лише за умови постійного проходження крізь її межі наскрізного потоку ресурсів.

Розглянемо систему довкілля через призму трьох фундаментальних потоків. Потік енергії: На відміну від речовини, енергія в системі довкілля не може здійснювати нескінченний кругообіг. Вона підпорядковується законам термодинаміки. Потік енергії є лінійним та односпрямованим. На «вхід» системи надходить колосальна кількість сонячної енергії. Продуценти (рослини) уловлюють її під час фотосинтезу, перетворюючи на хімічну енергію органічних зв'язків. Далі ця енергія передається по трофічних ланцюгах консументам та деструкторам. На кожному етапі передачі, відповідно до закону термодинамічного розсіювання, велика частина енергії втрачається у вигляді тепла, що розсіюється в космічний простір. Система довкілля повинна безперервно отримувати сонячне підживлення, інакше вона миттєво скотиться у стан термодинамічного хаосу та смерті.

Кругообіг речовини: На відміну від енергії, матеріальні ресурси планети є обмеженими. Біосфера не отримує речовини з космосу (якщо не враховувати мізерну масу метеоритів). Тому існування життя забезпечується за рахунок глобальних та локальних біогеохімічних циклів. Хімічні елементи (вуглець, азот, фосфор, калій, сірка) безперервно здійснюють колообіг: переходять з абіотичного депо (атмосфери, води) в живі організми, а після їхньої смерті та деструкції знову повертаються в неживу природу.

Потік інформації: Сучасний системний аналіз розглядає інформацію як повноправний компонент довкілля. Інформаційний потік включає генетичну інформацію, що передається між поколіннями живих істот, сигнальну інформацію, за допомогою якої тварини комунікують між

собою, та хімічну інформацію (фітонциди рослин, феромони комах), яка регулює структуру біоценозів.

Для оцінки якості довкілля відкритість системи має ключове значення. Це означає, що якість конкретного природного об'єкта ніколи не визначається лише його внутрішнім станом. Якщо ми створюємо заповідник на території Словечансько-Овруцького кряжу, ми не можемо захистити його якість, просто побудувавши паркан навколо лісу. Заповідник як відкрита система критично залежить від параметрів «входу»: від якості повітряних мас, які приносять хмари з сусідніх промислових областей, від чистоти транскордонних річок, що беруть початок на сільськогосподарських територіях, та від міграційних шляхів тварин, які перетинають умовні межі охоронної зони.

Контури зворотних зв'язків та їхня роль у регуляції якості середовища

Функціонування будь-якої складної системи, здатної протидіяти зовнішнім збуренням і підтримувати свій якісний стан, базується на механізмі зворотних зв'язків. Зворотний зв'язок – це ситуація, коли результат функціонування системи (її вихідний сигнал) безпосередньо чи через ланцюг проміжних елементів впливає на початкові параметри або на поведінку самої системи (вхідний сигнал). У системному аналізі зворотні зв'язки поділяють на два фундаментальні типи: негативні та позитивні.

Негативний зворотний зв'язок – це механізм взаємодії, який спрямований на зменшення, пригнічення або компенсацію первинного відхилення параметрів системи від її нормального, рівноважного стану. Негативний зворотний зв'язок діє за принципом протидії і є головним інструментом стабільності, гомеостазу та самоочищення в системі довкілля.

Розглянемо класичний приклад негативного зворотного зв'язку в системі «хижак – жертва», який регулює біологічну якість лісу. Якщо в лісовому масиві через сприятливі кліматичні умови різко зростає чисельність травоядних тварин (наприклад, зайців), це призводить до збільшення харчової бази для хижаків (вовків). Вовки, отримуючи надлишок їжі, починають активніше розмножуватися, їхня чисельність також зростає. Велика кількість вовків починає інтенсивніше виїдати зайців, у результаті чого чисельність зайців падає і повертається до початкового екологічного оптимуму. Слідом за цим, через брак їжі, природним шляхом скорочується і чисельність вовків. Система здійснює коливання, але зберігає свою стабільність завдяки негативному контуру.

Позитивний зворотний зв'язок – це механізм, який спрямований на посилення, прискорення та мультиплікацію первинного відхилення параметрів системи від стану рівноваги. Позитивний зворотний зв'язок діє за принципом лавини або снігової кулі, ведучи до дестабілізації системи, руйнування її структури та катастрофічних якісних змін.

Яскравим і небезпечним прикладом домінування позитивного зворотного зв'язку є антропогенне евтрофування (цвітіння та заболочування) водойм внаслідок надмірного скидання фосфатних миючих засобів або змиву добрив з полів. Коли у воду потрапляє критична маса фосфору, починається вибухоподібне розмноження синьо-зелених водоростей. Водорості утворюють щільну плівку на поверхні води, яка повністю перекриває доступ сонячного світла вглиб озера. Через брак світла придонні вищі рослини починають масово гинути. Це призводить до накопичення колосальної маси мертвої органіки на дні. Бактерії, що розкладають цю органіку, починають споживати весь розчинений у воді кисень. У водоймі виникає гострий дефіцит кисню. Через брак кисню починається масовий замор риби та молюсків. Їхні мертві тіла падають на дно і стають новим додатковим джерелом органічного забруднення, яке стимулює ще більше розмноження бактерій, ще сильніший дефіцит кисню і повне знищення екосистеми озера. Первинне невелике забруднення запустило ланцюг подій, який сам себе посилює і веде до повної загибелі системи. Головне завдання системного управління якістю довкілля полягає в тому, щоб вчасно виявляти та пригнічувати позитивні зворотні зв'язки, що ведуть до екологічного колапсу, і підтримувати природні негативні зворотні зв'язки, які забезпечують безкоштовні екосистемні послуги з самоочищення середовища.

Здатність системи довкілля протидіяти антропогенним навантаженням описується трьома найважливішими системними характеристиками – гомеостазом, стійкістю та ємністю середовища.

Гомеостаз системи довкілля – це її здатність підтримувати динамічну рівновагу своїх внутрішніх параметрів, структури та функцій у відповідь на зміни, що відбуваються в зовнішньому середовищі або під впливом внутрішніх процесів. Гомеостаз у природі – це не статичний, замерзлий стан. Це «рухома рівновага», за якої всі ключові макропараметри середовища (температура, кислотність води, газовий склад повітря) здійснюють постійні коливання навколо певного оптимального значення, але ніколи не виходять за критичні межі завдяки злагодженій роботі тисяч контурів зворотних зв'язків.

Стійкість системи довкілля – це її здатність витримувати зовнішні антропогенні та природні навантаження, зберігаючи при цьому свою базову структуру, функціональні зв'язки та емерджентні властивості, або самостійно повертатися до початкового стану рівноваги після того, як зовнішній тиск припинився. У системній екології розрізняють два типи стійкості:

Пружна стійкість (резистентність) – здатність системи чинити опір зовнішньому тиску, залишаючись практично незмінною. Система діє як жорстка стіна. Наприклад, зріла діброва має високу пружну стійкість до короточасних посух: глибокі кореневі системи дерев дістають воду з підземних горизонтів, і ліс зовні ніяк не змінює свого стану.

Пластична стійкість (пружність або resilience) – здатність системи зазнавати значних деформацій, змін структури та чисельності елементів під впливом потужного удару, але потім швидко відновлювати свій первісний якісний стан завдяки внутрішнім резервам та адаптивності. Система діє як гумова стрічка або пружина. Прикладом є лучна екосистема або пойма річки після масштабної повені чи випалювання сухої трави: біомаса знищена, но за рахунок збереженого в ґрунті насіння та кореневищ луг за один-два сезони повністю відновлює свою якість.

Ємність навколишнього середовища (асиміляційна ємність) – це максимальний рівень антропогенного навантаження (викидів, відходів, вилучення ресурсів), який екологічна система здатна поглинати, нейтралізувати та переробляти протягом тривалого часу без незворотного руйнування своєї структури та погіршення якісних параметрів. Стійкість довкілля не є безмежною. Поки антропогенне навантаження знаходиться в межах ємності системи, гомеостаз успішно справляється з ним. Проте, якщо тиск перевищує поріг стійкості, внутрішні зв'язки руйнуються, негативні зворотні зв'язки вимикаються, і система зазнає системного переходу – стрибкоподібного переходу в абсолютно новий якісний стан, який найчастіше характеризується деградацією, спрощенням структури та втратою корисної для людини цінності середовища (наприклад, перетворення лісу на пустелю).

Якість навколишнього середовища як об'єкта дослідження ускладнюється тим, що довкілля належить до класу надскладних та нелінійних систем. Ці характеристики зумовлюють специфічну, часто парадоксальну поведінку природи, яка ставить у безвихідь класичних управлінців, звиклих до лінійного мислення.

Складність системи довкілля визначається не просто величезною кількістю елементів (мільйони тонн води чи трильйони бактерій), а насамперед колосальною кількістю та різноманітністю зв'язків між ними, наявністю багатьох рівнів ієрархії та високим ступенем невизначеності. У складній системі кожен елемент знаходиться в одночасній залежності від сотень інших чинників.

Зі складності логічно випливає нелінійність системи. Лінійне мислення базується на принципі пропорційності: якщо ми вдвічі збільшимо силу впливу, то результат також збільшиться вдвічі; якщо причина є незначною, то й наслідки будуть мізерними. У нелінійних екологічних системах цей принцип не працює. Нелінійність означає, що реакція системи на зовнішній вплив не є пропорційною цьому впливу і залежить від поточного стану самого об'єкта.

В умовах нелінійності тривалий час значний антропогенний тиск може викликати ледь помітні, лінійні зміни в довкіллі. Але при досягненні критичного порогу навіть мікроскопічний додатковий вплив (остання крапля) запускає вибухову, лавиноподібну реакцію системи. У теорії систем це явище пов'язане з поняттям детермінованого хаосу, або так званого «ефекту метелика». Цей термін ілюструє ідею про те, що помах крил метелика в одній частині планети може через складний ланцюг нелінійних атмосферних взаємодій викликати ураган в іншій півкулі.

Стосовно моніторингу якості навколишнього середовища нелінійність створює величезні труднощі для довгострокового прогнозування. Розглянемо поведінку системи тайги або тундри в умовах глобального потепління. Підвищення середньорічної температури на невелику частку градуса спочатку викликає лише незначне зміщення меж рослинності. Однак це незначне потепління запускає процес танення вічної мерзлоти. У мерзлоті заблоковані колосальні об'єми метану – потужного парникового газу, який за своїм ефектом значно перевершує вуглекислий газ. Танення мерзлоти вивільняє метан, який потрапляє в атмосферу і різко посилює парниковий ефект, що призводить до ще більш стрімкого танення мерзлоти. Система виходить із-під контролю, демонструючи нелінійну, вибухову поведінку, яку неможливо передбачити за допомогою простих графіків лінійної екстраполяції.

Система довкілля має чітко виражену ієрархічну (багаторівневу) структуру. Принцип ієрархічності стверджує, що нижчі рівні системи входять до складу вищих рівнів як підсистеми, при цьому кожен новий рівень організації володіє своїми унікальними емерджентними властивостями.

В системному аналізі якості навколишнього середовища традиційно виділяють такі основні рівні екологічної ієрархії:

Організмий рівень: Об'єктом є окремий живий організм (рослина, тварина, людина). Параметрами якості тут виступають фізіологічний стан, рівень накопичення токсикантів у тканинах, наявність патологій.

Популяційно-видовий рівень: Об'єктом є сукупність особин одного виду, які тривалий час проживають на певній території. Ключові параметри – чисельність, народжуваність, смертність, вікова структура та генетична різноманітність.

Біогеоценотичний (екосистемний) рівень: Об'єднує спільноти живих організмів різних видів (біоценоз) та їхнє неживе оточення (біотоп). Параметри якості – біопродуктивність, швидкість кругообігу речовин, стійкість трофічної мережі.

Ландшафтний (регіональний) рівень: Являє собою мозаїку взаємопов'язаних екосистем, що утворюють єдиний географічний комплекс (наприклад, річковий басейн чи гірський кряж). Параметри – просторова структура ландшафту, баланс між природними та антропогенними угіддями, міграція забруднювачів на великі відстані.

Біосферний (глобальний) рівень: Уся жива оболонка планети в цілому. Ключові параметри – стабільність глобальних геохімічних циклів вуглецю, азоту, води, озонового екрана та планетарного клімату.

Для системного аналітика розуміння ієрархічності є ключовим з кількох причин. По-перше, процеси та закони, які діють на одному рівні ієрархії, категорично не можна автоматично переносити на інші рівні. Те, що є благом для окремого організму, може виявитися катастрофою для екосистеми, і навпаки. Наприклад, якщо ми внесемо на поле велику кількість мінеральних добрив, ми покращимо індивідуальну якість та ріст конкретної рослини кукурудзи. Але на рівні екосистеми змив цих добрив дощами у сусідню річку викличе евтрофування і загибель усього водного біоценозу. По-друге, ієрархічність вимагає правильного масштабування при побудові прогностичних моделей. Кожен рівень ієрархії вимагає своїх специфічних індикаторів та методів вимірювання. При цьому вищі рівні завжди виступають як обмежувачі (рамки) для нижчих рівнів.

Складна мережева структура зв'язків та наявність внутрішніх буферів і депо всередині системи довкілля зумовлюють здатність середовища формувати кумулятивні (накопичувальні) та запізнілі (відтерміновані у часі) екологічні ефекти. Ці явища є найбільш підступними проявами системної природи природи, оскільки вони маскують реальні масштаби антропогенного руйнування.

Кумулятивний ефект полягає в тому, що система довкілля здатна протягом тривалого часу безперервно вловлювати, сорбувати та накопичувати всередині себе незначні, субтоксичні дози забруднюючих речовин, які надходять із зовнішнього середовища. При цьому поточні параметри якості середовища (наприклад, концентрація важких металів у воді річки) можуть залишатися ідеальними і не перевищувати встановлені нормативи ГДК. Проте речовина накопичується в

акумулюючих підсистемах: у донних відкладах, у гумусовому горизонті ґрунту або в жирових тканинах довгоживучих організмів.

Запізнілий ефект (або часовий лаг) – це проміжок часу між початком антропогенного впливу на систему та моментом прояву реальних системних наслідків цього впливу. Часовий лаг може тривати роками або навіть десятиліттями. Протягом цього часу система здається абсолютно здоровою, оскільки її внутрішні гомеостатичні механізми успішно компенсують руйнівний вплив за рахунок внутрішніх резервів. Проте, коли внутрішні буферні ємності повністю заповнюються, відбувається ефект «хімічної бомби уповільненої дії». Навіть незначний додатковий вплив або природна флуктуація (наприклад, весняний паводок чи зміна кислотності дощової води) призводить до раптового, масового вивільнення накопичених токсикантів у рухому, біологічно доступну форму.

Прикладом кумулятивного та запізненого ефекту є процес деградації лісових екосистем Словечансько-Овруцького кряжу під впливом хронічного промислового запилення та кислотних опадів. Металургійні чи енергетичні підприємства, розташовані за сотні кілометрів, роками викидають в атмосферу незначні об'єми діоксиду сірки та оксидів азоту. Ці речовини випадають на лісові масиви кряжу. Протягом перших десятиліть ліс демонструє високу стійкість. Ґрунти кряжу, що мають певний буферний потенціал (наприклад, за рахунок вмісту кальцію), успішно нейтралізують кислотність. Деревина продовжує рости, а зовнішні показники якості лісу здаються стабільними.

Однак у ґрунтовій системі безперервно йде прихований кумулятивний процес: іони кальцію вимиваються, а на їхнє місце стають токсичні іони вільного алюмінію, які руйнують кореневі волоски дерев. Одночасно кислотність знищує мікоризні гриби, позбавляючи дерева можливості засвоювати воду та поживні речовини. І ось, через тридцять років хронічного тиску, буферна ємність ґрунту вичерпується до нуля. Настає критичний момент. Після абсолютно звичайної, помірної літньої посухи в лісі починається раптове, лавиноподібне і масштабне всихання тисяч гектарів зрілих дерев. Для редуціоніста причиною катастрофи здасться «літня посуха». Холістичний системний аналіз доводить, що посуха стала лише тригером, а справжньою причиною є тридцятирічний кумулятивний процес прихованої деградації внутрішньої структури системи, який призвів до повної втрати її стійкості.

Сучасний етап розвитку людської цивілізації призвів до того, що на планеті практично не залишилися абсолютно чистих, незайманих природних систем. Людина утворила власну потужну підсистему – техносферу (сукупність міст, заводів, доріг, штучних матеріалів), яка агресивно інтегрувалася в природне середовище. Тому в системному аналізі об'єктом дослідження все частіше виступають не просто природні комплекси, а складні соціоекологічні системи (СЕС).

Соціоекологічна система – це інтегральна, холістична мегасистема, яка об'єднує в єдине ціле три головні компоненти: природне середовище (біоту, ландшафт, ресурси), людське суспільство (соціальні інститути, культуру, потреби) та технологічну інфраструктуру (промисловість, міста, транспорт, сільське господарство). Системний підхід стверджує, що СЕС не є набором трьох окремих коробок, які випадково опинилися поруч. Це єдиний, нерозривний організм, де соціальні закони людства та біологічні закони природи переплетені через тисячі контурів прямих і зворотних зв'язків.

Антропогенна трансформація довкілля під впливом техносфери майже завжди виявляється у двох системних процесах: спрощенні структури та розриві природних зв'язків. Коли людина створює сільськогосподарське поле замість первинного багатовікового лісу, вона замінює надскладну мережеву структуру лісового біоценозу (де взаємодіяли тисячі видів птахів, комах, грибів та рослин) на примітивну, монокультурну лінійну структуру кукурудзяного чи пшеничного поля. Спрощення структури системи автоматично означає катастрофічну втрату її стійкості та гомеостазу. Штучна монокультура не здатна до саморегуляції: вона беззахисна перед шкідниками та кліматичними коливаннями. Для підтримання її якості людина змушена постійно витратити колосальну кількість енергії та ресурсів ззовні – вносити пестициди, мінеральні добрива, здійснювати штучний полив. Техносфера перетворює стійкі природні системи на хрупкі, залежні підсистеми, які вимагають постійного штучного управління.

Управління соціоекологічними системами вимагає ухвалення комплексних рішень, які одночасно оптимізують технологічні процеси, компенсують екологічні збитки та інвестують у здоров'я та екологічну культуру громад.

Розуміння довкілля як складної системи вимагає кардинальної перебудови практичних інструментів екологічного менеджменту: методів проектування господарської діяльності (Оцінки впливу на довкілля – ОВД) та систем екологічного моніторингу.

Традиційний моніторинг довкілля довгий час будувався за так званим інгредієнтним принципом. Створювалася мережа постів спостереження, які з певною періодичністю відбирають проби повітря чи води і вимірюють у них концентрацію обмеженого набору речовин (наприклад, вміст чадного газу, пилу, фенолів). Отримані цифри порівнюються з нормативами Гранично Допустимих Концентрацій (ГДК). Якщо перевищень немає, стан середовища оголошується безпечним.

Системна методологія доводить глибоку обмеженість інгредієнтного моніторингу. По-перше, неможливо виміряти тисячі хімічних сполук, які людина щодня викидає в природу. По-друге, цей метод повністю ігнорує синергетичні ефекти, кумуляцію та реакцію самих живих систем. Тому сучасний системний аналіз впроваджує системний (екосистемний) моніторинг. Його головними інструментами є:

Біоіндикація та біотестування: Замість того, щоб аналізувати хімічний склад води за допомогою складних приладів, ми використовуємо живі організми-індикатори (наприклад, стан хвої сосни, видовий склад донних безхребетних у річці, генетичні аномалії у клітинах рослин). Живий організм є холистичним інтегратором: він усім своїм тілом реагує на всю сукупність хімічних, фізичних та кліматичних стресів одночасно, проявляючи приховані кумулятивні та синергетичні ефекти, які прилади зафіксувати не здатні.

Вимірювання інтегральних системних параметрів: Оцінюються характеристики, які описують стан екосистеми як цілого. Сюди належать: чиста первинна продукція біомаси, загальне дихання екосистеми, швидкість кругообігу ключових елементів, індекси біорізноманіття (наприклад, індекс Шеннона), рівень термодинамічної ентропії системи.

Відповідно змінюється і методологія проектування. При розробці нових промислових об'єктів системний підхід вимагає переходу від точкової оцінки викидів до концепції стратегічної екологічної оцінки (СЕО) ландшафтів. Головним критерієм при проектуванні стає не просто «не перевищити ГДК на виході з труби», а зберегти вільну асиміляційну ємність екосистеми в цілому. Господарський проект розглядається як новий елемент, який впроваджується в наявну холистичну структуру соціоекологічної системи, і аналітик повинен змодельовати всі нелінійні наслідки цього впровадження для цілісності та стійкості регіону.

Для остаточного закріплення теми розглянемо дві практичні ситуації (кейси), які яскраво ілюструють перевагу системного мислення над спрощеними інженерними рішеннями в реальному управлінні якістю навколишнього середовища.

Кейс 1. Басейновий підхід до управління якістю водних ресурсів

Проблема: Велика річка, що протікає через промисловий регіон, почала стрімко міліти, замулюватися, а вода в її нижній течії стала непридатною для пиття через постійне цвітіння та високу концентрацію токсикантів.

Спрощене (редукціоністське) рішення: Адміністрація міст почала діяти ізольовано. У верхній течії збудували потужні бетонні набережні для захисту від ерозії. У середній течії виділили кошти на механічне очищення плеса річки від водоростей за допомогою спеціальних суден-земснарядів. На очисних спорудах міст встановили додаткові хлоратори. Результат: кошти витрачені, але через два роки ситуація погіршилася, річка продовжує деградувати, риба гине, витрати на очищення води зростають.

Системне рішення: До аналізу залучили групу системних екологів, які реалізували басейновий підхід. Межі системи були розширені від русла річки до меж усього водозбірного басейну, включаючи всі притоки, підземні води, ліси та сільськогосподарські угіддя.

Аналіз виявив, що замулення річки та цвітіння води були викликані масовою вирубкою заплавної лісів та розорюванням прибережних захисних смуг під агрополя у верхів'ях приток.

Через відсутність лісового бар'єру дощові води безперешкодно змивали з полів мільйони тонн родючого ґрунту (замулення) разом із фосфатними добривами (тотальний стимул для цвітіння водоростей). Бетонні набережні лише прискорили течію, знищивши природні мілководдя, де відбувалося біологічне самоочищення води за рахунок очерету та молюсків.

Замість точкової боротьби з симптомами (очищення плеса), було реалізовано системну програму відновлення структури системи:

Запроваджено жорстку заборону на розорювання земель у радіусі прибережних смуг по всьому басейну.

Проведено масштабне висадження заплавної лісової та створено штучні водно-болотні угіддя (біоплато) в гирлах малих приток для перехоплення добрив.

Демонтовано частину бетонних укріплень і відновлено природні вигини (меандри) річки з піщаними перекатами для активізації природної аерації та самоочищення води бактеріями.

Через кілька років емерджентна властивість самоочищення річки повністю відновилася, якість води повернулася до норми, а витрати на штучне хімічне очищення на водоканалах міст знизилися в рази.

Кейс 2. Проблема інвазійних процесів у лісових екосистемах

Проблема: У лісових масивах Центрального Полісся (зокрема на Словечансько-Овруцького кряжі) спостерігається стрімке поширення інвазійного виду – дуба червоного, який витісняє аборигенний дуб черешчатий та сосну звичайну, утворюючи щільні одновидові зарості підліску, під якими зникає будь-яка інша рослинність.

Спрощене рішення: Лісівники розцінили проблему як суто механічну та конкурентну: інвазійне дерево росте швидше і забирає світло у місцевих сіянців. Було прийнято рішення про проведення санітарних рубок – випилювання дорослих дерев дуба червоного та ручне викошування його підліску. Результат: на місці вирубок із пнів та сплячих бруньок у ґрунті наступного року піднялася ще більш густа, щільна стіна інвазійної поросли. Якість лісу як джерела біорізноманіття катастрофічно впала.

Системне рішення: Системний аналіз ситуації показав, що успіх інвазії дуба червоного зумовлений не просто його швидким ростом, а глибокою трансформацією всієї холистичної структури лісової екосистеми:

Зміна ґрунтової підсистеми: Листя дуба червоного містить величезну кількість специфічних дубильних речовин (танінів), які є токсичними для місцевих ґрунтових черв'яків та мікроорганізмів-деструкторів. Опале листя інвазійного виду не перегниває роками, утворюючи щільну, суху, багат шарову «ковдру» на поверхні ґрунту.

Руйнування зв'язків нижніх ярусів: Ця дубильна ковдра повністю блокує проростання насіння місцевих трав'янистих рослин та аборигенних дерев (дуба черешчатого, сосон). Насіння місцевих видів просто не може пробитися до ґрунту через цей сухий ізолюючий шар. При цьому сам дуб червоний має великі, важкі жолуді з колосальним запасом поживних речовин, які легко пробивають власну лісову підстилку.

Трофічні ланцюги: Місцеві види комах-шкідників та птахів не адаптовані до живлення листям та жолудями дуба червоного, тому він опиняється в стані «екологічного вакууму» – без природних регуляторів чисельності.

Спираючись на системне розуміння контуру взаємодії, екологи запропонували програму дій, орієнтовану на відновлення внутрішніх біотичних бар'єрів системи:

Замість суцільних вирубок впроваджено технологію вибіркового затінення: створення умов, за яких зберігається щільний намет зрілих аборигенних дерев, що пригнічує світлолюбні сходи інвазійного виду.

Проведено підтримку популяцій диких кабанів та великих гризунів (лісових мишей), які активно поїдають жолуді дуба червоного в зимовий період, розриваючи ланцюг його насінневого розмноження.

Проведено експериментальне внесення специфічних штамів місцевих грибів-деструкторів, здатних прискорити розкладання танінів в лісовій підстилці, що руйнує ізолюючу «ковдру» і відкриває шлях для природного поновлення аборигенної флори.

Розгляд довкілля як складної, цілісної та відкритої системи є теоретичним фундаментом та практичним компасом сучасного системного аналізу. Природа та соціоекологічні системи демонструють нам дивовижні емерджентні властивості, глибоку взаємопов'язаність компонентів та нелінійну поведінку, які неможливо прорахувати за допомогою спрощених, ізольованих підходів. Кожен елемент нашого довкілля пов'язаний з іншими тисячами невидимих ниток прямих і зворотних зв'язків.

Локальне втручання в екосистему без урахування її системної архітектури неминуче викликає ланцюгову реакцію деградації середовища, кумулятивні та запізнілі ефекти якої можуть проявитися через десятиліття. Для еколога-аналітика системне бачення диктує головні правила професійної діяльності: завжди визначати межі системи з урахуванням ландшафтних зв'язків; оцінювати стан середовища за допомогою інтегральних індикаторів; ухвалювати управлінські рішення на основі аналізу соціоекологічних систем; і найголовніше – пам'ятати, що головне завдання людини полягає не в підкоренні або штучній перебудові природи, а в глибокому розумінні та підтримці її дивовижних емерджентних механізмів саморегуляції, гомеостазу та стійкості. Тільки такий шлях дозволить зберегти високу якість навколишнього середовища та забезпечити сталий розвиток людської цивілізації в єдиній і цілісній системі біосфери.

Питання та завдання для самоконтролю

Теоретичні запитання:

1. Які основні природні та антропогенні підсистеми виділяють у структурі довкілля як глобальної мегасистеми?
2. Охарактеризуйте поняття «навколишнє природне середовище» з позицій теорії систем та визначте його головні інтегративні властивості.
3. У чому полягає системна специфіка взаємодії між біотою та абіотичним компонентом навколишнього середовища?
4. Поясніть, як закон внутрішньої динамічної рівноваги системи проявляється в процесах самоочищення компонентів довкілля.
5. Що таке соціоекологічна система та які специфічні керуючі зв'язки виникають у ній при антропогенній трансформації ландшафтів?
6. Опишіть кругообіг речовин та потік енергії в довкіллі як фундаментальні системні процеси, що визначають його якісний стан.
7. Як межі та бар'єри в геосистемах впливають на міграцію, акумуляцію та розсіювання забруднюючих речовин?
8. Поясніть сутність поняття «емність навколишнього середовища» як системного обмеження для техногенного навантаження.
9. Яким чином термодинамічні закони (зокрема закон зростання ентропії) застосовуються для аналізу деградації природних систем?
10. Охарактеризуйте довкілля як динамічну систему, що перебуває в стані «рухомої рівноваги» (квазістаціонарного стану).
11. Які типи системних реакцій (відгуків) довкілля виникають у відповідь на хронічний та гострий техногенний пресинг?
12. Що розуміють під стійкістю довкілля до зовнішніх збурень і які внутрішні системні механізми її забезпечують?
13. Як принципи ієрархічності та емерджентності трансформуються при переході від локального до регіонального та глобального рівнів аналізу якості довкілля?
14. Поясніть роль природного капіталу та екосистемних послуг як вихідних параметрів при системному моделюванні екологічної безпеки.
15. Що таке просторово-часова гетерогенність довкілля і як вона враховується при розробці систем екологічного моніторингу?

16. Охарактеризуйте поняття «екологічний слід» як індикатор системного тиску людства на навколишнє середовище.
17. Яким чином інформаційні потоки та сигнали зворотного зв'язку в природних популяціях забезпечують стабільність біогеоценологічного покриву?
18. У чому полягає системна сутність явища екологічної декомпозиції (руйнування зв'язків) у порушених антропогенною діяльністю екосистемах?
19. Як концепція біотичної регуляції навколишнього середовища пояснює стабільність кліматичних параметрів планети на системному рівні?
20. Які методологічні підходи системного аналізу використовуються для оптимізації взаємодії в системі «суспільство – техніка – довкілля»?

Тестові завдання

Який фундаментальний системний процес у довкіллі забезпечує безперервне повторне використання хімічних елементів та стабільність якісного стану біосфери?

- А) Техногенез
- Б) Кругообіг речовин (біогеохімічні цикли)
- В) Екологічна сукцесія
- Г) Акумуляція токсикантів

Як називається соціоприродна мегасистема, що інтегрує в собі природне середовище, людське суспільство та створену ним технічну інфраструктуру?

- А) Біогеоценоз
- Б) Урбоекосистема
- В) Соціоекологічна система
- Г) Фітоценоз

Згідно з яким системним законом довкілля, будь-яка зміна в одному з компонентів природного середовища неминуче призводить до розвитку компенсуючих або деструктивних реакцій в інших його частинах?

- А) Закон внутрішньої динамічної рівноваги
- Б) Закон мінімуму Лібіха
- В) Закон оптимальності
- Г) Закон толерантності Шелфорда

Що є основним термодинамічним показником деградації та дезорганізації довкілля як системи під впливом надмірного антропогенного тиску?

- А) Зростання біомаси
- Б) Зниження концентрації вуглекислого газу
- В) Зростання ентропії системи
- Г) Збільшення енергетичного виходу

Як у системному аналізі називається просторово-часова неоднорідність компонентів довкілля, яку необхідно враховувати при проектуванні мереж екологічного моніторингу?

- А) Гетерогенність середовища
- Б) Ізоляція підсистем
- В) Стаціонарність системи
- Г) Гомогенність середовища

Яка системна характеристика довкілля відображає його спроможність засвоювати, нейтралізувати або виводити забруднюючі речовини без зміни своєї базової структури?

- А) Інформаційна ємність
- Б) Асиміляційна ємність (пропускна спроможність) середовища
- В) Еволюційна пластичність
- Г) Емерджентність біоти

Що є головним наслідком явища екологічної декомпозиції в природних системах під дією хімічного чи фізичного забруднення?

- А) Поява нових корисних зв'язків між видами
- Б) Руйнування функціональних зв'язків між компонентами та розпад цілісності системи
- В) Швидке зростання стійкості екосистеми до зовнішніх чинників
- Г) Повне припинення дії сили тяжіння всередині ландшафту

Концепція біотичної регуляції навколишнього середовища стверджує, що стабільність клімату та хімічних параметрів планети підтримується завдяки:

- А) Виключно геологічним та вулканічним процесам
- Б) Керуючій та стабілізуючій функції сукупності живих організмів (біоти)
- В) Космічному випромінюванню
- Г) Штучним інженерним спорудам людства

Який індикатор використовується в системному аналізі для кількісного виміру сукупного тиску людства на довкілля, вираженого в площі продуктивної території, необхідної для забезпечення ресурсами та асиміляції відходів?

- А) Коефіцієнт зволоження
- Б) Екологічний слід (Ecological Footprint)
- В) Індекс біорозформатингноманіття Шеннона
- Г) Бонітет ґрунту

Стан «рухомої рівноваги» довкілля, за якого його загальні інтегральні макропараметри залишаються сталими попри постійний потік речовини та енергії через межі системи, називається:

- А) Статичним спокоєм
- Б) Квазістаціонарним (динамічно рівноважним) станом
- В) Термодинамічним хаосом
- Г) Абсолютною ізоляцією

Ситуаційні задачі

У регіоні інтенсивного ведення сільського господарства тривалий час застосовували стійкі пестициди для захисту посівів. Через кілька років хімічний аналіз показав, що концентрація цих речовин у тканинах хижих птахів та рибоїдних ссавців місцевих водойм виявилася у багато разів вищою, ніж у самій воді чи ґрунті агроландшафту. Опишіть цей процес з погляду функціонування довкілля як системи, використовуючи поняття потоків речовини та акумуляції токсикантів у трофічних ланцюгах.

На околиці лісового масиву збудували широку швидкісну автомагістраль із суцільним асфальтним покриттям та високими захисними екранами. Екологи помітили, що це призвело не лише до загибелі тварин під колесами, а й до поступової деградації рослинного покриву вглиб лісу, зміни гідрологічного режиму та припинення природного поновлення лісоутворюючих порід. Яку системну роль відіграють бар'єри та штучні межі в геосистемах і які наслідки це має для цілісності довкілля?

Велике промислове місто розташоване в улоговині, оточеній пагорбами. У періоди тривалої безвітряної погоди над містом формується стійкий смог, який не розсіюється, попри те, що заводи працюють у звичному режимі й не перевищують установлені нормативи викидів. Проаналізуйте цю ситуацію з позицій концепції просторово-часової гетерогенності довкілля та поясніть, чому метеорологічні чинники можуть трансформувати поведінку урбоекосистеми.

Металургійний комбінат здійснює постійне хронічне скидання стічних вод у велике озеро. Протягом багатьох років якість води в озері залишалася задовільною завдяки активній роботі донних мікроорганізмів та водної рослинності. Однак після того, як поруч відкрили невеликий цех гальванопластики, екосистема озера миттєво зруйнувалася, вода стала токсичною, а процеси самоочищення повністю припинилися. Поясніть це явище за допомогою понять асиміляційної ємності середовища та екологічної декомпозиції системи під дією критичного навантаження.

У результаті вирубки заплавних лісів уздовж русла річки відбулася кардинальна зміна місцевого мікроклімату: літні температури повітря зросли, почастишали засухи, а рівень води в річці під час паводків почав критично підніматися, викликаючи масштабні руйнування.

Охарактеризуйте взаємозв'язок між біотичним та абіотичним компонентами довкілля і поясніть, як закон внутрішньої динамічної рівноваги системи описує реакцію ландшафту на втрату лісового покриву.

В екосистему Полісся активно впроваджується інвазійний вид рослин – рейнуртія японська, яка утворює густі одновидові зарості на порушених землях. Це призводить до витіснення аборигенних видів трав і чагарників, зміни структури комах-запилювачів та прискорення ерозії берегів водойм. Опишіть цей процес як системну трансформацію довкілля, де поява одного нового елемента змінює вектор динаміки та якісні характеристики всієї підсистеми.

Науковці порівнюють стан двох природних систем: незайманого заповідного степу та монокультурного кукурудзяного поля. Під час тривалої посухи поле практично повністю висохло і потребувало штучного відновлення, тоді як заповідний степ зберіг свою структуру та швидко відновився після перших дощів. Порівняйте ці системи за допомогою термодинамічного показника ентропії та поясніть, як рівень різноманітності зв'язків впливає на загальну стійкість довкілля.

При аналізі соціоекологічної системи промислового регіону виявилось, що кошти, які виділяються на лікування хронічних захворювань населення, значно перевищують витрати, необхідні для встановлення сучасних очисних фільтрів на місцевих фабриках. Проаналізуйте цю ситуацію з позицій теорії систем і докажіть необхідність урахування прямих та зворотних зв'язків між підсистемою охорони здоров'я та підсистемою промислового виробництва для оптимізації якості життєвого середовища.

У великому місті реалізували проект масового вертикального озеленення фасадів будівель та створення «зелених дахів». За кілька років спостережень з'ясувалося, що це не лише покращило естетичний вигляд, а й знизило середню температуру повітря на вулицях у літню спеку, зменшило навантаження на дощову каналізацію під час злив та знизило рівень шуму. Які системні властивості довкілля (зокрема емерджентність) проявилися внаслідок інтеграції природних елементів у технічну інфраструктуру міста?

Дослідники помітили, що тривалий помірний випас диких копитних тварин на луках стимулює ріст травостою та підтримує стабільний хімічний склад ґрунту. Однак повне вилучення тварин із системи призводить до накопичення відмерлої органіки, загнивання коріння та зниження якості лучної екосистеми. Охарактеризуйте стан «рухомої рівноваги» або квазістаціонарного стану довкілля та поясніть роль біотичних сигналів у підтримці стабільності макропараметрів системи.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДНИХ СИСТЕМ

Теоретичні основи екологічного моделювання базуються на положенні про те, що пряме експериментування з цілісними природними комплексами є або технічно неможливим, або етично неприпустимим через ризик незворотної деградації біосфери. Сутність цього методу полягає в заміні реальної екологічної системи її спрощеним штучним аналогом (моделлю), який зберігає ключові структурно-функціональні зв'язки оригіналу. Головна мета екологічного моделювання в системному аналізі – це отримання нового знання про закономірності функціонування довкілля, оцінка його поточної якості та прогнозування майбутніх реакцій на антропогенний пресинг. Для досягнення цієї мети вирішується низка фундаментальних завдань, серед яких: агрегування різнорідних моніторингових даних, виявлення прихованих причинно-наслідкових трендів, ідентифікація критичних точок перелому екосистем, а також оптимізація стратегій природокористування та обґрунтування управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.

У системному аналізі якості середовища класифікація моделей за характером відображення реальності є базовим інструментом вибору методології дослідження. За критерієм урахування чинника часу моделі поділяють на статичні, які фіксують стан екосистеми у конкретний момент і описують стаціонарні зв'язки, та динамічні, що відтворюють поведінку системи в часі під дією змінних факторів. За характером внутрішніх закономірностей моделі класифікують на детерміновані та стохастичні. Детерміновані моделі передбачають жорсткі, однозначні причиново-наслідкові залежності, де для кожного фіксованого набору вхідних параметрів система видає єдиний точний результат. Натомість стохастичні моделі враховують природну випадковість, мінливість та нелінійність екологічних процесів. Вони оперують апаратом теорії ймовірностей, що дозволяє отримувати прогнози у вигляді діапазонів значень або розподілів імовірностей, відображаючи реальну невизначеність поведінки складних природних об'єктів.

Практична цінність будь-якої розробленої схеми чи алгоритму визначається через поняття адекватності та чутливості екологічних моделей. Адекватність моделі – це міра її відповідності реальній екологічній системі, тобто здатність розробленого математичного чи комп'ютерного апарату відтворювати ключові властивості та поведінку оригіналу з каліброваною точністю. Перевірка адекватності (верифікація) здійснюється шляхом порівняння результатів моделювання з незалежними даними натурних спостережень або експериментів. Паралельно проводиться аналіз чутливості екологічної моделі, який полягає в оцінці того, як зміна вхідних змінних або внутрішніх коефіцієнтів впливає на кінцевий результат прогнозу. Виявлення параметрів із найвищою чутливістю є критично важливим, оскільки навіть мінімальна похибка у їхньому визначенні може повністю спотворити модельовану картину, тоді як параметри з низькою чутливістю дозволяють спрощувати структуру моделі без втрати її загальної адекватності.

В екологічному системному аналізі класифікація моделей за їхньою математичною структурою та ставленням до факторів часу і випадковості є визначальною для вибору методів моніторингу та прогнозування. Нижче детально розглянуто чотири базові типи моделей.

Детерміновані моделі базуються на жорстких, однозначних причинно-наслідкових зв'язках. Вони припускають, що поточний стан системи та зовнішні чинники повністю і стохастично незалежно визначають її майбутній стан. У таких моделях відсутні випадкові змінні: для одного й того самого набору вхідних даних модель завжди видаватиме абсолютно однаковий результат. Наприклад моделювання процесу фотосинтезу фітопланктону в аналітичних розрахунках залежно від інтенсивності сонячної радіації (без урахування випадкових коливань температури чи виїдання зоопланктоном). Класичним прикладом є експоненціальна модель росту популяції за умов необмежених ресурсів (модель Мальтуса) (рис. 2)

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N$$

Де N — чисельність популяції, t — час, а r — константа питомої швидкості росту. Інтегральна форма цього диференціального рівняння чітко визначає чисельність у будь-який момент часу: $N(t) = N_0 \cdot e^{rt}$.

Рис. 2 Модель Мальтуса для росту популяції за умов необмежених ресурсів

Стохастичні моделі, на відміну від детермінованих, враховують природну випадковість, мінливість та ймовірнісний характер екологічних процесів. Вхідні параметри або внутрішні коефіцієнти в таких моделях є випадковими величинами, що описуються певними законами розподілу ймовірностей. Результатом моделювання є не одне число, а розподіл імовірностей або довірчий інтервал. Прикладом може бути прогноз поширення плями нафтового забруднення у морі з урахуванням випадкових штормових поривів вітру та турбулентних завихрень течії (рис. 3).

$$dN = r \cdot N \cdot dt + \sigma \cdot N \cdot dW_t$$

Де $r \cdot N \cdot dt$ — детермінована складова росту, σ — коефіцієнт інтенсивності випадкових коливань середовища, а dW_t — вінерівський процес (білий шум), який додає елемент випадковості на кожному кроці розрахунку.

Рис. 3. Модифікація моделі росту популяції із додаванням стохастичного «шуму»

Статичні моделі відображають стан екологічної системи у фіксований момент часу або описують систему, яка перебуває у стаціонарному (незмінному) режимі функціонування. Час у таких моделях не виступає як незалежна змінна, а зв'язки між компонентами фіксуються у вигляді постійних структурних або балансових співвідношень. Наприклад, оцінка поточного балансу біогенних елементів у водосховищі або розрахунок екологічного сліду міста за один рік (рис.4) .

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

Де Y — інтегральний індекс якості води, X_i — стаціонарні концентрації окремих забруднювачів (наприклад, сульфатів, нітратів), а β_i — вагові коефіцієнти, визначені для поточного стану системи.

Рис. 4. Матричні балансові моделі або лінійні регресійні рівняння оцінки якості середовища:

Динамічні моделі описують поведінку екологічної системи у часі. Вони фіксують процеси переходу системи з одного стану в інший, дозволяючи відстежувати сукцесійні тренди, накопичення токсикантів у трофічних ланцюгах чи реакцію біоти на тривалий антропогенний пресинг. Час тут є головною незалежною змінною. Прикладом може слугувати моделювання процесу евтрофікації озера протягом кількох десятиліть або динаміка відновлення лісового фітоценозу після вирубки (рис. 5).

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x - \beta xy \\ \frac{dy}{dt} = \delta xy - \gamma y \end{cases}$$

Де x – чисельність популяції жертви, y – чисельність популяції хижака, t – час, а $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – екологічні коефіцієнти взаємодії, що зумовлюють циклічні коливання обох підсистем у часовому вимірі.

Рис. 5. Класична система диференціальних рівнянь типу «хижак – жертва» (модель Лотки – Вольтерри):

В екологічному системному аналізі розробка будь-якої моделі завершується двома фундаментальними процедурами, які визначають її практичну цінність для управління якістю довкілля: оцінкою адекватності та аналізом чутливості. Оскільки природні системи нелінійні та стохастичні, ці інструменти дозволяють зрозуміти, наскільки точно модель відтворює реальність і яким параметрам слід приділити максимум уваги під час екологічного моніторингу. Адекватність екологічних моделей – це її здатність відтворювати досліджувані властивості та поведінку реальної екосистеми з наперед заданою точністю. Верифікація (перевірка на адекватність) здійснюється шляхом порівняння теоретичних значень, отриманих на моделі (Y_{mod}), із фактичними даними натурних спостережень чи екологічного моніторингу (Y_{exp}) (рис. 6).

Середньоквадратична помилка (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{exp,i} - Y_{mod,i})^2}$$

Що ближче значення $RMSE$ до нуля, то вища якість моделі.

Критерій ефективності Неша-Саткліфа (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{exp,i} - Y_{mod,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{exp,i} - \bar{Y}_{exp})^2}$$

Де \bar{Y}_{exp} – середнє значення експериментальних даних. Якщо $NSE = 1$, модель є абсолютно ідеальною; якщо $NSE < 0$, то просте середнє арифметичне прогнозує стан середовища краще, ніж побудована модель.

Рис. 6. Використання статистичних критеріїв для кількісної оцінки адекватності моделі

Чутливість моделі – це міра реагування вихідних екологічних показників (наприклад, концентрації кисню у воді, біомаси фітоценозу) на зміну вхідних параметрів, початкових умов або внутрішніх коефіцієнтів (наприклад, швидкості розкладу токсиканту, температурного коефіцієнта). Аналіз чутливості вирішує три завдання: спрощення моделі: параметри з нульовою чутливістю можна зафіксувати як константи; пріоритезація моніторингу: параметри з найвищою чутливістю потребують максимально точного вимірювання в полі, оскільки навіть мізерна похибка у них повністю спотворить прогноз; виявлення критичних порогів: допомагає знайти точки нелінійного зламу системи.

Для аналітичних моделей розраховують коефіцієнт відносної (безрозмірної) чутливості (S_R), який показує, на скільки відсотків зміниться функція стану системи Y при зміні параметра X на 1% (рис. 7)

$$S_R = \frac{\partial Y}{\partial X} \cdot \frac{X}{Y}$$

Рис. 7. Коефіцієнт відносної (безрозмірної) чутливості

Якщо модель реалізована у вигляді складного комп'ютерного алгоритму, де взяти похідну неможливо, застосовують чисельний підхід (метод «one-at-a-time») (рис.). Розглянемо класичну модель динаміки розчиненого у річці кисню (SDS) після скиду органічного забруднення (рис. 8).

$$S = \frac{\Delta Y / Y_0}{\Delta X / X_0}$$

Рис. 8. Метод «one-at-a-time»

$$\frac{dD}{dt} = k_1 L - k_2 D$$

Де L – концентрація органіки, k_1 – коефіцієнт деоксигенації (руйнування органіки бактеріями), k_2 – коефіцієнт реаерації (насичення киснем із повітря).

Рис. 9. Модель Стрітера-Фелпса

Побудова концептуальних та математичних моделей екосистем у системному аналізі якості навколишнього середовища являє собою чітко структурований ітераційний процес, який дозволяє перевести складні й хаотичні взаємозв'язки у живій природі на мову точних математичних алгоритмів. Першим етапом цього процесу є постановка задачі та формалізація, де дослідник чітко визначає мету моделювання, просторово-часові межі досліджуваної системи та відсікає другорядний інформаційний шум, який не впливає на кінцеву якість середовища. На основі цього вербального опису здійснюється перехід до другого етапу – розробки концептуальної моделі. Вона формується у вигляді якісної блок-схеми, що візуалізує архітектуру системи: визначає ключові змінні стану або резервуари, такі як біомаса продуцентів чи концентрація забруднювачів, а також напрямки потоків речовини та енергії між ними і наявні контури зворотних зв'язків.

На третьому етапі відбувається математична формалізація, під час якої якісна концептуальна схема переводиться у систему рівнянь, найчастіше – диференціальних. В основі цих розрахунків лежить закон збереження маси та енергії, де для кожного резервуара складається балансове рівняння, у якому зміна стану дорівнює різниці між вхідними та вихідними потоками, а для опису динаміки біотичних компонентів застосовуються специфічні екологічні залежності, наприклад, функції типу Моно для врахування лімітуючих чинників. Наступним критично важливим кроком є параметризація та калібрування моделі, що полягає у пошуку емпіричних коефіцієнтів у науковій літературі та тонкому комп'ютерному налаштуванні рівнянь під реальні історичні дані екологічного моніторингу конкретного об'єкта.

Завершальними етапами виступають верифікація, аналіз чутливості та безпосередній екологічний прогноз. Верифікація дозволяє оцінити адекватність моделі шляхом порівняння теоретичних результатів із незалежним масивом натурних спостережень, тоді як аналіз чутливості виявляє параметри, які найбільше впливають на стабільність системи і вимагають максимально точного вимірювання. Повністю налаштована та перевірена модель перетворюється на ефективний цифровий полігон для імітаційних експериментів, що дозволяє фахівцям програвати різноманітні сценарії антропогенного навантаження, прогнозувати ризики перетину точок перелому екосистем, розраховувати гранично допустимі екологічні навантаження та обґрунтовувати стратегії превентивного екологічного менеджменту.

Формалізація природних процесів у системному екологічному аналізі – це переклад складних, багатокомпонентних явищ реального світу на мову чітких структур і математичних залежностей. Цей перехід є базовим етапом екологічного моделювання і відбувається за суворим алгоритмом: від суб'єктивного вербального (текстового) опису природи до побудови якісної блок-схеми (концептуальної моделі), яка згодом перетворюється на кількісну математичну модель. Від вербального опису до концептуальної блок-схеми у реальному житті екосистема виглядає як хаотичне переплетення сотень факторів. Вербальний опис фіксує лише загальні спостереження.

Візьмемо за приклад озеро, яке забруднюється мінеральним фосфором, що змивається з полів. Цей фосфор поглинається водоростями, що призводить до їхнього бурхливого росту. Коли водорості відмирають, вони осідають на дно, де їх розкладають бактерії, споживаючи при цьому розчинений у воді кисень. Дефіцит кисню викликає замор риби.

Щоб перетворити цей текст на якісну блок-схему (концептуальну модель), системний аналітик абстрагується від деталей і виділяє три головні кібернетичні елементи. По перше, це змінні стану або компоненти, які здатні накопичувати речовину або енергію. На блок-схемах вони зображуються у вигляді прямокутників. У нашому прикладі це концентрація фосфору у воді, біомаса водоростей та концентрація розчиненого кисню. Процеси перенесення речовини між резервуарами або за межі системи зображуються стрілками. Наприклад, змив фосфору, поглинання водоростями, та їхнє відмирання та деструкція. Регуляторні чинники та зворотні це умови, які прискорюють або гальмують потоки (температура, сонячне світло, токсичність). Після того як архітектуру зв'язків зафіксовано на блок-схемі, кожен блок і кожна стрілка трансформуються в математичні вирази, що базуються на законах збереження маси, енергії та кінетики біологічних процесів (рис. 10).

Нехай P – концентрація фосфору у водоймі в момент часу t .

- Вербальний опис: Фосфор надходить із постійною швидкістю зі стічними водами (I), виноситься течією пропорційно його поточної концентрації з коефіцієнтом q , а також споживається водоростями зі швидкістю, яка залежить від їхньої біомаси (A) та питомої швидкості поглинання (μ).
- Математичне рівняння балансу:

$$\frac{dP}{dt} = I - q \cdot P - \mu(P) \cdot A$$

Рис. 10. Формалізація динаміки лімітуючого біогену

Живі організми не можуть споживати ресурси нескінченно швидко (рис. 11). Формалізація процесу живлення водоростей (A) фосфором (P) вимагає врахування ефекту насичення. Вербальний опис: За низької концентрації фосфору швидкість росту водоростей росте прямо пропорційно його кількості, але при високих концентраціях система насичується, і швидкість досягає свого максимуму (μ_{\max}).

$$\mu(P) = \mu_{max} \frac{P}{K_s + P}$$

Де K_s — константа напівнасичення (концентрація фосфору, за якої швидкість росту дорівнює половині від максимальної). Графік цієї функції наочно демонструє нелінійність природного процесу:

Рис. 11. Рівняння Міхаеліса-Ментен

Поєднуючи блоки концептуальної схеми, ми отримуємо завершену математичну модель динаміки «Фосфор (P) – Водорості (A)» (рис. 12).

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = I - qP - \left(\mu_{max} \frac{P}{K_s + P} \right) A \\ \frac{dA}{dt} = \left(\mu_{max} \frac{P}{K_s + P} \right) A - m \cdot A \end{cases}$$

Де m — коефіцієнт природної смертності та осідання водоростей.

Рис. 12. Математична модель динаміки «Фосфор (P) – Водорості (A)»

В основі системного аналізу якості навколишнього середовища покладено фундаментальний методологічний принцип: будь-яка екологічна система функціонує відповідно до законів збереження маси (речовини) та енергії. Математичне вираження цих законів дозволяє дослідникам кількісно оцінювати антропогенне навантаження, прогнозувати накопичення забруднювачів у геосферах та моделювати стійкість біоценозів. Закон збереження маси стверджує, що речовина не може виникнути з нічого і не може зникнути безслідно, вона лише трансформується з однієї хімічної чи фізичної форми в іншу. Для будь-якого виділеного об'єму довкілля (водойми, ділянки ґрунту, повітряного басейну міста), який у системному аналізі називається контрольним об'ємом, загальне математичне рівняння балансу речовини за одиницю часу має такий вигляд (рис. 13-14).

$$\frac{dM}{dt} = \sum \dot{M}_{in} - \sum \dot{M}_{out} \pm R$$

$\frac{dM}{dt}$ — швидкість зміни маси досліджуваної речовини (забруднювача, біогену) всередині системи;

$\sum \dot{M}_{in}$ — сумарний вхідний потік речовини в систему (наприклад, техногенні викиди, приток із річковими водами);

$\sum \dot{M}_{out}$ — сумарний вихідний потік речовини із системи (винесення течією, вітрове перенесення, збирання врожаю);

R — швидкість внутрішніх хімічних або біологічних перетворень речовини (швидкість хімічного розпаду, фотолізу, мікробіологічної деструкції чи біомасового поглинання). Знак «+» використовується, якщо речовина утворюється всередині системи, «-» — якщо вона руйнується.

Рис. 13. Математична модель із контрольним об'ємом

Стаціонарний стан (Static / Steady State): Якщо система перебуває у стабільному стані, накопичення речовини не відбувається ($\frac{dM}{dt} = 0$). Рівняння спрощується до алгебраїчного:

$$\sum \dot{M}_{in} + R_{generation} = \sum \dot{M}_{out} + R_{consumption}$$

Консервативна (інертна) речовина: Якщо забруднювач не вступає в хімічні реакції і не розкладається (наприклад, важкі метали чи пластик), то термін реакції $R = 0$:

$$\frac{dM}{dt} = \sum \dot{M}_{in} - \sum \dot{M}_{out}$$

Рис. 14. Окремі випадки балансу речовини

Екологічні системи є відкритими термодинамічними системами, функціонування яких повністю залежить від зовнішнього припливу енергії (передусім сонячної). Математичний баланс енергії базується на Першому законі термодинаміки (законі збереження енергії) (рис. 15).

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} + \sum \dot{H}_{in} - \sum \dot{H}_{out}$$

$\frac{dE}{dt}$ – швидкість зміни повної внутрішньої енергії системи;

$\sum \dot{Q}$ – потік тепла, що надходить у систему ззовні (інсоляція, геотермальне тепло);

$\sum \dot{W}$ – швидкість виконання системою роботи над зовнішнім середовищем (наприклад, розширення газів, підйом вологи);

$\sum \dot{H}_{in}$ та $\sum \dot{H}_{out}$ – ентальпія (енергоємність) матеріальних потоків, що входять у систему та виходять із неї разом із речовиною (наприклад, теплі стічні води ТЕС або холодне повітря фронту).

Рис. 15. Загальне рівняння енергетичного балансу для контрольного об'єму екосистеми

Моделювання процесів переносу та трансформації забруднювальних речовин є одним із центральних та найбільш наукомістких інструментів у системному аналізі якості навколишнього середовища. Його головна мета полягає у створенні адекватних математичних і комп'ютерних моделей, які дозволяють не лише описувати поточний стан екосистем, а й прогнозувати їхні зміни під впливом антропогенного навантаження, обґрунтовувати управлінські рішення та мінімізувати екологічні ризики. З точки зору системного підходу, навколишнє середовище розглядається як складна, динамічна, багатокomпонентна система, де повітряне, водне та ґрунтове середовища перебувають у постійному взаємозв'язку, а процеси поширення домішок мають просторово-часову залежність.

Основу моделювання переносу становлять фізико-гідродинамічні та метеорологічні закономірності. Перенос речовин у біосфері відбувається переважно за рахунок двох ключових механізмів: адвекції (або конвекції) та дифузії. Адвективний перенос визначається макроскопічним рухом самого носія – повітряних мас або водних потоків, що переміщують забруднювачі на значні відстані відповідно до поля швидкостей вітру чи течії. Дифузійний перенос, який поділяється на молекулярний та значно масштабніший турбулентний, відповідає за розсіювання, перемішування та вирівнювання концентрацій речовини під впливом хаотичних пульсацій середовища. Математично ці процеси описуються фундаментальними рівняннями в частинних похідних, зокрема класичним рівнянням конвекції-дифузії, що базується на законі збереження маси. Для атмосфери такі моделі додатково враховують параметри приземного шару,

температурну інверсію та рельєф місцевості, а для гідросфери – морфометрію водойм, стратифікацію води та явища турбулентного обміну.

Проте перенос є лише однією стороною процесу. Потрапляючи в навколишнє середовище, забруднювальні речовини піддаються трансформації – комплексу хімічних, фізичних та біологічних перетворень, які суттєво змінюють їхню токсичність, рухливість та час життя в екосистемі. Хімічна трансформація включає процеси окиснення, фотолізу під дією сонячного випромінювання та гідролізу. Наприклад, класичним прикладом трансформації в атмосфері є утворення фотохімічного смогу або перетворення діоксиду сірки та оксидів азоту на кислоти, що призводить до кислотних дощів. Фізична трансформація охоплює фазові переходи: випаровування, конденсацію, а також процеси седиментації (осадження під дією сили тяжіння) та абсорбції на поверхні твердих частинок (аерозолів або донних відкладень). Біологічна трансформація (біодеградація) зумовлена життєдіяльністю мікроорганізмів, які здатні розкласти органічні забруднювачі, хоча в деяких випадках біометалювання (наприклад, перетворення ртуті на метилртуть) може призвести до появи значно небезпечніших сполук, які накопичуються в трофічних ланцюгах.

У системному аналізі якості довкілля всі ці чинники інтегруються в єдину систему рівнянь, де джерела забруднення (точкові, лінійні або площинні) задаються як граничні або внутрішні умови, а процеси трансформації та виведення речовини з системи (сухе й вологе осадження, хімічний розпад) моделюються за допомогою кінетичних коефіцієнтів різного порядку. Реалізація таких моделей вимагає залучення потужних чисельних методів, таких як методи скінченних різниць, скінченних елементів або об'ємів, оскільки аналітичні розв'язки можливі лише для сильно спрощених та ідеалізованих умов.

Сучасний системний аналіз оперує різними класами моделей залежно від масштабу задач: від локальних моделей розсіювання викидів окремого підприємства (наприклад, гаусові моделі факела) до регіональних та глобальних кліматичних моделей хімії атмосфери чи океану. Інтеграція цих моделей із геоінформаційними системами (ГІС) дозволяє візуалізувати поля концентрацій забруднювачів у реальному часі, виявляти зони екологічного та соціогенного ризику, проводити ретроспективний аналіз для пошуку прихованих винуватців екологічного збитку, а також програвати різні сценарії екологічної політики, оцінюючи ефективність запланованих природоохоронних заходів ще до їх впровадження. Таким чином, моделювання процесів переносу та трансформації перетворює розрізнені моніторингові дані на обґрунтовану прогностичну основу для сталого управління якістю навколишнього середовища.

Математичний опис міграції токсикантів у геосферах базується на фундаментальному законі збереження маси. У загальному вигляді перенос речовини в суцільному середовищі (атмосфера, гідросфера, літосфера) описується диференціальним рівнянням у частинних похідних, яке враховує адвективний перенос потоком середовища, турбулентну дифузію, наявність джерел викиду та процеси трансформації або виведення речовини (хімічний розпад, гравітаційне осадження тощо) (рис. 16)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + R$$

Де:

- u, v, w – компоненти швидкості руху середовища (вітру, течії) за напрямками x, y, z відповідно;
- K_x, K_y, K_z – коефіцієнти турбулентної дифузії;
- $S = S(x, y, z, t)$ – функція джерел забруднення;
- $R = R(C, t)$ – член, що описує хімічну або біологічну трансформацію (найчастіше моделюється кінетикою першого порядку: $R = \lambda C$, де λ – константа швидкості розпаду).

Рис. 16. Універсальне тривимірне рівняння адвекції-дифузії для концентрації токсиканта

Для практичних інженерних розрахунків та екологічної експертизи в атмосферному повітрі найширшого розповсюдження набули аналітичні моделі Гаусса. Вони є розв'язком наведеного вище рівняння адвекції-дифузії за певних спрощувальних припущень (рис. 17).

$$C(x, y, z) = \frac{M}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Компоненти формули відображають такі фізичні фактори:

- $\frac{M}{2\pi u \sigma_y \sigma_z}$ — максимальна концентрація на осі факела, яка зменшується обернено пропорційно швидкості вітру та геометричному розширенню струменя.
- $\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$ — гаусовий (нормальний) розподіл концентрації по горизонтальній осі y , перпендикулярній до напрямку вітру.
- **Ефект відбиття від підстильної поверхні:** Член у квадратних дужках враховує розподіл по вертикалі z . Другий експоненційний доданок $\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$ математично моделює повне відбиття домішки від поверхні землі (земля діє як «дзеркало», не поглинаючи токсикант).

Рис. 18. Класична модель гаусового факела

Математичний опис динаміки забруднення водних об'єктів базується на моделюванні взаємодії двох ключових чинників: біохімічного споживання кисню (БСК) на мінералізацію органічних речовин та процесу аерації — насичення води киснем з атмосфери. Класичним інструментом системного аналізу для цього є модель Стрітера-Фелпса (Streeter-Phelps model), яка описує еволюцію дефіциту розчиненого у воді кисню вздовж річкового потоку. Концентрації речовин змінюються лише вздовж течії річки. Розподіл по ширині та глибині вважається однорідним завдяки швидкому перемішуванню. Швидкість течії річки та витрата води є сталими. Розглядається миттєве скидання стічних вод у певній точці, після чого додаткове надходження забруднень відсутнє. Процеси деоксигенації та реаерації описуються лінійними диференціальними рівняннями першого порядку (рис. 19-21).

$$\frac{dL}{dt} = -k_1 L$$

Де:

- L — повне БСК (кількість кисню, необхідна для повного окиснення органіки), мг $O_2/л$;
- k_1 — коефіцієнт деоксигенації (швидкість споживання кисню), d^{-1} . Залежить від температури води та природи забруднювача.

Рис. 19. Рівняння кінетики самоочищення

$$\frac{dD}{dt} = k_1 L - k_2 D$$

k_2 — коефіцієнт реаерації, d^{-1} . Залежить від гідродинамічних характеристик річки (швидкості течії, глибини, шорсткості русла).

Рис. 20. Рівняння дефіциту кисню

$$D(t) = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_0 \cdot e^{-k_2 t}$$

Якщо переходити від часу подорожі води t до просторової координати x уздовж річки (де $x = u \cdot t$, а u — швидкість течії), рівняння набуває вигляду:

$$D(x) = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 \frac{x}{u}} - e^{-k_2 \frac{x}{u}}) + D_0 \cdot e^{-k_2 \frac{x}{u}}$$

Рис. 21. Аналітичний розв'язок (Рівняння Стрітера-Фелпса)

Графічний розв'язок рівняння описує так звану кисневу криву прогину. Вона наочно демонструє динаміку екосистеми після забруднення. Безпосередньо після скиду швидкість споживання кисню бактеріями перевищує швидкість реаерації. Концентрація кисню стрімко падає, а дефіцит D зростає. Точка, де швидкість споживання кисню точно дорівнює швидкості реаерації є критичною точкою. Тут фіксується мінімальний рівень розчиненого кисню у водоймі, що є найкритичнішим для виживання гідробіонтів (особливо риб). По мірі зменшення кількості органіки швидкість споживання падає, і реаерація починає переважати. Водойма поступово самоочищується, а концентрація кисню повертається до початкового стану насичення. Розрахунок критичних параметрів. Математично критичний час, на якому досягається максимальний екологічний стрес системи, визначається взяттям похідної та прирівнюванням її до нуля (рис. 22)

$$t_{cr} = \frac{1}{k_2 - k_1} \ln \left[\frac{k_2}{k_1} \left(1 - \frac{D_0(k_2 - k_1)}{k_1 L_0} \right) \right]$$

Максимальний дефіцит кисню D_{max} у цій точці становить:

$$D_{max} = \frac{k_1}{k_2} L_0 \cdot e^{-k_1 t_{cr}}$$

Рис. 22. Розрахунок критичних параметрів

Математичний опис міграції токсикантів у ґрунтовому профілі (літосфері) є значно складнішим порівняно з атмосферою чи гідросферою. Це зумовлено багатофазністю самого ґрунту як середовища, де речовина може одночасно перебувати в чотирьох станах: розчиненому в ґрунтовій волозі, адсорбованому на поверхні твердих частинок (ґрунтовому поглинальному комплексі), газоподібному (в порах ґрунту) та у вигляді твердої фази (нерозчинні осади). Основу математичного моделювання вертикального переносу токсикантів у ненасиченому вологою ґрунті становить рівняння конвективно-дифузійного переносу (КДП), адаптоване з урахуванням процесів сорбції/десорбції та біохімічної деструкції (рис. 23).

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b S)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial(qC)}{\partial z} - \alpha \theta C$$

$C(z, t)$ — концентрація токсиканта в рідкій фазі (ґрунтовому розчині), мг/л;

$S(z, t)$ — концентрація токсиканта в твердій фазі (адсорбована речовина), мг/кг сухого ґрунту;

θ — об'ємна вологість ґрунту (об'єм води до об'єму ґрунту), см³/см³;

ρ_b — суха щільність складення ґрунту, г/см³;

D — коефіцієнт гідродинамічної дисперсії, см²/добу (враховує як молекулярну дифузію в порах, так і механічне перемішування потоку через звивистість пор);

q — щільність потоку води (швидкість фільтрації води за законом Дарсі), см/добу;

α — константа швидкості першого порядку, що описує розпад або біодеградацію токсиканта, добу⁻¹.

Рис.23. Базове рівняння переносу в ґрунтовому профілі

Імітаційне комп'ютерне моделювання є одним із найбільш ефективних методів системного аналізу якості навколишнього середовища, оскільки дозволяє відтворювати поведінку складних, динамічних та нелінійних екосистем у віртуальному середовищі. Завдяки цьому інструменту дослідники можуть прогнозувати наслідки антропогенного навантаження, аналізувати поширення забруднюючих речовин в атмосфері, гідросфері та ґрунтах, а також оцінювати ризики екологічних катастроф без ризику для реальних об'єктів. Суть методу полягає в алгоритмічному відтворенні процесів масопереносу, трансформації речовин та взаємодії живих організмів із середовищем існування на основі математичних рівнянь.

Сучасний етап розвитку системного аналізу характеризується інтеграцією імітаційних моделей із передовими цифровими інструментами та платформами. Ключову роль у цьому процесі відіграють геоінформаційні системи (ГІС), такі як ArcGIS та QGIS, які забезпечують просторову прив'язку екологічних даних та візуалізацію результатів моделювання у вигляді інтерактивних карт. Для обчислення складних гідродинамічних та метеорологічних процесів застосовують спеціалізовані програмні комплекси, зокрема на базі технологій обчислювальної гідродинаміки (CFD).

Додатково, сучасні цифрові екосистеми активно впроваджують технології великих даних (Big Data), хмарні обчислення та алгоритми машинного навчання. Це дозволяє в режимі реального часу обробляти інформацію з мереж екологічного моніторингу та супутникових знімків. Використання мов програмування Python та R із відповідними бібліотеками дає змогу створювати гнучкі стохастичні моделі, які враховують невизначеність природних чинників. У підсумку, поєднання імітаційного моделювання та сучасних цифрових інструментів трансформує екологічний менеджмент, перетворюючи його на високоточну науку обґрунтованого прийняття управлінських рішень для забезпечення сталого розвитку.

Агентне моделювання (Agent-Based Modeling – ABM) є одним із найперспективніших підходів у системному аналізі якості навколишнього середовища, коли рушійною силою екосистеми є поведінка її окремих елементів. На відміну від класичних топ-даун (top-down) моделей, які оперують глобальними диференціальними рівняннями для всієї популяції, ABM працює за принципом боттом-ап (bottom-up). У такому підході кожен біотичний елемент (рослина, тварина, мікроорганізм) розглядається як самостійний агент із власним набором характеристик, станів та правил поведінки. Агенти взаємодіють між собою та з дискретним комп'ютерним середовищем (наприклад, клітинним автоматом, що моделює розподіл поживних речовин чи

забруднювачів). У результаті локальних взаємодій виникає емерджентна поведінка всієї системи – глобальні тренди, які неможливо передбачити, просто аналізуючи окремого індивіда. Математичний та алгоритмічний базис поведінки агента часто описується системою умовних правил (If-Then), стохастичних функцій або дискретних рівнянь. Припустимо, ми моделюємо поведінку окремої рослини (агента i) у точці простору (x, y) . Її поточна біомаса m_i в момент часу $t+1$ залежить від доступності ресурсу R (світло, волога), ефективності його засвоєння α та радіусу конкуренції з сусідніми рослинами j (рис. 24)

$$m_i(t+1) = m_i(t) + \alpha \cdot R(x, y, t) - \sum_{j \neq i} \gamma(d_{ij})$$

Де $\gamma(d_{ij})$ – функція пригнічення, яка залежить від відстані d_{ij} між агентом i та його сусідами j . Якщо відстань менша за критичний радіус, сусід "затінює" агента, знижуючи його приріст.

Рис. 24. Моделювання поведінки окремої рослини (агента i) у точці простору (x, y)

Для реалізації АВМ в Python часто використовують спеціалізований фреймворк Mesa, проте базовий алгоритм легко продемонструвати за допомогою об'єктно-орієнтованого програмування. Нижче наведено приклад коду, що моделює поведінку окремих рослин, які конкурують за обмежений ресурс простору та гинуть від старості або виснаження (рис. 25.).

```
import random
import numpy as np

class PlantAgent:
    def __init__(self, agent_id, x, y, max_age=50):
        self.id = agent_id
        self.x = x
        self.y = y
        self.age = 0
        self.max_age = max_age
        self.biomass = 1.0 # Початкова біомаса
        self.is_alive = True

    def calculate_distance(self, other_agent):
        """Обчислення евклідової відстані до іншого агента"""
        return np.sqrt((self.x - other_agent.x)**2 + (self.y - other_agent.y)**2)

    def step(self, all_agents, resource_grid, competition_radius=5.0):
        """Один крок життєдіяльності агента (рік/місце)"""
        if not self.is_alive:
            return

        self.age += 1

        # 1. Споживання ресурсів із локальної координати
        local_resource = resource_grid[int(self.x)][int(self.y)]
        growth = 0.2 * local_resource # Коefіцієнт засвоєння

        # 2. Негативний вплив конкуренції (сусіди у радіусі)
        competition_penalty = 0.0
        for other in all_agents:
            if other.id != self.id and other.is_alive:
                dist = self.calculate_distance(other)
                if dist < competition_radius:
                    # Чим ближче сусід, тим сильніший тиск
                    competition_penalty += 0.05 * (competition_radius - dist)

        # 3. Зміна біомаси
        self.biomass += (growth - competition_penalty) - 0.05 * self.biomass # Мале виснаження

        # 4. Перевірка умов смерті
        if self.age >= self.max_age or self.biomass <= 0.1:
            self.is_alive = False

# --- Ініціалізація симуляції ---
grid_size = 100
# Карта ресурсів (наприклад, вологість ґрунту)
resource_field = np.random.uniform(0.5, 1.5, (grid_size, grid_size))

# Створення стартової популяції з 50 агентів
population = [
    PlantAgent(agent_id=i, x=random.uniform(0, grid_size-1), y=random.uniform(0, grid_size-1))
    for i in range(50)
]

# Ізбір симуляції (наприклад, 10 кроків часу)
for ticks in range(1, 11):
    for agent in population:
        agent.step(population, resource_field)

# Підрахунок тис. живих рослин
survivals = sum(1 for a in population if a.is_alive)
print(self = f"Крок {ticks}: Чисельність живої популяції = {survivals}")
```

Рис. 25. Приклад коду, що моделює поведінку окремих рослин, які конкурують за обмежений ресурс простору та гинуть від старості або виснаження

Концепція цифрових двійників екосистем (Environmental Digital Twins) є найвищим етапом розвитку системного аналізу якості навколишнього середовища, що полягає у створенні віртуальних динамічних копій реальних природних об'єктів. На відміну від статичних імітаційних моделей, цифровий двійник перебуває у стані безперервного двостороннього обміну даними зі своїм фізичним аналогом у режимі реального часу. Функціонування такої системи базується на інтеграції мереж сенсорів Інтернету речей, супутникового моніторингу, геоінформаційних систем та алгоритмів штучного інтелекту. Основна мета концепції – не просто фіксація поточного стану довкілля, а високоточне прогнозування його змін, проактивне управління екологічними ризиками та оптимізація природокористування. Цифровий двійник дозволяє програвати сценарії «що, якщо», оцінюючи наслідки потенційних антропогенних аварій або кліматичних зсувів до того, як вони відбудуться в реальності. Це трансформує екологічний менеджмент із реактивного, який ліквідує наслідки, у превентивний, що попереджає кризові ситуації. Яскравим прикладом математичного забезпечення цифрового двійника водного об'єкта (наприклад, водосховища) є застосування фільтра Калмана для асиміляції даних. Оскільки супутникові знімки чи датчики вимірюють концентрацію забруднювача C із певними похибками v_t , а теоретична модель переносу домішок через дифузію та течію теж має власну невизначеність w_t , фільтр Калмана дозволяє знайти оптимальну оцінку реального стану системи (Рис. 26-29).

$$C_t = AC_{t-1} + Bu_t + w_t$$

Рис. 26. Динаміка концентрації, що описується дискретним рівнянням стану

$$Z_t = HC_t + v_t$$

Рис. 27. Рівняння вимірювань від датчиків у реальному часі

$$K_t = P_t^- H^T (HP_t^- H^T + R)^{-1}$$

Рис. 28. Коефіцієнт підсилення Калмана

$$\hat{C}_t = \hat{C}_t^- + K_t(Z_t - H\hat{C}_t^-)$$

Рис. 29. Прогноз концентрації на основі реальних спостережень

Використання ГІС-технологій для просторового моделювання екологічних ризиків є базовим інструментом сучасного екологічного менеджменту, який дозволяє інтегрувати, аналізувати та візуалізувати різноманітні просторово-координовані дані про стан довкілля. Геоінформаційні системи (ГІС) забезпечують перехід від описового моніторингу до точного предиктивного аналізу, пов'язуючи джерела антропогенного тиску з географічними характеристиками ландшафту. Основу методології становить технологія багатокритеріального оверлейного аналізу. У межах цього підходу територія представляється у вигляді серії тематичних растрових або векторних шарів: цифрової моделі рельєфу, гідрографічної мережі, структури землекористування, щільності населення та картосхем концентрації забруднюючих речовин. Шляхом математичного поєднання цих шарів із урахуванням вагових коефіцієнтів, що визначаються методами аналізу ієрархій або експертних оцінок, розраховується інтегральний індекс екологічного ризику для кожної просторової одиниці. Яскравим прикладом є моделювання ризику площинної ерозії ґрунтів та винесення пестицидів у річкові басейни. Для цього в середовищі ГІС поєднуються карти крутизни схилів (отримані з цифрової моделі рельєфу), карти

типів ґрунтів за ступенем змиваності та карти інтенсивності розпаювання земель. Математично інтегральний ризик R у конкретній точці простору (пікселі растра) обчислюється за формулою зваженої лінійної комбінації (рис. 30)

$$R = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i$$

Де x_i — стандартизоване значення екологічного чинника (наприклад, індекс стрімкості схилу чи токсичність домішки), а w_i — ваговий коефіцієнт тригерувального чинника, причому $\sum w_i = 1$.

Рис. 30. Формула зваженої лінійної комбінації

Іншим прикладом є побудова санітарно-захисних зон навколо промислових підприємств кар'єрного типу чи хімічних заводів. Завдяки інструментам просторової інтерполяції (таким як Крігінг або метод обернених зважених відстаней IDW), ГІС трансформує точкові заміри екологічних лабораторій у суцільні поверхні розподілу поллютантів. Це дозволяє точно виділити зони підвищеного екологічного ризику для здоров'я населення та оптимізувати межі санітарно-захисних смуг (рис. 31.).

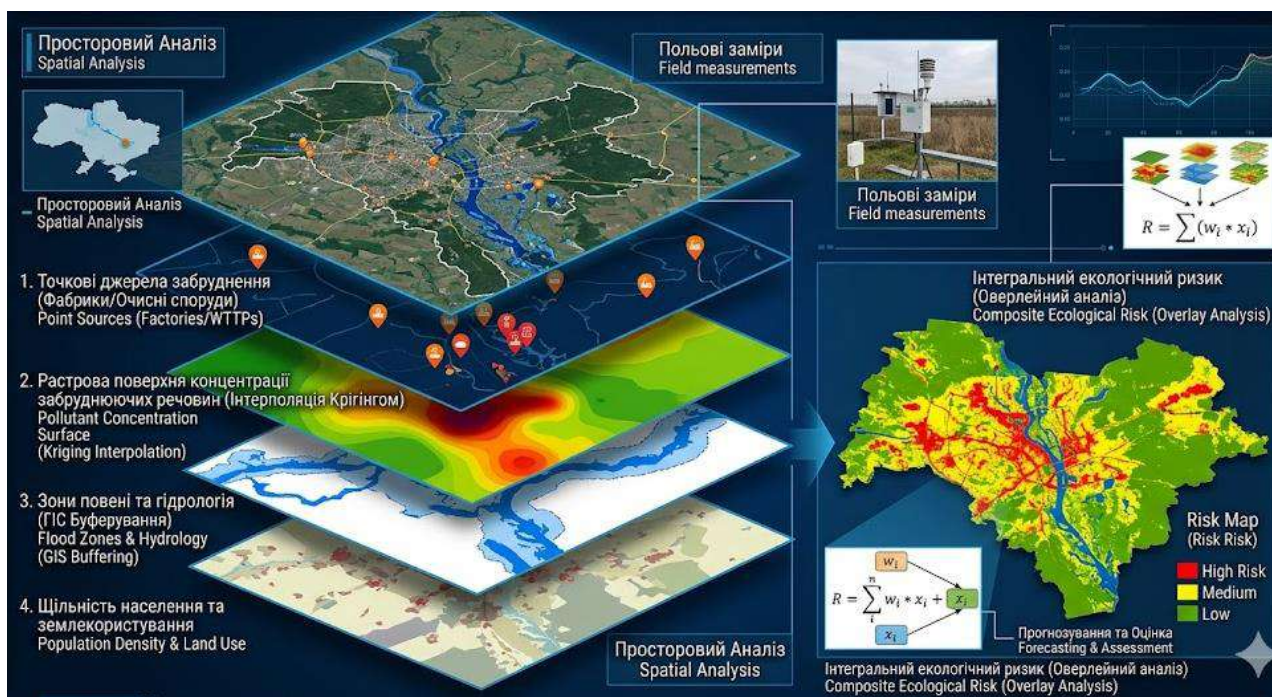


Рис. 32. Моделювання ризиків

Прогнозування стану довкілля в умовах невизначеності та дефіциту даних є одним із найскладніших, але водночас критично важливих завдань сучасного системного аналізу. Екологічні системи характеризуються високим рівнем нелінійності, динамічності та взаємозв'язку між компонентами, що ускладнює побудову точних детермінованих моделей. Ситуація загострюється, коли дослідники стикаються з браком релевантної інформації: фрагментарністю моніторингових спостережень, відсутністю тривалих часових рядів або застарілими технічними засобами фіксації показників.

Для розв'язання цієї проблеми системний аналіз застосовує специфічний методологічний апарат, адаптований до роботи зі стохастичними та слабоструктурованими процесами. Провідну

роль у таких дослідженнях відіграють ймовірнісні та статистичні методи, зокрема Баєсівські мережі, які дозволяють коригувати прогностні оцінки в міру надходження нових, навіть мінімальних, масивів даних. Особливу ефективність демонструє теорія нечітких множин (fuzzy logic), яка трансформує якісні, суб'єктивні експертні судження у формалізовані кількісні змінні, що незамінно за повної відсутності інструментальних замірів. Крім того, активно залучаються методи математичного моделювання на основі сценаріїв «що, якщо» (What-If Analysis) та імітаційне моделювання (наприклад, метод Монте-Карло), які допомагають окреслити спектр можливих станів екосистеми та оцінити ризики виходу параметрів за межі екологічної безпеки.

Таким чином, прогностична діяльність в умовах інформаційного дефіциту зміщує фокус із пошуку єдиного точного значення на визначення інтервалів і трендів розвитку ситуації. Це дозволяє органам управління приймати превентивні екологічні рішення та мінімізувати антропогенні ризики навіть у ситуаціях високого ступеня невідомості.

Ефективність системного аналізу якості довкілля значною мірою залежить від точності прогностичних моделей, об'єктивність яких завжди обмежена різними чинниками. Головними джерелами невизначеності в екологічному прогнозуванні є природна стохастичність та інструментальні й методологічні похибки моніторингу. Природна стохастичність обумовлена внутрішньою нелінійністю, динамічністю та складністю екологічних систем. Кліматичні коливання, спонтанні сукцесії, флуктуації чисельності популяцій та синергетичні ефекти взаємодії речовин мають імовірнісну природу. Це унеможливорює точне детерміноване передбачення поведінки біотичних та абіотичних компонентів у довгостроковій перспективі, оскільки навіть незначні збурення на початковому етапі можуть кардинально змінити траєкторію розвитку системи.

З іншого боку, суттєвий внесок у невизначеність роблять похибки екологічного моніторингу, які поділяють на систематичні та випадкові. Систематичні похибки виникають через застарілі технічні засоби, недосконалість методик хіміко-аналітичного контролю або неправильне калібрування приладів, що викривлює реальні значення концентрацій забруднювачів. Випадкові похибки пов'язані з просторово-часовою дискретністю відбору проб. Обмежена кількість постів спостереження та нерегулярність замірів призводять до дефіциту даних, змушуючи дослідників вдаватися до інтерполяції та екстраполяції, які неминуче вносять додаткові спотворення. Окрім того, суб'єктивні помилки операторів під час польових чи лабораторних досліджень посилюють цей ефект.

У підсумку, поєднання непередбачуваності природних процесів із недосконалістю метричних систем формує комплексне поле невизначеності. Ігнорування цих чинників призводить до стратегічних помилок в управлінні природокористуванням. Тому сучасний системний аналіз орієнтується на інтеграцію ймовірнісних підходів та оцінки ризиків для нівелювання впливу цих деструктивних факторів.

Методи нечіткої логіки (fuzzy logic) є потужним інструментом системного аналізу, який дозволяє здійснювати прогнозування стану довкілля за умов значного дефіциту кількісної інформації та високого рівня невизначеності. На відміну від класичної логіки, де твердження є виключно істинними або хибними, підхід Лотфі Заде оперує поняттям ступеня істинності. Традиційні екологічні моделі часто вимагають точних гідрохімічних чи метеорологічних показників, тоді як нечітка логіка формалізує якісні, суб'єктивні оцінки експертів, перетворюючи природну мову на математичні змінні за допомогою функцій належності. Це дає змогу ефективно оцінювати екологічні ризики, коли інструментальний моніторинг є фрагментарним або тимчасово відсутнім.

Практичне застосування цього підходу базується на створенні лінгвістичних змінних та баз нечітких правил типу «якщо..., то...». Наприклад, при прогнозуванні якості води в річці лінгвістична змінна «Рівень забруднення» може мати терми «Низький», «Помірний» та «Критичний». Якщо точні сенсорні дані про концентрацію розчиненого кисню відсутні, експерт може сформулювати правило: «якщо температура води висока і швидкість течії низька, то ризик евтрофікації водойми є високим». Іншим прикладом є оцінка стану лісових екосистем після техногенного навантаження. Замість вимірювання точного об'єму біомаси, модель оперує

нечіткими параметрами на зразок «густота крони» чи «колір хвої», що дозволяє оперативно спрогнозувати деградацію лісу на основі візуальних спостережень. У результаті дефузифікації система видає чітке числове значення екологічного ризику. Таким чином, математичний апарат нечіткої логіки нівелює проблему «інформаційного вакууму». Він інтегрує досвід фахівців у розрахункові схеми, забезпечуючи надійну прогностичну основу для прийняття превентивних рішень у природоохоронній сфері.

Методи інтервального аналізу та моделювання Монте-Карло є фундаментальними інструментами системного аналізу для оцінки ризиків наближення екосистем до критичних меж – точок перелому (tipping points). Коли екологічна система перебуває в умовах невизначеності, параметри її стану неможливо описати точними числами. Інтервальний аналіз розв'язує цю проблему, оперуючи не конкретними значеннями, а діапазонами («інтервалами»), у межах яких гарантовано перебуває величина. Це дозволяє визначити найкращий та найгірший сценарії розвитку подій. Проте, він не враховує ймовірність розподілу значень усередині інтервалу. Цей недолік нівелює метод Монте-Карло, який шляхом багатократного стохастичного генерування випадкових величин (тисень або сотень тисяч ітерацій) моделює щільність імовірності виходу системи за критичну межу безпеки.

Яскравим прикладом є прогнозування стійкості озерної екосистеми до евтрофікації. Точка перелому тут – це критична концентрація фосфору, перевищення якої незворотно перетворює чисте озеро на заросле болото. Інтервальний аналіз дозволяє задати межі вимивання фосфору з полів (наприклад, від 1,2 до 2,5 мг/л). Метод Монте-Карло, своєю чергою, випадковим чином комбінує ці значення з коливаннями температури та опадів, розраховуючи точну ймовірність (наприклад, 14%), що за поточних умов відбудеться екологічний колапс. Інший приклад стосується деградації лісових масивів через посухи: моделювання оцінює ризик досягнення точки перелому, за якою ліс втрачає здатність до самовідновлення і перетворюється на савану, враховуючи інтервали річної кількості опадів та коефіцієнти випаровування.

Комбінація цих підходів забезпечує математично обґрунтовану оцінку екологічних ризиків. Замість абстрактних припущень еколог отримує чіткий відсотковий розподіл імовірності катастрофічних змін, що є основою для розробки стратегій адаптації.

Побудова інтегральних індексів екологічної якості є ключовим етапом системного аналізу, який дозволяє згорнути багатовимірний масив різноманітних екологічних показників у єдине агреговане значення. Оскільки докільця описується сотнями параметрів (концентрації поллютантів, біопродуктивність, індекси біорізноманіття), безпосереднє їх порівняння є неможливим через відмінність у одиницях вимірювання та масштабах. Процес створення інтегрального індексу складається з кількох послідовних кроків: відбору репрезентативних індикаторів, їх нормування (масштабування), визначення вагових коефіцієнтів та безпосереднього агрегування. Нормування переводить реальні значення у безрозмірну шкалу (зазвичай від 0 до 1 або від 0 до 100), що базується на відношенні поточного стану до фонового рівня або гранично допустимих концентрацій (ГДК).

Наступним критично важливим кроком є розрахунок вагових коефіцієнтів, які відображають ступінь токсичності або екологічної значущості кожного окремого чинника. Вагу визначають або математичними методами (наприклад, аналізом головних компонент), або шляхом залучення експертних оцінок. Фінальне агрегування здійснюється за допомогою математичних функцій. Найчастіше використовують адитивну згортку (зважену суму) або мультиплікативну згортку (зважений добуток). Мультиплікативний підхід вважається більш чутливим до екологічних криз, оскільки якщо хоча б один критичний показник наближається до нуля (тобто стан катастрофічний), то й весь інтегральний індекс стрімко падає, незалежно від благополуччя інших параметрів.

У підсумку, інтегральні індекси (як-от Індекс екологічної ефективності – EPI) трансформують складні наукові дані у зрозумілу форму. Вони слугують наочним інструментом для ранжування територій, довгострокового моніторингу трендів та інформаційної підтримки прийняття стратегічних управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.

Сучасна екологічна наука та інженерія якості навколишнього середовища мають справу з об'єктами надзвичайної складності. Річкові басейни, лісові масиви, атмосферні потоки над мегаполісами та глобальні біогеохімічні цикли – все це приклади складних природних систем, компоненти яких пов'язані нелінійними зв'язками, контурами зворотного зв'язку та кумулятивними процесами. Пряме експериментування з такими об'єктами з метою вивчення їхньої реакції на антропогенне навантаження є або фізично неможливим, або економічно недоцільним, або етично неприпустимим. Ми не можемо навмисно отруїти токсикантами ціле озеро, щоб перевірити поріг його стійкості, або вирубати лісовий масивок Словечансько-Овруцького кряжу лише для того, щоб зафіксувати швидкість ерозії ґрунту.

Саме тому моделювання виступає основним, а часто й єдиним доступним інструментом системного аналізу якості навколишнього середовища. Моделювання – це метод дослідження об'єктів, процесів або явищ шляхом побудови та вивчення їхніх моделей (спрощених замінників реальності), які зберігають ключові властивості оригіналу. У системному аналізі модель є головним містком між теоретичними знаннями та практичними управлінськими рішеннями. Вона дозволяє зазирнути в майбутнє, спрогнозувати запізнілі екологічні ефекти, оцінити ризики та обрати найбільш щадну стратегію природокористування. Цей текст присвячений детальному та всебічному розбору методології, типів, етапів побудови та практичного застосування моделей природних систем, адаптованому для завдань екологічного моніторингу та менеджменту.

Побудова будь-якої моделі базується на філософському принципі ізоморфізму або гомоморфізму – наявності певної структурної, функціональної чи поведінкової відповідності між моделлю та реальним об'єктом. Проте екологічне моделювання має унікальну гносеологічну специфіку, пов'язану з фундаментальними властивостями природи: її відкритістю, нелінійністю та складністю.

Головне правило моделювання, сформульоване видатними кібернетиками, звучить так: найкращою моделлю kota є сам кіт, але така модель не допомагає нам зрозуміти його влаштування. Будь-яка модель – це завжди компроміс між трьома взаємовиключними характеристиками:

Реалістичність (точність): Наскільки детально модель відтворює реальні механізми природи.

Загальність (універсальність): Чи можна застосувати цю модель до інших аналогічних об'єктів.

Простість (осяжність): Наскільки модель зручна для розрахунків та аналізу людським розумом.

Спроба створити абсолютно точну модель, яка враховує кожен бактерію в річці та кожен листок на дереві, призводить до побудови системи, що за своєю складністю дорівнює реальному довкіллю. Така модель втрачає свій науковий сенс, оскільки стає такою ж непередбачуваною та некерованою, як і сам оригінал. Тому процес моделювання – це мистецтво обґрунтованого абстрагування та декомпозиції. Аналітик повинен відсікти другорядний, інформаційний «шум» природи і виділити лише ті базові елементи та зв'язки, які безпосередньо визначають досліджувану якість середовища.

У системному аналізі якості докільля використовується розгалужена класифікація моделей, що розділяється за метою дослідження, способом реалізації та характером відображення часу й простору.

Фізичні (речеві) моделі це реальні, зменшені або ізольовані копії природних об'єктів, створені в лабораторних чи натурних умовах. Яскравим прикладом є мікрокосми та мезокосми. У велику скляну ємність або ізольовану водойму поміщають зразки природного ґрунту, води, колонії водоростей, комах та мікроорганізмів. Дослідник може штучно змінювати температуру, кислотність чи додавати дозовану кількість забруднюючих речовин (наприклад, нафтопродуктів) і безпосередньо спостерігати, як жива система переробляє цей стрес. Фізичні моделі є незамінними на перших етапах вивчення нових хімічних сполук, але вони обмежені у просторі та часі й не здатні відтворити масштабні кліматичні чи ландшафтні процеси.

Концептуальні (вербально-логічні) моделі це словесні, графічні або схемні описи структури та зв'язків у системі. Вони будуються у вигляді блок-схем, де блоки означають компоненти довкілля (наприклад, «атмосфера», «грунт», «рослинність»), а стрілки – напрямки руху речовини, енергії чи інформації. Концептуальна модель є обов'язковим, фундаментальним етапом, що передуює будь-якому комп'ютерному моделюванню. Вона фіксує якісне розуміння проблеми дослідником.

Імітаційні (комп'ютерні) моделі це сучасний та найбільш потужний інструмент системного аналізу. В основі імітаційної моделі лежить опис поведінки природної системи за допомогою логічних правил, алгоритмів та контурів зворотного зв'язку, реалізованих у вигляді комп'ютерних програм. Комп'ютер крок за кроком імітує життєдіяльність системи в часі. Дослідник може «прокрутити» на моніторі сто років життя лісового масиву чи розповсюдження плями забруднення в океані за кілька хвилин, програючи різні сценарії розвитку подій.

За урахуванням чинника часу моделі поділяють на статичні (фіксують стан системи в конкретний момент часу, наче фотографія) та динамічні (описують безперервну зміну та еволюцію системи в часі). За урахуванням простору моделі бувають точковими (нуль-вимірними, де вся екосистема вважається однорідною точкою, наприклад, середній стан озера) та просторово-розподіленими (враховують географічні координати, рельєф, напрямки вітрів, що сьогодні успішно реалізується через інтеграцію моделювання з Геоінформаційними системами – ГІС).

Процес створення моделі природної системи – це чітко регламентований, ітераційний цикл, що складається з кількох послідовних стадій.

Постановка задачі та визначення меж: Аналітик чітко формулює, на яке питання має відповісти модель (наприклад, «Як зміниться якість води в річці через 5 років після побудови заводу?»). Виходячи з цього, визначаються просторові та часові межі системи, відсікається все зайве.

Збір даних та побудова концептуальної моделі: Проводиться ретельний аналіз наявних екологічних знань про об'єкт. Складається блок-схема взаємозв'язків, визначаються параметри входу (зовнішні чинники, погода, антропогенний тиск) та виходу (показники якості середовища).

Параметризація та алгоритмізація: Якісні зв'язки концептуальної моделі переводяться на мову алгоритмів та правил. Оцінюються внутрішні константи системи: швидкість росту рослин, коефіцієнти розпаду токсикантів, ємність поглинання ґрунту. Ці дані беруться з довідників або польових експериментів.

Програмна реалізація: Створюється комп'ютерний код або використовуються готові програмні середовища для моделювання.

Верифікація (перевірка внутрішньої логіки): Досліджується, чи правильно працює сама комп'ютерна програма, чи немає в ній внутрішніх логічних суперечностей, чи не порушуються базові закони природи (наприклад, закон збереження маси).

Калібрування та валідація (перевірка на адекватність): Це критично важливий етап. Модель запускають у минуле – їй дають вхідні дані, наприклад, за 2010 рік, і дивляться, який стан середовища вона видасть на 2020 рік. Отриманий результат порівнюють з реальними історичними даними моніторингу за ці роки. Якщо модельні прогнози збігаються з реальною історією природи, модель вважається адекватною і може бути допущена до реальних прогнозів на майбутнє.

Сценарний аналіз та інтерпретація результатів: Модель використовується як інструмент планування. Прораховуються різні сценарії: «Оптимістичний» (модернізація очисних споруд), «Песимістичний» (збільшення викидів та посушливий клімат), «Реалістичний».

Атмосферне повітря є найбільш динамічним та рухливим компонентом системи довкілля. Моделювання якості повітря навколо промислових центрів є обов'язковою юридичною вимогою при проектуванні будь-яких промислових об'єктів. В основі моделювання атмосфери лежить опис двох ключових фізичних процесів – адвекції та дифузії.

Адвекція – це механічне перенесення хмари забруднюючих речовин великими масами повітря (вітром) у горизонтальному напрямку. Напрямок та швидкість адвекції повністю визначаються поточною метеорологічною ситуацією: рою вітрів, температурним градієнтом.

Дифузія (турбулентна дифузія) – це процес розсіювання, розширення та розмивання хмари токсикантів у просторі під дією хаотичних завихрень та теплових висхідних потоків повітря. Завдяки дифузії концентрація речовини стрімко падає в міру віддалення від димової труби, але площа забрудненої території при цьому розширюється.

Сучасні комп'ютерні моделі атмосфери (наприклад, класичні шлейфові моделі) представляють викид із труби заводу у вигляді безперервного конусоподібного факела. Форма цього факела критично залежить від стану стабільності атмосфери.

Розглянемо ефект температурної інверсії – ситуації, яка часто виникає в безвітряні зимові ночі, коли приземний шар повітря є дуже холодним, а над ним розташовується теплий шар. У нормі температура повітря падає з висотою, і теплі викиди з труб легко піднімаються вгору і розсіюються. При інверсії теплий шар зверху діє як гігантська кришка екосистемного котла. Модель наочно демонструє, що димовий шлейф, піднявшись до межі інверсії, не може пробити її, розвертається і притискається до землі, створюючи екстремально високі, небезпечні для життя концентрації смогу безпосередньо в житловій зоні міста. Моделювання таких ситуацій дозволяє диспетчерським службам екологічного контролю заздалегідь видавати приписи промисловим підприємствам про зниження потужності виробництва в дні з несприятливими метеорологічними умовами.

Моделювання водних об'єктів (річок, озер) є класичним напрямком системного аналізу. Найбільш відомим, фундаментальним прикладом тут є модель Стрітера-Фелпса, яка описує динаміку кисневого режиму річки після скидання в неї органічних стічних вод (наприклад, комунальної каналізації міста).

Деоксигенація (споживання кисню): Органічні речовини, потрапивши в річку, стають їжею для колоній придонних бактерій-деструкторів. Бактерії починають бурхливо розмножуватися і споживати розчинений у воді кисень для процесу дихання та окиснення цієї органіки. Чим більше брудних стоків скинуло місто, тим вищою є Біохімічна потреба в кисні (БПК) і тим швидше падає рівень кисню у воді.

Реаерація (насичення киснем): Одночасно з розчиненням кисню відбувається його безперервне поповнення з атмосферного повітря через поверхню води. Швидкість реаерації критично залежить від фізичних параметрів річки: на бурхливих, мілководних, гірських річках із кам'янистими перекатами кисень надходить миттєво; на глибоких, застійних, повільних рівнинних річках цей процес є дуже повільним.

Результатом накладання цих двох процесів у часі та просторі (в міру просування води вниз за течією від місця скидання) є формування так званої кисневої вирви (кривої кисневого прогину). Графічно комп'ютерна модель показує, що безпосередньо в точці скидання рівень кисню ще залишається високим. Але в міру руху води вниз бактерії набирають силу, і через кілька кілометрів концентрація кисню падає до критичного мінімуму (дно кисневої вирви). Це зона екологічного лиха, де риба та інші високоорганізовані істоти гинуть від задухи (асфіксії). Далі, в міру того як бактерії переробляють і вичерпують запаси органіки, процес споживання кисню сповільнюється, а реаерація продовжує працювати. Рівень кисню починає повільно підніматися, і через десятки кілометрів річка повністю відновлює свою первісну якість.

Моделювання кисневої вирви дозволяє екологам-аналітикам жорстко розраховувати Гранично Допустимі Скиди (ГДС) для підприємств. Модель чітко показує інженерам, яку максимальну масу органіки можна скинути в цю конкретну річку влітку (коли вода тепла і кисню в ній природно мало), щоб дно кисневої вирви ніколи не опускалося нижче критичного порогу виживання річкової біоти.

Природні системи не є пасивним фізико-хімічним тлом; їхнє ядро складають живі організми. Тому моделювання біотичних компонентів – популяцій та екосистем – посідає центральне місце в системному аналізі якості довкілля.

Найпростіша, базова модель, яка описує ріст чисельності популяції в умовах ідеального середовища, де ресурси (їжа, простір) є безкінечними, а зовнішній тиск відсутній. У такій моделі популяція росте з постійним прискоренням (експоненційно), подвоюючи свою чисельність через рівні проміжки часу. У реальній природі такий ріст спостерігається лише короткочасно –

наприклад, під час спалаху розмноження шкідників лісу або при первинному впровадженні інвазійного виду (наприклад, дуба червоного чи робінії звичайної на Словечансько-Овруцькому кряжі) у вільну екологічну нішу.

Більш реалістична модель, яка враховує обмеженість ємності навколишнього середовища. Вона вводить поняття рамки ємності середовища (екологічного даху). На перших етапах, коли чисельність виду є малою, ріст іде швидко, наближаючись до експоненційного. Але в міру накопичення особин починає діяти механізм внутрішньовидової конкуренції: починає бракувати їжі, місць для гніздування, накопичуються токсичні відходи життєдіяльності. Народжуваність падає, смертність зростає. Графік логістичної моделі має вигляд красивої S-подібної кривої, яка плавно сповільнює свій ріст і стабілізується на рівні максимальної ємності середовища.

Класична модель, яка описує взаємодію двох різних видів у холистичній екосистемі. Вона демонструє виникнення дивовижного емерджентного феномену – автоколивального режиму. Модель показує, що чисельність популяцій хижака і жертви безперервно здійснюють регулярні коливання, які зсунуті по фазі один щодо одного. Зростання чисельності жертв стимулює народжуваність хижаків. Велика кількість хижаків виїдає жертв. Чисельність жертв падає. Слідом за цим, через голод, починає падати чисельність хижаків. Очищена від тиску хижаків популяція жертв знову починає рости, і цикл повторюється нескінченно.

Сучасне комп'ютерне моделювання біотичних спільнот дозволяє екологам уникати катастрофічних помилок у практиці охорони природи. Наприклад, моделювання показує, що повне знищення вовків у лісовому заказнику з метою «захисту козуль» призводить до нелінійного руйнування системи: козулі, втративши регулятора, розмножуються понад логістичну ємність лісу, повністю з'їдають підлісок та молоді пагони дерев, що викликає масштабну деградацію лісового ландшафту, голод та раптове масове вимирання самих козуль від хвороб. Модель доводить, що якість та здоров'я лісу підтримуються саме наявністю міцних зв'язків між усіма трофічними рівнями системи.

Природні системи розгорнуті в реальному географічному просторі. Ландшафти Центрального Полісся характеризуються складною мозаїкою лісів, боліт, агроугідь та річкових заплав. Оцінити якість такого середовища за допомогою простих точкових моделей неможливо, оскільки екологічні процеси мають чітку просторову прив'язку.

Сучасний етап системного аналізу ознаменувався інтеграцією імітаційного моделювання з Геоінформаційними системами (ГІС). Просторово-розподілена модель являє собою багат шаровий цифровий пиріг території. Кожен шар ГІС містить інформацію про конкретну характеристику ландшафту:

Шар 1: Цифрова модель рельєфу (висоти, крутизна схилів, напрямки стоку води).

Шар 2: Карта ґрунтів (вміст гумусу, механічний склад, кислотність).

Шар 3: Карта рослинності (типи лісових насаджень, вік дерев, наявність інвазійних видів).

Шар 4: Антропогенне навантаження (дороги, кар'єри, джерела викидів).

Комп'ютерна модель розбиває всю територію на мільйони дрібних просторових осередків (пікселів або 3D-блоків). У середині кожного осередку прораховуються локальні екологічні процеси, але одночасно модель описує безперервний обмін речовиною та енергією між сусідніми осередками.

Розглянемо застосування ГІС-моделювання для прогнозування та запобігання масштабним лісовим пожежам на Словечансько-Овруцькому кряжі. Модель у реальному часі інтегрує дані супутникового моніторингу про поточну вологість лісової підстилки, метеорологічні прогнози сили та напрямку вітру, а також ландшафтну карту горючих матеріалів (наприклад, сухі соснові насадження є набагато небезпечнішими, ніж листяні ліси). Коли в якійсь точці виникає загоряння, комп'ютерна просторова модель миттєво прораховує траєкторію поширення вогню по рельєфу кряжу, враховуючи, що вгору по схилу вогонь рухається в рази швидше. Модель видає керівникам рятувальних служб чіткий просторовий прогноз: де пожежа опиниться через 2, 5 та 10 годин і в яких точках необхідно створити мінералізовані смуги або провести зустрічний пал, щоб з мінімальними витратами врятувати унікальні природні комплекси.

Природні системи характеризуються високим рівнем внутрішньої невизначеності та випадковості (стохастичності). Ми ніколи не можемо точно знати, якою буде погода наступного літа, скільки саме днів триватиме посуха або в який конкретно день станеться аварійний скид на хімічному комбінаті. Класичні детерміновані моделі, які оперують суворо фіксованими цифрами, у таких умовах пасують. Для моделювання невизначеності в системному аналізі використовується метод Монте-Карло (метод статистичних випробувань).

Суть методу Монте-Карло полягає в багатократному (тисячі й десятки тисяч разів) комп'ютерному прорахунку імітаційної моделі, причому при кожному новому запуску комп'ютер за допомогою генератора випадкових чисел обирає значення ключових невизначених параметрів із заздалегідь заданих меж (діапазонів їхньої реальної природної мінливості).

Розглянемо приклад оцінки екологічного ризику забруднення підземних вод, що використовуються для питного водопостачання Житомира, внаслідок функціонування промислового кар'єру чи звалища відходів. Аналітик будує модель міграції токсикантів через шари ґрунту та водоносні горизонти. Проте параметри ґрунту є мінливими: пористість глини та піску відрізняється в різних точках, інтенсивність дощів, що вимивають токсиканти, змінюється щороку.

Замість того, щоб узяти одну «середню» цифру, комп'ютер запускає модель Монте-Карло 10 000 разів. У першому розрахунку він моделює ситуацію «екстремальна злива + висока пористість ґрунту», у другому – «посуха + щільна глина», у третьому – тисячі інших випадкових комбінацій. На виході дослідник отримує не одну безпечну лінійну цифру («концентрація отрути у свердловині становитиме стільки-то»), а красиву статистичну криву розподілу ймовірностей. Модель видає холістичний висновок: «З імовірністю 85% концентрація токсиканту не перевищить норму; ймовірність помірного перевищення становить 12%; і лише з імовірністю 3% можлива серйозна екологічна катастрофа». Спираючись на таку ймовірнісну модель, управлінці можуть тверезо оцінювати екологічні ризики, порівнювати їх із фінансовими витратами та ухвалювати зважені, стратегічно безпечні рішення.

Традиційне моделювання базується на принципі «білої скриньки» або «сірої скриньки», коли вчені заздалегідь знають фізичні та біологічні закони взаємодії елементів (наприклад, закон дифузії чи швидкість фотосинтезу) і закладають ці закони в основу алгоритмів. Проте в системному аналізі якості навколишнього середовища часто виникають ситуації, коли система є настільки складною і заплутаною, що описати її внутрішні механізми відомими науці законами неможливо. У таких випадках на допомогу екологам приходять новітні інформаційні підходи – штучні нейронні мережі та системи нечіткої логіки.

Штучні нейронні мережі це метод моделювання, заснований на принципі «чорної скриньки». Нейромережа – це комп'ютерна структура, яка імітує роботу людського мозку. Вона не знає законів фізики чи хімії. Замість цього її «навчають» на величезних масивах реальних історичних даних моніторингу за минулі десятиліття. Наприклад, ми подаємо на вхід нейромережі дані про температуру повітря, вологість, швидкість вітру, кількість автомобілів на дорогах та промислові викиди в Житомирі за останні 20 років, а на вихід – реальні зафіксовані в ці дні концентрації приземного озону та смогу. Нейромережа самостійно, шляхом підбору внутрішніх вагових коефіцієнтів зв'язків між своїми цифровими нейронами, знаходить приховані, надскладні, нелінійні закономірності в цих даних. Після процесу навчання ШНМ здатна з високою точністю прогнозувати якість повітря на завтра, базуючись лише на прогнозі погоди, працюючи як надійний екологічний оракул.

Нечітка логіка це методологічний підхід, який дозволяє переводити якісні, розмиті людські судження та експертні знання на мову комп'ютерних моделей. Класичні комп'ютери оперують жорсткою бінарною логікою: «Істина (1) або Хибність (0)», «Вода токсична або Вода чиста». Проте в реальному системному аналізі якості довкілля межі є розмитими. Стан екосистеми не змінюється миттєво при переході через цифру ГДК. Нечітка логіка замість жорстких чисел вводить лінгвістичні змінні, які описуються функціями належності: «Вода дуже чиста», «Вода помірно забруднена», «Стан лісу близький до критичного». Моделі на основі нечіткої логіки дозволяють інтегрувати в системний аналіз досвід кращих експертів-біологів та лісівників,

формує гнучкі, адаптивні системи підтримки ухвалення рішень у тих сферах, де точні інструментальні вимірювання є ускладненими.

Для ілюстрації сили та практичної значущості моделювання розглянемо два детальні аналітичні кейси з реальної практики екологічного менеджменту.

Кейс 1. Моделювання суцесійних процесів на порушених землях після видобутку корисних копалин

Контекст та проблема: У регіоні Центрального Полісся внаслідок інтенсивного видобутку гранітів, кварцитів або титанових руд утворюються величезні площі порушених земель – глибокі кар'єри та високі відвали розкритих порід (терикони). Ці території є екологічними пустелями, позбавленими родючого шару ґрунту, які забруднюють пилом атмосферу та змінюють гідрологічний режим усього району. Завдання екологів – провести рекультивацію, тобто повернути ці землі до природного стану, запустивши процес вторинної екологічної суцесії (поступового самостійного відновлення природного лісового фітоценозу).

Редукціоністська помилка (без моделювання): Інженери видобувної компанії вирішили діяти за стандартним, лінійним шаблоном: завезли на відвали невеликий шар чорнозему і масово висадили саджанці звичайної сосни та інвазійної робінії звичайної (білої акації), вважаючи, що через 10 років тут підніметься ліс. Результат: через 3 роки більша частина сосон загинула через екстремальний перегрів кам'янистих схилів влітку та відсутність вологи, а робінія звичайна утворила низькорослі, чагарникові хащі, які повністю заблокували появу будь-яких місцевих видів рослин. Гроші витрачені, але якісна лісова система не сформувалася.

Системне рішення з використанням імітаційного моделювання: Для вирішення проблеми аналітики збудували просторово-розподілену імітаційну модель суцесії ландшафту. Модель враховувала мікроклімат відвалів (крутизну та експозицію схилів щодо сонця), швидкість накопичення органіки різними видами рослин та контури взаємодії між флорою, ґрунтом та місцевою фауною (птахами та вітром як переносниками насіння).

Комп'ютерне моделювання тисяч сценаріїв показало, що спроба відразу висадити зрілі дерева на голе каміння суперечить законам системної еволюції природи. Модель розробила покрокову, довгострокову стратегію керованої рекультивації:

Етап 1 (модельний оптимум): Схили терасуються під певним кутом, прорахованим у моделі для мінімізації змиву ґрунту. Першими висіваються не дерева, а рослини-піонери – специфічні багаторічні трави та бобові культури (наприклад, конюшина, люпин). Модель чітко показала, що ці рослини протягом 3 років створюють кореневу сітку, яка закріплює схили від ерозії, і збагачують каміння азотом.

Етап 2 (впровадження підсистеми затінення): На четвертий рік, коли трави створили первинний гумусовий шар, модель рекомендувала висадку швидкоростучих місцевих чагарників (верби, берези бородавчастої). Ці рослини виконують екосистемну функцію «няньок» – вони створюють плямисту тінь, знижуючи температуру поверхні відвалу влітку на 10–15 градусів і захищаючи ґрунт від пересихання.

Етап 3 (фінальний клімакс): Лише на 7–8 рік під захист чагарникового ярусу, у сформоване мікросередовище, вносяться насіння та саджанці клімаксових лісових порід – дуба черешчатого та сосни звичайної.

Модель дозволила лісівникам діяти в гармонії з природними ритмами. Через 15 років на місці мертвого кар'єру сформувався стійкий, саморегульований лісовий масив із високою якістю біорізноманіття, який більше не вимагає фінансових вкладень людини для свого виживання.

Кейс 2. Моделювання ризиків та наслідків інвазії рослинних видів у похідних лісах Словечансько-Овруцького кряжу

Контекст та проблема: Унікальні лісові екосистеми Словечансько-Овруцького кряжу перебувають під загрозою через агресивне поширення інвазійного виду – дуба червоного. Цей вид, завезений з Північної Америки, демонструє надзвичайну агресивність: його листя містить високу концентрацію танінів, воно не розкладається місцевими бактеріями, накопичується на підстилці у вигляді сухої ковдри і повністю блокує проростання аборигенних видів (дуба черешчатого та сосни). Необхідно розробити стратегію збереження якості лісу на наступні 50 років.

Системне рішення з використанням моделювання: Було створено імітаційну модель динаміки лісового насадження кряжу. Модель включала опис трьох ключових контурів зв'язку:

Контур 1: Швидкість росту та насіннева продуктивність дуба червоного порівняно з місцевими видами.

Контур 2: Швидкість накопичення та розкладання лісової підстилки (грунтовий блок).

Контур 3: Трофічний контур – взаємодія з дикими тваринами (кабанами, мишами), які поїдають жолуді.

Комп'ютерне калібрування моделі на основі даних моніторингу за минулі 20 років підтвердило її високу точність. Після цього аналітики запустили сценарний аналіз на 50 років уперед, програвши три різні стратегії управління:

Сценарій А («Невтручання»): Лісівники нічого не роблять. Модель показала катастрофічний результат: через 35 років дуб червоний повністю захоплює 80% площі кряжу, утворюючи монокультурні, густі, темні насадження. Місцева флора (орхідеї, папороті, реліктові види кряжу) повністю зникає через брак світла та дубильну ковдру на ґрунті. Ліс втрачає свою біологічну якість та заповідну цінність.

Сценарій Б («Механічна війна»): Щорічне проведення суцільних санітарних рубок та випилювання дуба червоного. Модель видала нелінійний парадокс: механічне випилювання дорослих інвазійних дерев різко збільшує освітленість ґрунту. Це стимулює вибухоподібне проростання мільйонів жолудів дуба червоного, що роками спали в підстилці. На місці одного зрубаного дерева піднімається непрохідна стіна з його ж поросли. Витрати бюджету зростають експоненційно, але ефект є негативним.

Сценарій В («Біоценотичне пригнічення»): Стратегія, знайдена за допомогою оптимізаційних прорахунків моделі. Замість суцільних рубок модель запропонувала підтримувати максимальну щільність намету зрілого аборигенного лісу (зберігати старі дуби та сосни), оскільки дуб червоний у перші роки життя є дуже чутливим до глибокого затінення. Одночасно модель рекомендувала штучно підтримувати високу чисельність диких кабанів у зимовий період. Кабани взимку змушені переорювати лісову підстилку в пошуках їжі і з'їдають до 95% великих, поживних жолудів дуба червоного, при цьому дрібні жолуді місцевого дуба залишаються непоміченими. Крім того, модель прорахувала схему точкового висадження під намет лісу специфічних тіншовитривалих місцевих чагарників (ліщини, крушини), які створюють додатковий біологічний бар'єр для сходів інвазійного виду.

Адміністрація заповідника обрала Сценарій В, розрахований на комп'ютерній моделі. Практична реалізація цієї стратегії дозволила стабілізувати поширення дуба червоного, зберегти цілісність унікальних рослинних асоціацій Словечансько-Овруцького кряжу та забезпечити високу екологічну якість середовища без залучення надмірних фінансових та механічних ресурсів.

Моделювання природних систем є серцем та інтелектуальним стрижнем системного аналізу якості навколишнього середовища. Перехід від пасивного спостереження та інгредієнтного накопичення цифр до активного комп'ютерного та математичного імітування процесів природи – це головний маркер зрілості сучасної екологічної науки.

Природне середовище є занадто складним, крихким та нелінійним об'єктом, щоб управляти ним на основі інтуїції, лінійних припущень або утилітарних інженерних шаблонів. Як демонструють розглянуті моделі атмосфери, водних об'єктів та біотичних спільнот, природа завжди відповідає на грубе, фрагментарне втручання людини непередбачуваними кумулятивними катастрофами, запізнілими ефектами та включенням руйнівних позитивних зворотних зв'язків.

Екологічне моделювання дозволяє людині змінити свій статус у біосфері – перетворитися з «підкорювача природи», що діє наосліп, на мудрого та далекоглядного партнера. Створюючи комп'ютерні двійники ландшафтів, інтегруючи моделі з геоінформаційними системами, прораховуючи ризики за методами Монте-Карло та залучаючи потужність штучних нейронних мереж, еколог-аналітик отримує унікальну можливість вчитися на помилках у віртуальному просторі комп'ютера, не завдаючи реальної шкоди живим екосистемам. Результати моделювання дають у руки управлінців єдиний об'єктивний, науково обґрунтований інструмент для

встановлення екологічних нормативів, планування сталого розвитку міст і регіонів та збереження дивовижної цілісності й емерджентної краси нашої планети для багатьох наступних поколінь.

Питання та завдання для самоконтролю

Теоретичні запитання:

1. Що таке екологічне моделювання та яка його головна мета в рамках системного аналізу якості довкілля?
2. Які основні етапи побудови математичної моделі природної системи виділяють у системному аналізі?
3. Чим принципово відрізняються детерміновані моделі екосистем від стохастичних (імовірнісних)?
4. Охарактеризуйте концептуальне моделювання навколишнього середовища та його роль на початкових етапах дослідження.
5. Поясніть суть та сфери застосування імітаційного моделювання для прогнозування стану складних природно-техногенних систем.
6. Що таке верифікація та валідація (адекватність) екологічної моделі і якими методами вони перевіряються?
7. Опишіть особливості моделювання дифузії та адвекції забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.
8. Як класична модель Стрітера-Фелпса використовується для моделювання процесів самоочищення та динаміки кисню у водних об'єктах?
9. У чому полягає специфіка застосування методів Монте-Карло для оцінки екологічних ризиків та невизначеностей?
10. Як штучні нейронні мережі (ШНМ) використовуються для прогнозування якості навколишнього середовища в умовах браку точних аналітичних даних?
11. Поясніть принципи використання апарату нечіткої логіки (fuzzy logic) при моделюванні антропогенного пресингу на екосистеми.
12. Що таке просторово-розподілене моделювання довкілля і як воно інтегрується з геоінформаційними системами (ГІС)?
13. Охарактеризуйте балансові моделі (моделі матеріального балансу) та їхнє значення для аналізу міграції токсикантів у трофічних ланцюгах.
14. Як моделі «хижак – жертва» (наприклад, Лотки-Вольтерри) адаптуються для аналізу динаміки популяцій під впливом хімічного забруднення?
15. Що розуміють під чутливістю екологічної моделі та як проводиться аналіз чутливості до зміни вихідних параметрів?
16. Які обмеження та труднощі виникають при спробах моделювання глобальних біосферних процесів і кліматичних змін?
17. Як у моделях природних систем враховується чинник часу (дискретні та безперервні моделі за часом)?
18. Поясніть сутність оптимізаційного моделювання при вирішенні задач раціонального природокористування та мінімізації викидів.
19. Що таке «ефект метелика» або хаотична динаміка в нелінійних екологічних моделях і як вона впливає на точність довгострокових прогнозів?
20. Яким чином результати комп'ютерного моделювання природних систем трансформуються в конкретні управлінські рішення в екологічній політиці?

Тестові завдання

Як у системному аналізі називається процес перевірки відповідності побудованої математичної моделі реальному екологічному об'єкту або процесу за допомогою незалежних експериментальних даних?

- А) Верифікація
- Б) Валідація (оцінка адекватності)
- В) Декомпозиція
- Г) Агрегування

Які моделі природних систем обов'язково враховують випадкові чинники, ймовірнісні розподіли та стохастичну природу екологічних процесів?

- А) Детерміновані моделі
- Б) Статичні моделі
- В) Стохастичні моделі
- Г) Лінійні аналітичні моделі

Перенесення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, яке зумовлене виключно упорядкованим горизонтальним рухом повітряних мас (вітром), описується за допомогою моделі:

- А) Моделі адвекції
- Б) Моделі молекулярної дифузії
- В) Моделі Стрітера-Фелпса
- Г) Балансової моделі біоти

Для моделювання яких процесів у річкових екосистемах традиційно застосовується класична двокритеріальна модель Стрітера-Фелпса?

- А) Поширення радіонуклідів у донних відкладах
- Б) Динаміки біохімічного споживання кисню (БСК) та розчиненого кисню
- В) іграції важких металів по трофічних ланцюгах
- Г) Процесів ерозії берегової лінії

Який метод моделювання екологічних систем базується на багаторазовому чисельному моделюванні з використанням випадкових величин для оцінки ризиків та невизначеностей?

- А) Метод нечіткої логіки
- Б) Метод штучних нейронних мереж
- В) Метод Монте-Карло
- Г) Метод аналітичної екстраполяції

Який інструмент інтелектуального моделювання найкраще використовувати для прогнозування якості довкілля за наявності великих масивів даних, але за повної відсутності точних аналітичних формул чи фізичних законів зв'язку між параметрами?

- А) Рівняння матеріального балансу
- Б) Штучні нейронні мережі (ШНМ)
- В) Концептуальні матричні моделі
- Г) Лінійне програмування

Інтеграція математичних моделей просторового поширення токсикантів із геоінформаційними системами (ГІС) дозволяє створювати:

- А) Текстові реферативні звіти
- Б Цифрові прогностичні карти-схеми забруднення
- В) Стаціонарні таблиці нормативів ГДК
- Г) Тільки експертні опитувальні листи

Якщо екологічна модель оперує якісними лінгвістичними змінними (наприклад: «високий рівень забруднення», «помірна стійкість»), то математичним апаратом для її побудови є:

- А) Диференціальні рівняння вищих порядків
- Б) Нечітка логіка (Fuzzy Logic)
- В) Теорія ймовірностей часових рядів
- Г) Матрична алгебра Леслі

Як у теорії моделювання складних нелінійних систем називається висока чутливість прогнозних моделей до найменших змін початкових умов, що робить довгостроковий екологічний прогноз неможливим?

- А) Ефект синергізму
- Б) Закон оптимуму

В) Ефект метелика (детермінований хаос)

Г) Принцип емерджентності

Робота з якою моделлю полягає у дослідженні балансу речовини чи енергії на «вході» та «виході» системи, без детального математичного опису складних внутрішніх біохімічних процесів самого об'єкта (принцип «чорної скриньки»)?

А) Імітаційна динамічна модель

Б) Модель матеріального балансу

В) Просторово-розподілена тривимірна модель

Г) Нейромережева модель класифікації

Ситуаційні задачі

Регіональне екологічне управління використовує комп'ютерну модель для прогнозування поширення викидів новозбудованого сміттєспалювального заводу. Модель бездоганно пройшла перевірку на відповідність законам аеродинаміки за допомогою тестових математичних рівнянь у лабораторних умовах. Проте під час першої реальної пилової бурі прогноз повністю розійшовся з фактичними замірами на місцевості. Проаналізуйте цю ситуацію з позицій відмінностей між верифікацією та валідацією екологічних моделей і поясніть, чому математична коректність не гарантує адекватність моделі.

Аналітики розробляють модель прогнозування якості води у водосховищі, яка має враховувати як закономірні сезонні зміни температури та сонячної радіації, так і випадкові фактори, як-от аварійні залпові скиди стічних вод чи раптові зливи. Поясніть, які методологічні обмеження виникнуть у дослідників, якщо вони спробують побудувати виключно детерміновану модель, і чому в даному випадку необхідне залучення стохастичного моделювання.

У місті, оточеному промисловою зоною, зафіксовано постійний сильний вітер, що дме в одному напрямку. Екологи помітили, що хмара забруднюючих речовин від заводу рухається чітким шлейфом уздовж міських кварталів практично без розсіювання в бокові сторони. Опишіть, який саме процес перенесення домінує в атмосфері за таких умов, та яку базову модель фізики середовища (адвекції чи молекулярної дифузії) слід обрати за основу для комп'ютерного моделювання цієї ситуації.

На річці, що протікає через великий промисловий центр, зафіксовано різке падіння рівня розчиненого кисню нижче за течією від місця випуску комунальних стічних вод, багатих на органічні сполуки. Згодом, на значній відстані від міста, показники кисню самостійно повернулися до норми. Яку класичну екологічну модель динаміки біохімічного споживання кисню слід застосувати для математичного опису цього процесу самоочищення річки та які ключові протилежні процеси вона має балансувати?

Дослідницька група намагається змоделювати потенційні екологічні ризики від підземного захоронення токсичних відходів у регіоні з надзвичайно складною і неоднорідною геологічною структурою, де точні фізичні параметри пластів неможливо виміряти безпосередньо. Які переваги надасть використання методів моделювання Монте-Карло у цій ситуації та як випадковий пошук допомагає подолати брак точних вихідних даних?

Перед науковцями стоїть завдання спрогнозувати рівень забруднення приземного шару повітря озonom у мегаполісі. У них є колосальний масив історичних даних щохвилинних спостережень за багато років, але хімічні реакції утворення озону під дією сонячного світла за участю вихлопних газів є занадто складними, нелінійними і до кінця не вивченими. Обґрунтуйте, чому в таких умовах доцільно відмовитися від класичних аналітичних моделей і застосувати штучні нейронні мережі.

Команда програмістів створила модель поширення нафтової плями в морі, але вона існує лише у вигляді набору диференціальних рівнянь у текстовому редакторі, що ускладнює роботу рятувальних служб. Як інтеграція цієї математичної моделі з геоінформаційними системами (ГІС) змінить якість сприйняття інформації та які нові можливості з'являться для управління кризовою ситуацією в режимі реального часу?

Для оцінки екологічного стану лісового масиву, що межує з хімічним підприємством, експерти використовують лінгвістичні описи місцевих лісників, такі як «стан хвої переважно пригнічений», «вплив викидів помірний» або «густота крони близька до норми». Поясніть, за допомогою якого математичного апарату теорії моделювання можна перевести ці якісні, суб'єктивні експертні висловлювання у чіткий алгоритм для прийняття рішень щодо екологічної безпеки.

Еколог-моделіст намагається створити довгостроковий прогноз динаміки глобальних кліматичних параметрів на століття вперед. Навіть після врахування всіх відомих факторів, найменша зміна початкової температури океану в моделі всього на мікроскопічну частку призводить до кардинально протилежних результатів прогнозу (від повного вимерзання до екстремального потепління). Яку властивість складних нелінійних природних систем ілюструє цей випадок і як детермінований хаос обмежує можливості екологічного прогнозування?

На підприємстві необхідно оцінити, яка кількість важких металів потрапляє в навколишнє середовище з димовими газами. Внутрішня будова печей та хімічні перетворення всередині камери згоряння є комерційною таємницею виробника і невідомі екологам. Опишіть, як за допомогою принципу «чорної скриньки» та побудови моделі матеріального балансу між сировиною на вході та готовою продукцією і відходами на виході можна розв'язати цю задачу без вивчення внутрішніх процесів агрегату.

МЕТОДОЛОГІЯ І ПРАКТИКА ПОБУДОВИ ПРОГНОСТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

Теоретико-методологічний фундамент екологічного прогнозування в межах системного аналізу базується на розумінні навколишнього середовища як складної, динамічної, відкритої системи із синергетичними ефектами. Прогнозування стану довкілля – це не просто екстраполяція поточних тенденцій у майбутнє, а глибоке наукове дослідження можливих станів біосфери та її окремих компонентів під впливом природних і техногенних чинників. Методологія цієї дисципліни спирається на базові системні принципи: цілісність, ієрархічність, емерджентність та зворотний зв'язок. Це означає, що зміна одного елемента екосистеми неминуче викликає ланцюгову реакцію в інших, а властивості системи в цілому не зводяться до простої суми властивостей її складових. Екологічне прогнозування оперує концепцією стійкого розвитку та екологічного ризику, намагаючись визначити межі антропогенного навантаження, за якими починається незворотна деградація природного капіталу.

Гносеологічною основою прогнозування є поєднання номотетичного підходу (пошук загальних законів природи, як-от закони термодинаміки чи збереження маси) та ідіографічного аналізу конкретних ландшафтно-географічних умов. У системному аналізі якості довкілля прогностична методологія базується на єдності трьох компонентів: генетичного (дослідження передісторії та причинно-наслідкових зв'язків), телеологічного (визначення цільових орієнтирів екологічної безпеки) та нормативного (обґрунтування нормативів якості середовища). Такий комплексний підхід дає змогу сформувати методологічний каркас для розробки адекватних математичних моделей, які здатні враховувати як жорсткі фізико-хімічні закономірності розсіювання домішок, так і гнучкі, адаптивні біологічні реакції екосистем. Зрештою, теоретична база екологічного прогнозування створює передумови для переходу від констатації фактів забруднення до випереджального управління природокористуванням.

У контексті системного аналізу якості навколишнього середовища прогностичний алгоритм розглядається як строго формалізована, логічно послідовна сукупність математичних, статистичних та обчислювальних операцій, призначена для трансформації вхідної екологічної інформації у випереджальну оцінку майбутнього стану екосистеми. Такий алгоритм виступає ядром прогностичної моделі й переводить абстрактні теоретичні концепції в площину практичних розрахунків. Структура сучасного екологічного алгоритму є багаторівневою і містить обов'язкові блоки: імпорт та фільтрацію сирих даних моніторингу (видалення шумів, аномалій і заповнення пропусків), безпосереднє обчислення за заданими рівняннями або логічними правилами, та дефузифікацію чи інтерпретацію результатів з оцінкою похибки. У системному аналізі алгоритми класифікують на детерміновані, які базуються на законах переносу маси та енергії й дають однозначний результат, стохастичні, що оперують законами теорії ймовірностей, та евристичні (інтелектуальні), побудовані на базах знань штучного інтелекту чи нечіткої логіки.

Головна особливість прогностичного алгоритму в екології – це необхідність врахування нелінійності та екологічного запізнення (часового лагу між антропогенним тиском і реакцією природи). Алгоритм має бути адаптивним, тобто здатним самостійно коригувати внутрішні параметри (коефіцієнти емісії, швидкості самоочищення) у міру надходження нових оперативних даних моніторингу через контури зворотного зв'язку. Проектування такого алгоритму вимагає дотримання балансу між обчислювальною складністю та точністю: надміру ускладнений алгоритм призводить до ефекту перенавчання моделі й втрати прогностичної сили на реальних об'єктах, тоді як занадто спрощений – ігнорує важливі фактори небезпеки. Таким чином, прогностичний алгоритм є основним робочим інструментом системного аналітика, який перетворює хаотичні масиви екологічних замірів на структуровану, придатну для візуалізації та аналізу інформаційну основу.

Головною ціллю екологічного прогнозування є своєчасне виявлення негативних тенденцій у стані довкілля для запобігання екологічним кризам, мінімізації ризиків для здоров'я населення та оптимізації витрат на природоохоронні заходи. Для досягнення цієї цілі системний аналіз вирішує низку завдань: оцінку майбутніх рівнів забруднення геосфер, розрахунок ємності екосистем до

техногенного тиску, моделювання наслідків аварійних ситуацій та аналіз ефективності запланованих екологічних програм. Успішність вирішення цих завдань залежить від правильної класифікації прогнозів, де визначальним критерієм є просторово-часовий масштаб, що безпосередньо диктує вибір математичного апарату та вимоги до деталізації даних.

За часовим виміром прогнози поділяють на коротко-, середньо- та довгострокові. Короткострокові екологічні прогнози (від кількох годин до кількох діб) мають оперативний характер і найчастіше застосовуються для розрахунку концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі міст під впливом поточних метеорологічних умов (наприклад, прогнозування приземного смогу чи температурних інверсій). Тут домінують детерміновані гідродинамічні алгоритми. Середньострокові прогнози (від місяця до кількох років) орієнтовані на оцінку сезонних або річних циклів – наприклад, прогнозування об'ємів весняного водопілля, динаміки розмноження шкідників лісу чи сезонного цвітіння водойм. У цьому сегменті найефективнішими є статистичні методи та аналіз часових рядів. Довгострокові (та наддовгострокові) прогнози охоплюють десятиліття і моделюють глобальні та регіональні тренди: зміни клімату, деградацію ґрунтового покриву чи трансформацію біомів під дією глобального потепління. Вони розробляються на основі імітаційного моделювання сценаріїв розвитку людства і є базою для розробки міжнародних екологічних угод та стратегій національної безпеки.

Системний аналіз об'єкта прогнозування є початковим і визначальним етапом розробки будь-якої екологічної моделі, оскільки якість прогнозу безпосередньо залежить від глибини розуміння внутрішньої структури досліджуваного об'єкта. Процес починається з концептуалізації – перетворення реального, надзвичайно складного природно-техногенного комплексу на спрощену, але репрезентативну системну схему. Аналітик повинен чітко виділити цільові змінні стану (наприклад, концентрацію розчиненого кисню у водоймі чи індекс здоров'я лісового масиву) та керуючі фактори впливу, як-от обсяги викидів підприємств чи кліматичні параметри. Формування інформаційного базису на цьому етапі передбачає інтеграцію різномірних знань: від фундаментальних законів біогеохімії до специфічних локальних регламентів природокористування.

Інформаційний базис має відповідати принципам повноти, системності та актуальності. Він містить не лише кількісні результати прямих інструментальних вимірювань, а й якісні описи процесів, картографічні матеріали, космічні знімки, дані державного кадастру та історичні відомості про стан об'єкта в минулому. Головне завдання системного аналітика полягає у структуруванні цього масиву інформації та перевірці його достатності для досягнення цілей прогнозу. Якщо наявна інформаційна база є надто бідною, проводиться декомпозиція завдання або залучаються додаткові непрямі індикатори (прокси-дані). У результаті формується єдиний логічно пов'язаний інформаційний простір, який відображає як поточний стан екологічного об'єкта, так і генезис його змін під дією антропогенних навантажень, що створює фундамент для подальшого математичного моделювання.

Чітке окреслення просторово-часових меж екосистеми, ідентифікація її ключових компонентів та встановлення внутрішніх і зовнішніх зв'язків є ядром системного підходу в екологічному прогнозуванні. Визначення меж об'єкта дослідження рідко збігається з адміністративним поділом; найчастіше аналітики орієнтуються на природні бар'єри – межі річкового басейну, ландшафтні контури чи ареали поширення певних біоценозів. Проте в умовах інтенсивного антропогенезу до системи обов'язково включають і техногенні елементи: промислові зони, транспортні артерії та агрокомплекси, які виступають потужними джерелами збурення. Помилка у визначенні меж може призвести до ігнорування транскордонного перенесення забруднювачів або, навпаки, до надмірного ускладнення моделі за рахунок несуттєвих факторів.

Після встановлення меж здійснюється компонентний аналіз системи. Виділяються абіотичні блоки (атмосфера, гідросфера, літосфера) та біотичні елементи (продуценти, консументи, редуценти), які деталізуються залежно від мети дослідження. Особлива увага приділяється характеру зв'язків між ними, що можуть бути матеріальними (кругообіг речовин), енергетичними (потіки тепла та випромінювання) та інформаційними (сигнальні механізми в популяціях). Системний аналіз вимагає ретельного опису контурів зворотного зв'язку. Негативні

зворотні зв'язки забезпечують гомеостаз і буферну ємність довкілля, повертаючи систему до рівноваги після забруднення, тоді як позитивні – посилюють збурення і здатні спровокувати лавиноподібну деградацію середовища. Матрична фіксація цих зв'язків дозволяє побудувати адекватну граф-модель системи для майбутнього розрахунку прогнозних алгоритмів.

Екологічний моніторинг є первинним постачальником даних для прогностичних алгоритмів, проте «сира» інформація майже завжди містить дефекти, які потребують глибокої попередньої обробки. Процес починається з верифікації – перевірки даних на наявність грубих помилок, аномальних викидів (аутлаєрів) та технічних збоїв обладнання. Для цього застосовують методи статистичного контролю, аналізуючи відповідність значень фізичним законам (наприклад, концентрація речовини не може бути від'ємною) та регіональним екологічним трендам. Наступним кроком є нормалізація та згладжування рядів за допомогою фільтрів (наприклад, ковзного середнього) для усунення випадкових шумів високої частоти, які маскують довгострокові закономірності процесу.

Найбільшим викликом для системного аналітика є проблема пропусків та просторово-часової неоднорідності часових рядів, викликана нерегулярністю замірів або зміною локацій постів спостереження. Для відновлення втрачених даних застосовують математичні методи різного ступеня складності. Короткі пропуски заповнюють за допомогою лінійної або сплайн-інтерполяції. У разі тривалої відсутності даних використовують стохастичну імпутацію, авторегресійні моделі (ARIMA) або залучають дані з суміжних постів екологічного моніторингу через кореляційні зв'язки. Неоднорідність рядів, спричинена зміною приладів чи методик хімічного аналізу, нівелюється шляхом рекалібрування та приведення даних до єдиного безрозмірного масштабу або стандартного кроку дискретизації. Лише після формування суцільного, очищеного та верифікованого часового ряду інформаційний масив стає придатним для коректного навчання та роботи прогнозних алгоритмів.

Побудова адекватних прогностичних моделей у системному аналізі якості довкілля неминує зіштовхується з проблемою невизначеності, яка обмежує точність і надійність отриманих результатів. Невизначеність в екологічному моделюванні – це комплексне явище, що виникає на всіх етапах дослідження: від збору первинної інформації до математичної формалізації процесів. У системному аналізі джерела невизначеності прийнято поділяти на три основні категорії: параметричну, структурну та концептуальну. Параметрична невизначеність пов'язана з неточністю визначення внутрішніх констант моделі (наприклад, коефіцієнтів дифузії, швидкості седиментації чи констант розпаду забруднюючих речовин). Структурна невизначеність виникає через неминує спрощення реальних зв'язків у системі, коли математичні рівняння не здатні повноцінно описати всі нелінійні ефекти та синергетичні взаємодії між компонентами біосфери. Концептуальна невизначеність відображає обмеженість нашого фундаментального розуміння складних природних механізмів, наприклад, реакції біоти на комбінований токсичний вплив.

Типізація похибок у прогностичних алгоритмах дозволяє чітко розмежувати випадкові, систематичні та прогресуючі помилки. Випадкові похибки зазвичай мають нормальний розподіл і піддаються статистичній компенсації при збільшенні обсягу вибірки. Систематичні похибки є набагато небезпечнішими, оскільки вони зміщують прогноз в один бік (наприклад, постійне заниження об'ємів викидів через недосконалу методику розрахунку) і вимагають рекалібрування всієї системи. Прогресуючі похибки накопичуються в динамічних моделях з часом через контури позитивного зворотного зв'язку, що може призвести к експоненціального зростання помилки на довгих горизонтах прогнозування. Розуміння та типізація цих чинників є обов'язковою передумовою для застосування методів верифікації моделей та оцінки загального екологічного ризику прийняття хибних управлінських рішень.

При аналізі похибок екологічного прогнозування вкрай важливо розрізнити дві принципово різні природи їх виникнення: об'єктивну (онтологічну) непередбачуваність самого навколишнього середовища та суб'єктивні (епістемічні) обмеження наших технічних засобів спостереження. Природна стохастичність екологічних процесів є фундаментальною властивістю біосфери. Природні системи функціонують у режимі детермінованого хаосу, де мікроскопічні коливання температури, сонячної інсоляції або швидкості вітру можуть кардинально змінити поведінку

системи в майбутньому. Спонтанні сукцесії фітоценозів, флуктуації чисельності популяцій інвазійних видів, турбулентне перемішування повітряних мас – усі ці явища мають імовірнісний характер. Вони не можуть бути усунені жодним удосконаленням математичного апарату, оскільки випадковість закладена в саму логіку еволюції екосистем.

На противагу цьому, інструментальні похибки вимірювань є наслідком недосконалості метричних систем, постів екологічного моніторингу та лабораторного обладнання. Вони проявляються у вигляді обмеженої чутливості датчиків, зносів газоаналізаторів, похибок при відборі, транспортуванні та хімічному аналізі проб води чи ґрунту. Системний аналіз розглядає ці два фактори у протиставленні: якщо інструментальну похибку можна мінімізувати шляхом модернізації мережі моніторингу, впровадження автоматизованих комплексів та суворого метрологічного контролю, то природну стохастичність подолати неможливо. Завдання аналітика полягає не в ігноруванні природного хаосу, а в його коректному описі. Для цього замість жорстких детермінованих моделей впроваджують ймовірнісно-статистичні алгоритми, які оцінюють не єдине траєкторне значення екологічного показника, а щільність розподілу його ймовірностей у просторі та часі.

Інформаційний дефіцит є одним із найпоширеніших деструктивних факторів у практиці екологічного менеджменту та системного аналізу, який прямо пропорційно знижує надійність будь-яких прогностичних алгоритмів. Брак даних може виражатися у кількох формах: недостатній тривалості часових рядів, низькій просторовій щільності мережі спостережень, значній кількості пропусків у вимірних показниках або відсутності даних щодо критично важливих параметрів середовища. Коли прогностичний алгоритм (особливо побудований на методах машинного навчання чи статистичної екстраполяції) навчається на бідній або фрагментарній вибірці, він втрачає здатність до узагальнення. Виникає ефект зміщення оцінок, коли модель добре описує випадкові шуми у наявному куцому наборі даних, але демонструє колосальні похибки при спробі спрогнозувати реальний розвиток подій.

В умовах дефіциту інформації різко зростає ризик пропуску екстремальних екологічних подій – таких як критичні залпові викиди, пікові паводки або стрімка деградація біоценозів. Алгоритми, позбавлені довготривалої ретроспективної інформації, просто «не знають» про можливість існування рідкісних, але катастрофічних режимів функціонування системи. Окрім того, брак точкових інструментальних замірів змушує дослідників вдаватися до надмірного просторового усереднення та інтерполяції, що розмиває локальні екологічні аномалії та гарячі точки забруднення. Надійність прогнозу в таких умовах падає геометрично із розширенням горизонту планування. Для нівелювання цього деструктивного впливу системний аналіз вимагає переходу від класичних оптимізаційних алгоритмів до методів інтервальної математики, нечітких множин та сценарного аналізу, які дозволяють утримати прогностичну силу моделі навіть у межах жорстких інформаційних обмежень.

Детерміноване прогнозування в системному аналізі довікля базується на фундаментальних фізико-хімічних законах збереження маси, імпульсу та енергії. В основі таких алгоритмів лежить припущення, що стан екологічної системи в майбутньому однозначно визначається її поточним станом та діючими зовнішніми силами. Математичний апарат детермінованого підходу описується системами диференціальних рівнянь у частинних похідних, які моделюють процеси адвекції (перенесення речовини потоком повітря чи води), дифузії та хімічної трансформації поллютантів. Типовим прикладом є рівняння турбулентної дифузії Гаусса для розрахунку розсіювання викидів із димових труб або моделі Стрітера-Фелпса для прогнозування динаміки розчиненого кисню та органічного забруднення у річках. Перевагою детермінованих моделей є їх висока фізична точність та чітка причинно-наслідкова структура. Вони є незамінними для короткострокових оперативних прогнозів, наприклад, при оцінці зони поширення токсичної хмари під час аварії на хімічному підприємстві.

Коли внутрішні фізичні механізми системи є надто складними або невідомими, системний аналіз залучає статистичні методи прогнозування. Цей апарат оперує емпіричними даними екологічного моніторингу, розглядаючи екосистему як «чорну скриньку». Основним інструментом тут є аналіз часових рядів, який дозволяє виявити довгострокові тренди, сезонні коливання та

випадкові флуктуації показників якості середовища. Математичну основу становлять моделі авторегресії та інтегрованого ковзного середнього (ARIMA), де майбутнє значення екологічного параметра розраховується як лінійна комбінація його попередніх значень та помилок прогнозу. Також активно застосовується множинний регресійний аналіз для встановлення статичних зв'язків між рівнем забруднення та метеорологічними чинниками. Статистичні алгоритми демонструють високу ефективність у середньостроковому прогнозуванні (наприклад, для оцінки сезонної динаміки смогу в мегаполісах), проте їхня точність стрімко падає при кардинальній зміні зовнішніх умов або антропогенного навантаження.

Стохастичне прогнозування розглядає стан довкілля як випадковий процес, визнаючи, що природна мінливість та неповнота даних унеможливають отримання єдиного точного результату. Замість фіксованого значення стохастичні алгоритми розраховують щільність розподілу ймовірностей майбутнього стану екосистеми. Потужним математичним апаратом у цій сфері є Баєсівські мережі довіри (Bayesian Belief Networks) – спрямовані ациклічні графи, які відображають імовірнісні причинно-наслідкові зв'язки між екологічними факторами. Головна перевага теореми Баєса полягає у можливості постійного перерахунку та оновлення апостеріорних (кінцевих) ймовірностей у міру надходження нових оперативних даних моніторингу. Наприклад, при прогнозуванні ризику цвітіння водоростей Баєсівська мережа інтегрує ймовірнісні дані про температуру, концентрацію фосфатів та швидкість вітру. Це дозволяє екологам оцінити не просто абстрактну концентрацію водоростей, а точну ймовірність виникнення екологічної кризи у відсотках, що є критично важливим для управління екологічними ризиками.

Для підручника «Системний аналіз якості навколишнього середовища» математичне моделювання процесів переносу та перетворення забруднювачів є фундаментальним. Розглянемо динаміку концентрації токсиканта у водоймі постійного об'єму V . Прогноз стану екосистеми базується на рівнянні матеріального балансу, яке враховує одночасний трансфер (надходження та вимивання речовини) і хімічну трансформацію (деградацію).

Нехай у водойму зі швидкістю потоку Q надходить стічна вода з концентрацією речовини C_{in} . Водночас відбувається розпад забруднювача за законом першого порядку з константою швидкості k . Диференціальне рівняння зміни концентрації $C(t)$ у часі t має вигляд (рис.33):

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{in} - QC - kVC$$

Рис. 33. Диференціальне рівняння зміни концентрації у час

Розділивши обидві частини на V та ввівши коефіцієнт водообміну отримуємо лінійне рівняння (рис. 34)

$$\frac{dC}{dt} = \lambda C_{in} - (\lambda + k)C$$

Рис. 34. Лінійне рівняння зміни концентрації у час

Інтегрування цього рівняння за початкової концентрації $C(0) = C_0$ дозволяє аналітично розрахувати точний прогноз. Ця модель дає змогу системному аналітику завчасно оцінити час досягнення гранично допустимих концентрацій (ГДК) та спрогнозувати новий стаціонарний стан екосистеми у разі зміни антропогенного навантаження (рис. 35).

$$C(t) = \frac{\lambda C_{in}}{\lambda + k} + \left(C_0 - \frac{\lambda C_{in}}{\lambda + k} \right) e^{-(\lambda+k)t}$$

Рис. 35. Диференціальне рівняння зміни концентрації у час

У системному аналізі якості довкілля для прогнозування часових рядів, коли фізико-хімічні механізми надто складні, застосовують статистичні методи. Якщо концентрація домішок у повітрі має стійку тенденцію, використовують трендові моделі, наприклад, лінійне рівняння прогнозу (рис. 36):

$$\hat{Y}(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon$$

Рис.36. Диференціальне рівняння зміни концентрації у час

де t – час, а ε – випадкова помилка. Для врахування внутрішньої інерційності системи, коли поточний стан залежить від попередніх, будують авторегресійні моделі AR(p). Наприклад, модель першого порядку AR(1) для прогнозу температури чи рівня води має вигляд (рис. 37):

$$X_t = c + \phi_1 X_{t-1} + \varepsilon_t$$

Рис. 37. Диференціальне рівняння зміни концентрації у час

Коли прогноз вимагає врахування невизначеності та причинно-наслідкових зв'язків між багатьма чинниками (наприклад, вплив опадів і викидів на якість води), незамінними є баєсівські мережі. Вони базуються на теоремі Баєса для оцінки апостеріорної ймовірності екологічної події А за наявності нових даних В (рис. 38):

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

Рис. 38. Використання баєсівських мереж для оцінки апостеріорної ймовірності екологічної події

Практика розробки прогностичних алгоритмів на основі штучного інтелекту (ШІ) в системному аналізі довкілля починається зі збору та передобробки екологічних даних. Оскільки моніторингові ряди часто містять пропуски, першим кроком є їх імпутація та нормалізація. Далі здійснюється архітектурне проектування моделі. Для прогнозування динаміки складних екосистем (наприклад, концентрації $PM_{2.5}$ ефективно застосовувати рекурентні нейронні мережі типу LSTM, які здатні вловлювати довгострокові часові залежності. Навчання алгоритму полягає в мінімізації функції втрат, як-от середньоквадратичної помилки (MSE), на навчальній вибірці (рис. 39)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Рис. 39. Використання баєсівських мереж для оцінки апостеріорної ймовірності екологічної події

де u_i – реальне значення показника, а \hat{u}_i – прогноз моделі.

Оптимізація ваг здійснюється через градієнтний спуск (наприклад, алгоритмом Adam). Важливим етапом є крос-валідація та регуляризація (наприклад, L_2 -регуляризація) для запобігання перенавчанню, коли модель втрачає узагальнюючу здатність. Готова ШІ-модель інтегрується в геоінформаційні системи для автоматичного прогнозування екологічних ризиків.

Застосування штучних нейронних мереж є проривним інструментом у системному аналізі якості довкілля завдяки їхній здатності моделювати складні нелінійні залежності. Класичні штучні нейронні мережі (ANN) прямого поширення ефективно вирішують задачі просторової інтерполяції екологічних показників та класифікації станів екосистем на основі поточних факторів впливу. Проте для аналізу динамічних процесів, таких як коливання концентрації газових домішок у повітрі, критично важливим є врахування часового контексту. Для цього використовують рекурентні мережі з довгою короткостроковою пам'яттю (LSTM). Архітектура LSTM містить спеціальні блоки пам'яті, що регулюються трьома «воротами» (фільтрами): забування (f_t), введення (i_t) та виведення (o_t). Математично стан комірки C_t та прихований стан h_t на кроці t визначаються через активаційну функцію сигмоїди σ та гіперболічний тангенс \tanh (рис.40)

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f)$$

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t)$$

Рис. 40. Застосування штучних нейронних мереж для оцінки апостеріорної ймовірності екологічної події

Завдяки такій структурі моделі LSTM успішно долають проблему затухання градієнта. Вони точно прогнозують довгострокові екологічні тренди, враховуючи як миттєві антропогенні викиди, так і накопичувальний ефект метеорологічних чинників у часі.

Методи машинного навчання (ML) є незамінними в системному аналізі для моделювання складних нелінійних процесів у біосфері, де класичні детерміновані підходи мають високу похибку. Яскравими прикладами є прогнозування евтрофікації (цвітіння водойм) або експансії інвазійних видів. Такі біологічні феномени мають каскадний характер і залежать від багатьох синергетичних чинників: температури, інсоляції та концентрації біогенів (фосфору P і азоту N). Для моделювання ймовірності спалаху цвітіння р ефективно застосовувати логістичну регресію або ансамблі дерев рішень (Random Forest), які базуються на нелінійних роздільних функціях. Логістична модель має вигляд (41)

$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}}, \quad z = \beta_0 + \beta_1[P] + \beta_2[N] + \beta_3T$$

Рис.41. Застосування логістичної регресії для прогнозування змін у довкіллі

Для аналізу поширення інвазійних видів часто використовують метод опорних векторів (SVM). Завдяки ядерному переходу (kernel trick), наприклад, завдяки радіально-базисній функції (RBF) алгоритм переносить вхідні екологічні фактори у багатовимірний простір (рис. 42). Це дозволяє провести чітку нелінійну межу між зонами потенційного заселення та безпечними ареалами, забезпечуючи точний моніторинг якості довкілля.

$$K(x, x') = \exp(-\gamma \|x - x'\|^2)$$

Рис. 42. Застосування логістичної регресії для прогнозування змін у довкіллі

У системному аналізі якості навколишнього середовища оцінка надійності прогностичних алгоритмів є критично важливим етапом, оскільки помилкові екологічні прогнози можуть призвести до катастрофічних управлінських рішень або значних економічних збитків. Цей процес базується на трьох взаємопов'язаних процедурах: верифікації, валідації та оцінці адекватності.

Верифікація (verification) – це перевірка внутрішньої технічної коректності алгоритму. Вона відповідає на питання: «Чи правильно побудована модель?». На цьому етапі системний аналітик з'ясовує, чи безпомилково перенесено математичні рівняння або архітектуру нейромережі у програмний код, чи коректно працюють чисельні методи інтегрування та чи немає збоїв у процесі обчислень.

Валідація (validation) спрямована на оцінку зовнішньої відповідності моделі реальному світу і відповідає на питання: «Чи правильну модель ми побудували?». Для цього прогнозні значення порівнюють із незалежними емпіричними даними екологічного моніторингу, які не використовувалися під час навчання алгоритму. Якість валідації кількісно оцінюють за допомогою статистичних метрик. Зокрема, використовують коефіцієнт детермінації R^2 , який показує частку поясненої дисперсії, та середню абсолютно-відсоткову помилку (MAPE) (рис. 43)

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

де y_i – фактичний екологічний показник (наприклад, концентрація діоксиду азоту), а \hat{y}_i – його прогноз.

Рис. 43. Застосування логістичної регресії для прогнозування змін у довкіллі

Для об'єктивної оцінки ефективності прогностичних алгоритмів у системному аналізі якості навколишнього середовища застосовують спеціальні статистичні критерії. Вони дозволяють кількісно виміряти відхилення прогнозних значень від фактичних даних екологічного моніторингу, що є критично важливим для мінімізації екологічних ризиків. Найпоширенішим критерієм є середня квадратична помилка (MSE). Вона обчислюється як середнє арифметичне квадратів різниць між реальністю та прогнозом (рис. 44)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Рис. 44. Застосування середньої квадратичної помилки об'єктивної оцінки ефективності прогностичних алгоритмів

де y_i – виміряне значення (наприклад, концентрація пилу PM_{10}), \hat{y}_i – прогнозоване значення, а n – обсяг вибірки.

Через піднесення помилок до квадрата MSE є вкрай чутливою до великих відхилень, що корисно для виявлення аномальних залпових викидів забруднювачів. Проте MSE незручна для прямої інтерпретації, оскільки її одиниці вимірювання теж піднесені до квадрата. Для повернення

до вихідної розмірності використовують корінь із середньоквадратичної помилки (RMSE) (рис. 45). Цей критерій показує середню абсолютну похибку моделі в тих самих одиницях, що й досліджуваний показник (наприклад, у мг/м³).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Рис. 45. Застосування кореня із середньоквадратичної помилки для об'єктивної оцінки ефективності прогностичних алгоритмів

Коли аналітику необхідно оцінити відносну точність моделі незалежно від масштабів вимірювань, застосовують середню абсолютно-відсоткову помилку (MAPE) (рис. 46). Вона виражається у відсотках. Критерій \$MAPE\$ є незамінним під час порівняння якості прогнозів для різних екосистем, наприклад, при зіставленні рівня забруднення малих і великих річок, оскільки він наочно демонструє відсоткову частку помилки алгоритму відносно реального стану довкілля.

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

Рис. 46. Застосування середньої абсолютно-відсоткової помилки для об'єктивної оцінки ефективності прогностичних алгоритмів

Тестування алгоритмів на незалежних вибірках даних є фундаментальним етапом у системному аналізі якості навколишнього середовища, який гарантує об'єктивність та узагальнюючу здатність прогностичних моделей. Екологічні дані часто мають складну просторово-часову структуру, тому алгоритм штучного інтелекту чи статистична модель можуть легко підлаштуватися під специфічні шуми конкретного набору даних. Це явище називається перенавчанням (overfitting), і щоб його виявити, модель обов'язково тестують на даних, які вона «не бачила» під час навчання.

На практиці загальний масив моніторингових даних розділяють на три ізольовані частини: навчальну (train), валідаційну (validation) та тестову (test) вибірки. Навчальна вибірка використовується для безпосереднього налаштування параметрів (ваг) моделі. Валідаційна вибірка потрібна для підбору гіперпараметрів та контролю перенавчання. Фінальне оцінювання здійснюється виключно на тестовій вибірці, яка виступає в ролі незалежного імітатора реальних умов експлуатації моделі. Математично якість генералізації перевіряється через порівняння функції втрат на навчальній (L_{train}) та тестовій (L_{test}) вибірках (рис. 47)

$$L_{test} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mathcal{L}(y_j^{test}, \hat{y}_j^{test})$$

де m — кількість спостережень у тестовому наборі. Якщо $L_{test} \approx L_{train}$, модель вважається стабільною.

Рис. 47. Застосування середньої абсолютно-відсоткової помилки для об'єктивної оцінки ефективності прогностичних алгоритмів

Для екологічних часових рядів (наприклад, щоденних концентрацій озону) звичайне випадкове розділення даних є некоректним через ефект автокореляції. У таких випадках застосовують метод «блокування» або послідовного тестування у часі (time-series split), де як тестову вибірку беруть хронологічно пізніший період (наприклад, увесь наступний рік

спостережень). Тільки після успішного проходження такого незалежного іспиту алгоритм може бути рекомендований для інтеграції в державні системи екологічного моніторингу та прийняття управлінських рішень.

Аналіз чутливості та стійкості прогностичних моделей є обов'язковим етапом системного аналізу якості навколишнього середовища. Оскільки екологічні системи є стохастичними та піддаються постійному зовнішньому впливу, вхідні дані (наприклад, метеорологічні умови, обсяги викидів, гідрологічні показники) завжди містять певну похибку або природну варіативність. Оцінка моделі дозволяє з'ясувати, як ці невизначеності впливають на кінцевий екологічний прогноз.

Аналіз чутливості визначає, який саме із вхідних параметрів чинить найбільший вплив на вихідні результати моделі. Це дозволяє аналітику зрозуміти структуру зв'язків у системі та виділити критичні фактори, що потребують найточнішого вимірювання.

Локальний аналіз чутливості, базується на обчисленні частинних похідних вихідної функції за певним параметром у конкретній точці простору станів. Математично індекс локальної чутливості S_i для вихідного показника екосистеми Y за вхідним параметром X_i виражається як (рис. 48)

$$S_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \cdot \frac{X_i}{Y}$$

Рис. 48. Локальний аналіз чутливості для об'єктивної оцінки ефективності прогностичних алгоритмів

Глобальний аналіз чутливості: Досліджує весь простір можливих значень параметрів з урахуванням їхньої взаємодії. Найчастіше застосовують дисперсійні методи (наприклад, індекси Соболя), які розкладають загальну дисперсію виходу моделі $V(Y)$ на компоненти, зумовлені кожним чинником окремо та їхніми синергетичними ефектами (рис. 49)

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + V_{12\dots k}$$

Рис. 49. Локальний аналіз чутливості для об'єктивної оцінки ефективності прогностичних алгоритмів

Аналіз чутливості досліджує, як саме варіативність (зміна) вхідних параметрів моделі впливає на мінливість її кінцевого результату. Він допомагає виявити «критичні» чинники, які найбільше визначають поведінку системи. зазвичай виділяють два основні підходи.

Локальний аналіз чутливості. Оцінює вплив зміни одного конкретного параметра, тоді як усі інші параметри залишаються незмінними (фіксованими у базовій точці). Математично цей метод базується на обчисленні частинних похідних (рис. 50). Індекс локальної чутливості S_i для вихідної функції Y за вхідним параметром X_i розраховується як:

$$S_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \cdot \frac{X_i}{Y}$$

Рис. 50. Індекс локальної чутливості для об'єктивної оцінки ефективності прогностичних алгоритмів

Глобальний аналіз чутливості досліджує весь простір можливих значень вхідних параметрів одночасно, враховуючи їхній взаємний вплив та нелінійні залежності. Найпопулярнішими є дисперсійні методи (наприклад, індекси Соболя). Вони розкладають загальну дисперсію (невизначеність) вихідного результату $V(Y)$ на суму компонентів, зумовлених кожним фактором та їхніми комбінаціями (рис. 51)

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + V_{12\dots k}$$

Рис. 51. Індекс глобальної чутливості для об'єктивної оцінки ефективності прогностичних алгоритмів

Проектування архітектури геоінформаційних прогностичних систем (ГІС) вимагає створення багаторівневої структури, що здатна ефективно об'єднувати великі масиви просторових даних із потужними обчислювальними інструментами. Ядром такої архітектури є серверна частина, яка керує базами геоданих, де зберігається інформація про рельєф, гідрографію, метеорологічні умови та джерела антропогенного навантаження. Над цим базисним рівнем розгортається аналітичний шар, що містить математичні алгоритми, моделі штучного інтелекту та статистичні методи прогнозування. Клієнтський інтерфейс забезпечує кінцевому користувачу зручний доступ до результатів моделювання у вигляді інтерактивних карт та графіків.

Практичні аспекти інтеграції математичних алгоритмів із просторовими даними полягають у подоланні розриву між статичною географічною матрицею та динамічною природою екологічних процесів. Для цього математичні моделі трансформуються у спеціальні програмні модулі (плагіни або сервіси), які автоматично зчитують просторові координати, межі об'єктів та атрибутивні характеристики безпосередньо з шарів ГІС. Алгоритм розраховує зміни показників у кожній точці просторової сітки з певним кроком у часі, враховуючи просторові зв'язки, такі як напрямок вітру, ухил рельєфу чи швидкість течії річки.

Кінцевим результатом такої інтеграції є побудова динамічних цифрових карт прогнозування. Для атмосферного повітря ці карти в реальному часі візуалізують розсіювання смогу чи хімічних викидів від заводів з урахуванням забудови міста. У сфері водних ресурсів системи прогнозують поширення плями забруднення вниз за течією річки або заморні явища на водосховищах. Для ґрунтів ГІС-моделі відображають зони накопичення важких металів та пестицидів, враховуючи водну ерозію. Такі карти дають екологам і управлінцям наочний інструмент для швидкого аналізу ситуації та прийняття рішень. Прийняття управлінських рішень у сфері природокористування базується на перетворенні складних математичних розрахунків у зрозумілі превентивні екологічні стратегії. Вихідні дані прогностичних алгоритмів, які часто є масивами цифрових показників або ймовірнісних оцінок, трансформуються в конкретні плани дій для бізнесу та муніципалітетів. Замість ліквідації наслідків екологічних катастроф, такий підхід дозволяє діяти на випередження: завчасно впроваджувати обмеження на викиди підприємств під час несприятливих метеоумов, корегувати роботу очисних споруд або перенаправляти транспортні потоки для зниження рівня смогу в містах.

Центральним інструментом у цьому процесі є аналіз сценаріїв «що, якщо» (What-If Analysis). Він дає змогу моделювати гіпотетичні ситуації та оцінювати їхній потенційний вплив на навколишнє середовище до моменту реалізації. Наприклад, управлінці можуть проаналізувати, як зміниться якість води в річці, якщо побудувати новий завод із заданими параметрами очистки, або як вплине поява зелених зон на температурний режим міських мікрорайонів.

У контексті адаптації до кліматичних змін цей метод є незамінним для мінімізації антропогенного навантаження. Він дозволяє прораховувати довгострокові сценарії, як-от тривалі посухи, раптові паводки чи зміну тривалості вегетаційного періоду. На основі цих прогнозів

приймаються стратегічні рішення щодо реструктуризації лісових насаджень, переходу на посухостійкі сільськогосподарські культури, модернізації дренажних систем та оптимізації використання водних ресурсів, що гарантує екологічну безпеку та стійкість регіону в майбутньому.

Екологічна криза ХХІ століття вимагає від науки та суспільства переходу від пасивної, констатуючої позиції до активного випереджального управління. Традиційні підходи до охорони природи, засновані на фіксації вже завданих збитків, довели свою неефективність. Коли моніторинг фіксує масову загибель риби в річці, всихання тисяч гектарів лісу або критичне підвищення захворюваності населення в мегаполісі, це означає, що система довкілля вже зазнала незворотної деградації, а гомеостатичні механізми саморегуляції повністю зруйновані. Головним завданням сучасного екологічного менеджменту є недопущення таких станів, що можливо лише за умови наявності точного, надійного та завчасного прогнозу.

Прогнозування якості навколишнього середовища – це науково обґрунтоване судження про можливі майбутні стани природних та соціоекологічних систем, а також про альтернативні шляхи й терміни досягнення цих станів умовного антропогенного тиску та кліматичних змін. У структурі дисципліни «Системний аналіз якості навколишнього середовища» прогностична функція є замикаючою та найбільш відповідальною. Будь-який збір даних, інгредієнтний моніторинг чи структурне моделювання мають сенс лише тоді, коли вони матеріалізуються в прогностичний алгоритм, здатний підтримати ухвалення стратегічних управлінських рішень.

Побудова прогностичних алгоритмів для природних систем – це надскладне методологічне завдання. Аналітик стикається з об'єктами, які за своєю природою є відкритими, нелінійними, стохастичними та ієрархічними. Процеси в геосферах розгорнуті в часі та просторі, мають кумулятивний характер і містять часові лаги (запізнілі ефекти), які маскують реальні загрози. Щоб успішно вирішувати ці завдання, системний аналіз розробив комплексну методологію, яка поєднує класичні статистичні інструменти, імітаційне комп'ютерне моделювання та новітні технології штучного інтелекту. Цей текст присвячений детальному, фундаментальному розкриттю методологічних засад, етапів проектування, типів та практичного досвіду впровадження прогностичних алгоритмів у сфері екологічної безпеки та моніторингу довкілля.

Успішна розробка будь-якого алгоритму прогнозування неможлива без глибокого розуміння філософських та методологічних принципів, на яких базується системне передбачення. Прогнозування в екології суттєво відрізняється від прогнозування в техніці чи астрономії, де діють жорсткі, детерміновані закони (наприклад, розрахунок траєкторії польоту ракети чи часу сонячного затемнення). В екологічному системному аналізі діють такі фундаментальні принципи:

Принцип системної цілісності (холізму): Прогноз стану окремого компонента довкілля (наприклад, концентрації кисню в річці чи біомаси лісу) не може будуватися ізольовано. Він повинен враховувати всю мережу зв'язків цього компонента з іншими підсистемами. Зміна якості повітря впливає на кислотність ґрунту, що, у свою чергу, трансформує рослинність і змінює гідрологічний режим території. Алгоритм має прораховувати систему як єдине ціле.

Принцип нелінійності та пороговості: Природні системи тривалий час можуть реагувати на антропогенний тиск лінійно і майже непомітно. Проте при досягненні певного критичного значення (точки біфуркації, екологічного порогу) навіть мізерний додатковий вплив запускає вибухову, лавиноподібну зміну якості середовища. Якісний прогностичний алгоритм повинен вміти знаходити ці приховані пороги і попереджати про наближення до них, а не просто лінійно екстраполювати минулі тенденції в майбутнє.

Принцип стохастичності (ймовірності): Через відкритість довкілля та вплив випадкових кліматичних чинників (посухи, зливи, аномальні морози) точний стохастичний детермінований прогноз на великі часові проміжки є фікцією. Жоден алгоритм не може сказати: «15 серпня 2029 року концентрація фенолу в річці становитиме рівно 0,005 міліграма на літр». Системний прогноз завжди оперує поняттями ймовірнісних коридорів, розподілу випадкових величин та аналізу ризиків.

Принцип альтернативності (сценарності): Майбутнє системи довкілля не є зумовленим. Воно залежить від рішень, які ухвалить людство сьогодні. Тому методологія прогнозування

будується на розробці багатоваріантних сценаріїв. Прогноз не просто пасивно вгадує майбутнє, він відповідає на запитання: «Що буде, якщо ми реалізуємо Стратегію А, і як зміниться якість середовища, якщо ми оберемо Стратегію Б?».

Будь-який прогностичний алгоритм, незалежно від ступеня його складності чи використання передових нейромереж, підпорядковується фундаментальному закону комп'ютерних наук: «Сміття на вході – сміття на виході» (Garbage In, Garbage Out). Якщо первинні екологічні дані, на яких навчається чи будується алгоритм, є неточними, фрагментарними, зашумленими або зібраними з порушенням методології, отриманий прогноз буде не просто марним, а небезпечним, оскільки дезінформує управлінців.

Формування інформаційного депо для прогнозування якості довкілля стикається з низкою системних викликів. Реальні процеси в природі відбуваються безперервно. Проте станції моніторингу найчастіше відбирають проби дискретно – наприклад, один раз на місяць або один раз на добу у визначених точках. Алгоритм прогнозування змушений працювати з розірваними часовими рядами. Якщо станція пропустила залповий скид токсикантів підприємством, що відбувся о третій годині ночі між офіційними відборами проб, алгоритм отримає викривлену картину «ідеального благополуччя» водойми і побудує хибний прогноз її асиміляційної ємності.

Для побудови якісного екологічного прогнозу необхідно одночасно поєднувати дані абсолютно різної природи. Це фізичні параметри (температура, вологість, швидкість течії), хімічні показники (концентрації сотень речовин), біологічні індикатори (чисельність популяцій, стан хвої, біомаса водоростей) та соціально-економічні чинники (обсяги промислового виробництва, щільність населення, трафік автомобілів). Ці дані мають різні одиниці вимірювання, різні масштаби і збираються різними відомствами з використанням відмінних методик. Завдання системного аналітика – провести нормалізацію, стандартизацію та гармонізацію цих потоків даних перед тим, як передати їх у прогностичний двигун.

Екологічні дані завжди містять велику кількість випадкових коливань («білого шуму»), викликаних дрібними природними флуктуаціями або похибками вимірювальних приладів. Крім того, у часових рядах часто зустрічаються «аномальні спалахи» – наприклад, раптовий стрибок концентрації якоїсь речовини в 100 разів, який може бути як наслідком реальної аварії на заводі, так і результатом брудного хімічного посуду в лабораторії. Перед початком моделювання аналітик повинен застосувати методи цифрової фільтрації, згладжування часових рядів та відсікання помилкових аномалій, щоб алгоритм виділяв реальний системний тренд, а не навчався на випадкових помилках вимірювання.

У системному аналізі якості навколишнього середовища весь арсенал прогностичних інструментів можна класифікувати на чотири великі методологічні групи, кожна з яких має свої сфери застосування, переваги та обмеження.

1. Статистичні (емпірико-аналітичні) алгоритми

Ці алгоритми базуються на пошуку математичних закономірностей безпосередньо в історичних масивах даних моніторингу. Вони розглядають систему довкілля як «сіру» або «напівпрозору скриньку». Їм не обов'язково знати глибокі внутрішні біологічні чи фізичні механізми процесу; головне – знайти стійкі статистичні зв'язки між входом і виходом.

Екстраполяція трендів: Найпростіший підхід, який припускає, що тенденція зміни якості середовища, яка сформувалася в минулому, збережеться і в майбутньому. Лінія тренду продовжується вперед у часі. Метод ефективний лише для короткострокових прогнозів у дуже стабільних умовах.

Багатофакторний регресійний аналіз: Алгоритм будує залежність цільового показника якості (наприклад, концентрації пилу в місті) від набору незалежних факторів-предикторів (швидкості вітру, температури повітря, кількості працюючих підприємств, інтенсивності дорожнього руху).

Авторегресійні інтегровані алгоритми рухомого середнього (моделі класу ARIMA): Складні інструменти аналізу часових рядів, які враховують внутрішню пам'ять системи, сезонні коливання (наприклад, щороку навесні якість води погіршується через паводок) та випадкові збурення.

2. Імітаційні (фізико-теоретичні) алгоритми

Ці алгоритми будуються на основі фундаментальних теоретичних законів природи (законів збереження маси та енергії, рівнянь гідродинаміки, законів термодинаміки, біохімічної кінетики). Вони описують систему довкілля з позиції «прозорої скриньки», де кожен крок алгоритму імітує реальний фізичний чи біологічний процес – наприклад, гравітаційне осадження частинок пилу, адвективне перенесення вітром або споживання азоту рослинами. Вони вимагають колосальних обчислювальних потужностей та глибоких наукових знань, але є незамінними для довгострокового стратегічного прогнозування та програвання абсолютно нових сценаріїв, яких ніколи не було в минулому.

3. Експертні (евристичні) алгоритми

Використовуються в умовах екстремального браку об'єктивних інструментальних даних, коли побудувати статистичну чи імітаційну модель фізично неможливо (наприклад, при прогнозуванні наслідків впровадження принципово нової технології, яка ще ніде у світі не застосовувалася). Вони базуються на формалізації знань, інтуїції та досвіду висококваліфікованих експертів-екологів. Сюди належать алгоритми методу Дельфі, побудова матриць взаємного впливу чи розробка якісних когнітивних карт ландшафтів.

4. Інтелектуальні алгоритми (алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту)

Це найбільш динамічний та сучасний напрямок системного аналізу. Вони реалізують концепцію «чорної скриньки». Алгоритм (наприклад, архітектура глибокої штучної нейронної мережі, випадкові лісові структури чи градієнтний бустинг) самостійно навчається на гігантських масивах даних (Big Data), включаючи інформацію з супутників, радарів та мереж автоматичних датчиків. Вони здатні знаходити надзвичайно тонкі, заплутані, нелінійні зв'язки у надскладних соціоекологічних системах, які неможливо описати класичними формулами чи звичайними статистичними тестами.

Створення надійного прогностичного алгоритму для завдань екологічного моніторингу – це не просто написання коду, а комплексний інженерно-системний процес, що складається з кількох обов'язкових, послідовних стадій.

Стадія 1. Формування вхідного вектора ознак (Feature Engineering)

Аналітик визначає, які саме чинники будуть подаватися на вхід алгоритму як прогностичні предиктори. Цей етап вимагає глибоких екологічних знань. Наприклад, якщо ми прогнозуємо рівень забруднення підземних вод навколо промислового полігона відходів, до вхідного вектора необхідно включити: поточний обсяг фільтрату на полігоні, рівень опадів за останні два тижні, коефіцієнт фільтрації ґрунтів, глибину залягання першого водоносного горизонту та напрямок підземного стоку. На цій же стадії проводиться очищення даних від шуму та заповнення пропусків у часових рядах.

Стадія 2. Вибір та архітектура математичного ядра алгоритму

Обирається тип моделі, який найкраще відповідає природі завдання. Для короткострокового оперативного прогнозу якості повітря (на завтра) часто обирають авторегресійні нейромережі. Для довгострокового прогнозу еволюції лісових екосистем на 50 років – імітаційні просторово-розподілені моделі сукцесії. На цій стадії фіксується внутрішня структура алгоритму: кількість шарів у нейромережі, контури зворотних зв'язків, часові лаги.

Стадія 3. Навчання та калібрування алгоритму

Весь історичний масив екологічних даних розбивається на дві нерівні частини: навчальну вибірку (зазвичай 70-80% даних) та тестову вибірку (20-30%). На навчальній вибірці алгоритм налаштовує свої внутрішні параметри (вагові коефіцієнти, швидкості процесів, коефіцієнти розпаду речовин) таким чином, щоб мінімізувати розходження між своїми прогнозами та реальною історичною правдою природи.

Стадія 4. Тестування та валідація на незалежних даних

Це критичний момент, який перевіряє алгоритм на здатність до генералізації (узагальнення). Алгоритму подають на вхід дані з тестової вибірки, які він ніколи не бачив під час навчання, і дивляться, наскільки точним буде його прогноз. Якщо на навчальній вибірці точність була ідеальною, а на тестовій – катастрофічно впала, це ознака небезпечного системного дефекту – перенавчання (overfitting). Це означає, що алгоритм просто механічно зазубрив минулі випадкові

коливання і шум, але не зрозумів реальної системної закономірності природи. Такий алгоритм відправляється на повну перебудову архітектури.

Стадія 5. Розрахунок метрик якості та оцінка невизначеності

Жоден екологічний прогноз не може випускатися без супроводу оцінки його похибки. Розраховуються стандартні системні метрики якості алгоритму: середня абсолютна похибка, середньоквадратична помилка та коефіцієнт детермінації (який показує, яку частку загальної мінливості природи здатний пояснити наш алгоритм). Обов'язково проводиться аналіз чутливості системи: досліджується, як зміна похибки вхідних даних впливає на точність фінального прогнозу якості середовища.

Алгоритми прогнозування атмосферного забруднення: Короткострокові оперативні моделі

Прогнозування якості повітря в сучасних індустріальних центрах є життєво важливою інфраструктурною потребою. Оперативний екологічний прогноз будується на часові горизонти від кількох годин до трьох діб (на завтра та післязавтра). Його головна мета – попередити населення про загрозу виникнення смогу та надати диспетчерам екологічних служб підстави для введення режиму Несприятливих Метеорологічних Умов (НМУ), при якому промислові гіганти зобов'язані примусово знизити обсяги виробництва.

Структура короткострокового прогностичного алгоритму для атмосфери базується на поєднанні метеорологічного прогнозу та екологічного ядра. Розглянемо логіку функціонування інтелектуального алгоритму на основі штучних нейронних мереж, призначеного для прогнозування концентрації дрібнодисперсного пилу та діоксиду азоту в міському повітрі.

Метеорологічний блок (прогноз погоди на завтра): Швидкість та напрямок вітру, температура повітря на різних висотах (для виявлення температурних інверсій), відносна вологість, атмосферний тиск, сонячна радіація (яка запускає фотохімічні реакції утворення озону).

Блок емісії (антропогенне джерело): Циклічний графік роботи міських підприємств за днями тижня (будні/вихідні) та погодинний профіль інтенсивності руху автомобільного транспорту (ранкові та вечірні піки трафіку).

Блок пам'яті (історичний контекст): Реальні концентрації забруднюючих речовин у повітрі за сьогодні та вчора, зафіксовані автоматичними станціями моніторингу. Це дозволяє алгоритму врахувати поточний рівень завантаженості атмосфери.

Математичне ядро алгоритму (наприклад, рекурентна нейромережа тривалої короткострокової пам'яті) обробляє цей вектор. Завдяки наявності внутрішніх зворотних зв'язків та цифрових комірок пам'яті, алгоритм здатний імітувати ефект атмосферної інерції. Наприклад, якщо модель бачить, що сьогодні в місті накопичилася велика маса діоксиду азоту, а метеорологічний блок прогнозує на завтра повний штиль (відсутність вітру) у поєднанні з температурною інверсією (тепла повітряна кришка над містом), алгоритм не просто лінійно перенесе сьогоднішню концентрацію на завтра. Він прорахує позитивний зворотний зв'язок: відсутність вентиляції призведе до накопичення нових ранкових автомобільних викидів поверх уже наявних, а сонячна радіація трансформує цей коктейль у токсичний фотохімічний смог. Алгоритм видасть тривожний прогноз: «Завтра о 12:00 очікується перевищення екологічного нормативу якості повітря в 4 рази». Цей прогноз дає міській владі 24 години на те, щоб обмежити в'їзд вантажного транспорту до центру міста та перевести ТЕЦ на екологічні режими спалювання палива.

Довгострокові алгоритми прогнозування якості водних ресурсів на басейновому рівні

Прогнозування якості води в річках та водосховищах вимагає зовсім інших часових та методологічних підходів. Тут горизонт планування становить від кількох місяців (сезонні прогнози) до десятиліть (стратегічні прогнози в умовах глобальних кліматичних змін). Головним завданням є управління водними ресурсами цілих регіонів та забезпечення екологічної безпеки питного водопостачання міст.

На відміну від рухливої атмосфери, якість води в річці критично залежить від процесів, що відбуваються на всій території її водозбірного басейну. Тому сучасні прогностичні алгоритми для водних екосистем будуються за басейновим принципом і реалізуються у вигляді просторово-

розподілених імітаційних моделей (наприклад, логіка алгоритмів класу SWAT – Soil and Water Assessment Tool).

Методологія побудови такого алгоритму передбачає розбиття всього річкового басейну на сотні Гідрологічних Однорідних Одиниць (ГОО) – дрібних просторових ділянок ландшафту, які мають однаковий тип ґрунту, рельєф та характер землекористування (ліс, пасовище, поле кукурудзи, міська забудова).

Алгоритм працює як гігантська балансова система, яка крок за кроком прораховує рух води та хімічних речовин через усі геосферні підсистеми басейну:

Суб-алгоритм наземного стоку: Розраховує, яка частина опадів, що випали на полі, вбереться ґрунтом, яка випарується рослинами, а яка у вигляді поверхневого ручейкового стоку попрямує до найближчого струмка. Разом із цим стоком алгоритм прораховує процес дифузного забруднення – змив часток родючого ґрунту (ерозію), залишків азотних та фосфорних добрив з полів та пестицидів.

Суб-алгоритм ґрунтового та підземного живлення: Імітує повільний рух води через пори та тріщини гірських порід під землею. Цей блок прораховує процеси хімічної фільтрації та сорбції важких металів та інших токсикантів ґрунтовим комплексом, виступаючи як довгостроковий геохімічний буфер.

Суб-алгоритм руслової динаміки та біохімічної трансформації: Описує процеси безпосередньо в руслах річок. Потрапивши у воду, забруднюючі речовини починають рухатися за течією (адвекція), осідати на дно у застійних зонах (седиментація) або розкладатися бактеріями під впливом розчиненого кисню (модифікована логіка моделі Стрітера-Фелпса).

Прогностична цінність такого басейнового алгоритму є колосальною. Розглянемо стратегічне завдання прогнозування якості води у водосховищах, з яких бере воду Житомир, на 20 років уперед в умовного потепління клімату.

Аналітики закладають в алгоритм кліматичний сценарій: підвищення літніх температур на 2 градуси та зміну режиму опадів (замість тривалих помірних дощів – рідкісні, але тропічні зливи). Алгоритм прораховує цей ландшафтний ланцюг і видає нелінійний прогноз: рідкісні тропічні зливи не встигатимуть вбиратися пересохлим ґрунтом і викликатимуть колосальний за потужністю поверхневий змив фосфатів з агрополів регіону безпосередньо в притоки річки. Одночасно висока температура води та надлишок фосфатів у водосховищі запустять лавиноподібний позитивний зворотний зв'язок масове вибухподібне цвітіння синьо-зелених водоростей, дефіцит кисню та замор риби. Вода стане токсичною та непридатною для пиття. Басейновий прогноз заздалегідь попереджає екологів: боротися на виході з цвітінням води за допомогою хімікатів марно. Необхідно терміново змінювати структуру ландшафту басейну сьогодні – висаджувати широкі захисні смуги заплавної лісів та впроваджувати технології безвідвальної оранки на полях, які перехоплять фосфати на етапі наземного стоку, не підпустивши їх до річки.

Прогнозування антропогенної динаміки екосистем: Сукцесійні алгоритми ландшафтного рівня

Найбільш масштабними та складними об'єктами для прогнозування є живі екосистеми на ландшафтному рівні – лісові масиви, болота, заповідні території (наприклад, екосистеми Словечансько-Овруцького кряжу). Тут часові горизонти прогнозу сягають 50–100 років, що зумовлено тривалістю життя головних елементів системи – дерев. Завданням прогнозу є передбачення того, як зміниться біологічна якість лісу, його видовий склад, стійкість та продуктивність під спільним впливом господарської діяльності людини, рослинних інвазій та глобальної зміни кліматичних зон.

Для вирішення цих завдань системний аналіз використовує сукцесійні імітаційні алгоритми (наприклад, моделі класу ярусних або геп-моделей лісу – Gap models). Логіка цих алгоритмів побудована на моделюванні долі кожного окремого дерева на репрезентативних ділянках лісу протягом усього його життя – від насінини до природної смерті та падіння.

Рівень індивідуального дерева: Для кожної породи дерева (сосна, дуб черешчатий, дуб червоний, береза) в пам'ять алгоритму закладено її індивідуальні екологічні константи:

максимальна тривалість життя, темпи росту в різні вікові періоди, вимогливість до світла, вологи та поживних речовин ґрунту, стійкість до заморозків чи посух.

Рівень локальної конкуренції (ділянки лісу): Комп'ютер моделює ділянку лісу як вертикальну структуру ярусів. Дереву конкурують між собою за обмежені ресурси. Високі зрілі дерева утворюють щільний лісовий намет і перехоплюють сонячне світло. Алгоритм розраховує рівень освітленості на рівні землі. Якщо намет лісу є густим і темним, світлолюбні сосни чи берези гинуть від браку сонця, а тіньовитривалі сосни дуба чи граба успішно виживають і ростуть. Чим більше дерево росте, тим більше воно споживає вологи з ґрунту і виділяє опалого листя, змінюючи якість ґрунтової підсистеми під собою.

Рівень ландшафтних збурень (стохастичний блок): До алгоритму закладаються випадкові фактори ризику – ймовірність виникнення лісових пожеж, спалахів розмноження комах-шкідників або масштабних вітровалів. Коли старе дерево в моделі гине і падає від вітру, у наметі лісу утворюється «вікно» (gap) – зона стовідсоткової освітленості та оголеного ґрунту. Туди миттєво кидається насіння світлолюбних порід-піонерів (берези, осики), починаючи новий локальний цикл сукцесії.

Проілюструємо практику роботи сукцесійного алгоритму на прикладі аналізу загрози інвазії дуба червоного в лісах Словечансько-Овруцького кряжу. Екологи закладають в алгоритм карту поточного стану лісів кряжу і запускають симуляцію на 50 років уперед.

Алгоритм починає прораховувати конкуренцію між аборигенним дубом черешчатим та інвазійним дубом червоним. Модель враховує унікальний системний ефект: листя дуба червоного містить величезну кількість танінів і не перегниває, утворюючи на землі товсту суху ковдру.

Комп'ютерний алгоритм прораховує цей ґрунтовий блок і показує, що через 15 років товщина підстилки під інвазійними куртинами досягає критичного порогу, при якому дрібне і легке насіння сосни чи жолуді місцевого дуба черешчатого фізично не можуть пробитися кореневим волоском до реального мінерального ґрунту і масово гинуть на стадії проростання. Водночас великі, важкі жолуді дуба червоного, що мають гігантський внутрішній запас енергії, легко пробивають власну ковдру підстилки. Формується потужний позитивний зворотний зв'язок, що працює на користь чужинця.

Через 40 років симуляції алгоритм малює тривожну просторову картину деградації ландшафту: колишні світлі сосново-дубові ліси кряжу з унікальним багатим підліском перетворюються на темні, одновидові, біологічно збіднені чагарникові зарості дуба червоного. Такий довгостроковий прогноз дає науковцям та лісівникам чітке розуміння: якщо не вжити заходів біоценологічного придушення інвазійного виду вже сьогодні, заповідна цінність та первісна емерджентна якість ландшафту кряжу будуть повністю і незворотно втрачені.

В останні роки системний аналіз якості навколишнього середовища переживає справжню революцію, пов'язану з впровадженням методів штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML). Класичні статистичні або імітаційні алгоритми вимагають від людини або чіткого знання математичних формул розподілу даних, або глибокого розуміння фізичних законів процесу. Проте реальні соціоекологічні системи містять величезну кількість прихованих, нелінійних взаємодій, які людський розум просто не здатний формалізувати у вигляді системи рівнянь. Інтелектуальні алгоритми вирішують цю проблему, виступаючи як самонавчальні системи.

Розглянемо методологію побудови прогностичного алгоритму на основі архітектури Штучних Нейронних Мереж (ШНМ) для прогнозування критичних спалахів розмноження синьо-зелених водоростей (евтрофування) у каскаді водосховищ. Цей процес є надзвичайно складним: він залежить від сотень чинників – від сонячної активності та швидкості течії до концентрації фосфатів, співвідношення різних видів зоопланктону та температури води.

Аналітики будують нейромережевий алгоритм за принципом «глибокого навчання» (Deep Learning). На вхід алгоритму подається гігантський історичний масив даних моніторингу за останні 30 років: щоденні супутникові знімки водосховищ у різних спектральних діапазонах (які показують рівень хлорофілу у воді), щогодинні дані метеостанцій та результати хімічних аналізів води з лабораторій екологічного контролю.

Під час стадії навчання нейромережа починає безперервно проганяти ці дані через свої цифрові шари, що складаються з тисяч взаємопов'язаних нейронів. Алгоритм порівнює свій поточний прогноз із тим, що реально відбувалося в природі в ті роки. Якщо прогноз не збігається, вмикається алгоритм зворотного поширення помилки (Backpropagation): мережа автоматично коригує вагові коефіцієнти зв'язків між нейронами, наче підкручуючи тисячі дрібних гвинтиків у гігантському механізмі. Цей процес повторюється мільйони разів, поки помилка алгоритму не наблизиться до мінімуму.

Дивовижна особливість та сила інтелектуального алгоритму полягає в тому, що він здатний виявити приховані, синергетичні ефекти, про які вчені-біологи могли навіть не здогадуватися. Наприклад, нейромережа може виявити, що критичний спалах цвітіння води стається лише тоді, коли одночасно збігаються три чинники: температура води перевищує певну цифру протягом трьох днів поспіль, швидкість вітру падає нижче конкретного значення, а за тиждень до цього пройшла сильна злива, яка змила фосфати з полів. Жоден класичний статистичний тест такий тонкий трифакторний нелінійний зв'язок виявити не здатний. Після навчання та успішного тестування на незалежній вибірці цей інтелектуальний алгоритм інтегрується в систему екологічного моніторингу, працюючи в режимі реального часу. Отримуючи свіжі супутникові знімки та прогнози погоди, він здатний за тиждень до катастрофи видати точний прогноз: «Через 5 днів ймовірність критичного цвітіння води в Північному секторі водосховища становить 92%». Це дає інженерам час змінити режим скидання води через греблю, посилити аерацію або внести безпечні біопрепарати для пригнічення водоростей.

Сам по собі прогностичний алгоритм, реалізований у вигляді сухого комп'ютерного коду чи таблиці з цифрами ймовірностей, є малоприматним для використання в реальному житті керівниками областей, директорами заповідників чи міністрами. Кінцевий користувач прогнозу не є математиком чи системним аналітиком. Тому фінальним, практичним етапом методології є інтеграція прогностичних алгоритмів у просторові інтерфейси Геоінформаційних систем (ГІС) та архітектуру Систем Підтримки Ухвалення Рішень (СПУР).

СПУР – це інтегральна комп'ютерна мегасистема, яка поєднує бази екологічних даних, математичне ядро прогностичних алгоритмів та зручний, інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс для користувача. Головне гасло СПУР – перетворення складних наукових прогнозів на зрозумілу мову управлінських рішень та фінансових витрат.

Графічний інтерфейс реалізується через тривимірні або двовимірні інтерактивні карти території (ГІС-шари). Користувач (наприклад, керівник екологічного департаменту області) бачить на екрані карту регіону, розбиту на зони екологічного ризику, пофарбовані за принципом світлофора: зелений колір – стан безпечний, жовтий – є загроза погіршення якості, червоний – критичний стан, що вимагає негайного втручання.

Основою СПУР є блок сценарного моделювання «Що буде, якщо...?». Управлінець може за допомогою мишки віртуально «побудувати» на карті новий сміттєпереробний завод, «вирубати» ділянку лісу на Словечансько-Овруцькому кряжі або «ввести в експлуатацію» нові очисні споруди на хімічному комбінаті. Вшиті всередину СПУР прогностичні алгоритми (басейнові, атмосферні шлейфові чи сукцесійні) миттєво підхоплюють ці зміни, прораховують ланцюги нелінійних наслідків по всіх геосферах і через кілька хвилин видають на екран наочний просторовий прогноз майбутнього стану середовища через 5, 10 або 20 років.

Понад те, сучасна СПУР самостійно порівнює екологічні прогнози з економічними витратами. Вона прораховує сценарії та видає холістичну рекомендацію: «Реалізація Проекту А коштуватиме 10 мільйонів і знизить ризик забруднення річки на 15%. Реалізація Проекту Б коштуватиме 8 мільйонів, але завдяки відновленню заплавної лісу (природного біофільтра) знизить ризик забруднення річки на 45% і додатково захистить регіон від паводків». Таким чином, прогностичні алгоритми стають потужним інструментом екологізації економіки, переводячи природокористування з рейкових лінійного утилітаризму на засади сталого, стратегічно безпечного розвитку соціоекологічних систем.

Для закріплення теоретичного матеріалу розглянемо два детальні аналітичні кейси з реального досвіду проектування та практичного використання прогностичних алгоритмів у системному аналізі якості навколишнього середовища.

Кейс 1. Алгоритм прогнозування та пом'якшення наслідків повеней та пов'язаного з ними хімічного забруднення в річковому басейні

Контекст та проблема: Гірсько-рівнинна річка протікає через великий промисловий регіон. На її берегах розташовані хімічні заводи, звалища побутових відходів, тваринницькі комплекси та житлові масиви міст. Навесні, під час швидкого танення снігу або влітку в період екстремальних злив, річка виходить із берегів, затоплюючи ці об'єкти. Виникає подвійна екологічна катастрофа: по-перше, колосальні руйнування інфраструктури водою; по-друге, масштабне вторинне хімічне отруєння всього басейну, оскільки паводкові води змивають тисячі тонн хімікатів із затоплених заводів та звалищ і розносять їх по колосальній площі ґрунтів та підземних горизонтів.

Старе (неефективне) рішення: Влада діяла за констатуючим принципом. Рятувальні служби чекали, поки вода підніметься до критичних позначок на гідропостах, після чого починали екстрену евакуацію людей та закидання дамб мішками з піском у випадкових місцях. Прогнозування обмежувалося простими лінійними статистичними таблицями: «Якщо рівень води у верхів'ї піднявся на 1 метр, то через 2 дні в пониззі він підніметься приблизно на 80 сантиметрів». Синергетичні ефекти, прориви дамб та міграція хімічних плям забруднення взагалі не прораховувалися.

Системне рішення: Розробка та впровадження інтегрального прогностичного алгоритму: Для кардинального вирішення проблеми група системних аналітиків розробила комплексний комп'ютерний алгоритм прогнозування паводкової безпеки, інтегрований у ГІС-платформу регіону.

Архітектура алгоритму складалася з трьох взаємопов'язаних математичних ядер має такий вигляд. Гідрологічне ядро (алгоритм стоку): На основі радарних супутникових знімків оцінювало висоту та щільність снігового покриву в лісах та горах басейну. Отримуючи свіжий метеопрогноз температур та дощів, алгоритм прораховував швидкість танення снігу та крок за кроком моделював об'єми води, що стікатимуть по рельєфу в русла приток.

Гідродинамічне руслове ядро: Описувало рух хвилі паводку безпосередньо в руслах річок, враховуючи геометрію дна, наявність мостів, звужень та гребель. Алгоритм був просторово-распределеним і прораховував точні межі та глибину затоплення кожного квадратного метра заплави при різних об'ємах води.

Еко-геохімічне ядро (алгоритм міграції токсикантів): У пам'ять цього блоку були закладені точні координати та хімічний профіль усіх потенційно небезпечних об'єктів регіону (складів отрутохімікатів, кар'єрів, звалищ). Коли гідродинамічне ядро показувало, що вода затоплює територію конкретного звалища, геохімічне ядро вмикало прорахунок швидкості розчинення та вимивання токсикантів (наприклад, важких металів) у воду, моделюючи рух і розсіювання цієї отруйної плями вниз за течією та її просочування в прибережні водоносні горизонти.

Результат практичного застосування: Навесні 2025 року в регіоні склалися екстремальні погодні умови: різке потепління після сніжної зими, що супроводжувалося затяжними зливами. За 4 доби до початку реального підйому води прогностичний алгоритм, прорахувавши стохастичні сценарії Монте-Карло, видав чітке просторове попередження: «Через 96 годин очікується історичний паводок. З імовірністю 87% прорве стару дамбу в секторі №4. Вода затопить територію недіючого хімічного заводу, що призведе до вимивання хрому та кадмію і формування токсичної плями, яка досягне водозабору питної води міста через 120 годин».

Отримавши такий точний, завчасний та детальний системний прогноз, екологічні та аварійні служби провели блискучу випереджальну операцію:

Рятувальники заздалегідь спрямували техніку в сектор №4 і за дві доби капітально укріпили саме ту ділянку дамби, яку вказав алгоритм, повністю запобігши її прориву.

З території хімічного заводу в екстреному порядку було вивезено залишки найбільш небезпечних бочок із хімікатами, що знаходилися в низинних цехах.

Водоканал міста заздалегідь підготував та завіз додаткові об'єми специфічних сорбентів (активованого вугілля) для систем фільтрації, перевівши роботу станцій у режим підвищеної безпеки.

У результаті паводок пройшов без жодної людської жертви, а екосистемне отруєння басейну річки було повністю зупинено на етапі загрози. Економічний ефект від запобігання збиткам у сотні разів перевищив усі фінансові витрати на розробку та впровадження цього системного алгоритму.

Кейс 2. Алгоритм прогнозування sukcesії лісових екосистем Словечансько-Овруцького кряжу в умовах хронічних кліматичних посух

Контекст та проблема: Словечансько-Овруцький кряж є унікальним заповідним природним комплексом Центрального Полісся. Тут історично сформувалися високопродуктивні, біологічно багаті вологі сосново-дубові ліси з великою кількістю реліктових рослин. Проте за останні 15 років регіон зазнає потужного кліматичного пресингу: середньорічна температура стрімко зростає, рівень підземних вод падає, а літні посухи стають тривалими та екстремальними. У лісах кряжу почалося масове, хронічне всихання зрілих соснових насаджень. Постає завдання: спрогнозувати еволюцію якості лісу на 50 років наперед і розробити алгоритм оптимального лісовідновлення, який збереже стійкість екосистеми.

Старе (неефективне) рішення: Лісівники намагалися діяти за класичним лінійним шаблоном: на місці всихаючих і вирубаних сосняків вони знову масово висаджували рядами маленькі саджанці тієї ж самої сосни звичайної, вважаючи, що природа має повернутися до свого первісного стану. Результат виявився плачевним: через падіння рівня підземних вод та літню спеку приземного шару повітря приживаність саджанців упала до 20%. Молоді посадки масово гинули в перше ж літо, перетворюючи вирубки на пустки, які швидко заростали бур'янами та агресивними інвазійними кущами.

Системне рішення: Побудова sukcesійного прогностичного алгоритму: Науковці-екологи разом із системними аналітиками розробили просторово-розподілений sukcesійний алгоритм ландшафтного рівня, який враховував нелінійні зміни кліматичних факторів.

Математичне ядро алгоритму прораховувало конкуренцію та життєвий цикл дерев на кряжі в умовах трьох різних кліматичних сценаріїв: «Жорстке потепління», «Помірне потепління» та «Стабілізація». Вхідний вектор алгоритму містив детальні карти ґрунтів кряжу, глибини залягання водоносних горизонтів на різних схилах та фізіологічні матриці стійкості порід дерев.

Результати комп'ютерного моделювання на 50 років уперед зруйнували старі лісівницькі стереотипи, показавши нелінійний системний перехід:

Алгоритм довів, що через незворотне падіння рівня підземних вод та сухість повітря сосна звичайна на багатьох типах ґрунтів кряжу повністю втрачає свою пружну стійкість (резистентність). Спроби продовжувати висаджувати її монокультурою – це спалювання фінансових ресурсів у вогні майбутніх кліматичних посух; сосновий ліс тут більше ніколи не відновиться у своєму первісному вигляді.

Модель спрогнозувала, що природний вектор sukcesії в цих умовах спрямований на зміну домінантів: лісова система намагається трансформуватися з хвойної у більш стійку та пластичну листяну систему – сухі діброви та грабняки. Дуб черешчатий та береза бородавчаста мають набагато глибші кореневі системи і здатні витримувати нові кліматичні рамки.

Спираючись на цей прогностичний алгоритм, СПУР заповідника розробила принципово нову, революційну стратегію асистованого (керованого) лісовідновлення кряжу:

Лісівники повністю відмовилися від створення штучних монокультурних посадок сосни на посушливих схилах.

Алгоритм розрахував оптимальні просторові схеми створення змішаних полікультурних насаджень: маленькі сосни тепер висаджуються виключно вперемішку з дубом черешчатим, липою та ліщиною.

Роль листяних супутніх порід у цій новій структурі системи є екосистемно-захисною. Модель чітко показала: широке листя липи та дуба створює густу тінь над землею, перебиваючи сонячні промені і знижуючи температуру лісової підстилки влітку на 8-12 градусів. Цей

мікрокліматичний буфер знижує випаровування вологи з ґрунту і рятує ніжні поверхневі коріння молодих сосон від теплового шоку. Крім того, щільний намет листяних порід закриває доступ світла для сходів агресивного інвазійного дуба червоного, виступаючи як потужний внутрішній біологічний бар'єр системи проти рослинного вторгнення.

Завдяки практичному впровадженню рекомендацій прогностичного алгоритму, приживаність лісових культур на Словечансько-Овруцькому кряжі зросла з 20% до 85%. Нові змішані ліси, сформовані за системними закономірностями, демонструють колосальну пластичну стійкість до посух, успішно зберігаючи високу екологічну якість та біорізноманіття заповідного регіону в умовах мінливого світу.

Методологія і практика побудови прогностичних алгоритмів є вершиною наукового інструментарію системного аналізу якості навколишнього середовища. Перехід від хаотичного накопичення розрізаних екологічних даних до проектування інтелектуальних, імітаційних та статистичних моделей, здатних передбачати майбутнє – це єдиний науковий шлях до порятунку біосфери та забезпечення довгострокової безпеки людської цивілізації.

Природні та соціоекологічні системи є занадто складними та нелінійними об'єктами, щоб управляти ними навпомацки або за допомогою застарілих лінійних шаблонів. Спроби вирішувати екологічні проблеми без наявності прогностичного алгоритму завжди призводять до виникнення кумулятивних катастроф, запізнілих ефектів та активізації руйнівних позитивних зворотних зв'язків, які знищують гомеостаз та ємність середовища.

Якісний прогностичний алгоритм діє як інтелектуальний радар. Поєднуючи в собі глибокі екологічні знання холізму, точність фізико-теоретичних законів природи та міць сучасного машинного навчання, він дозволяє людині випередити час. Моделюючи тисячі альтернативних сценаріїв майбутнього у безпечному просторі комп'ютерної пам'яті, ми отримуємо унікальну можливість тверезо оцінювати екологічні ризики, знаходити приховані пороги стійкості природи і обирати ті стратегії розвитку, які не руйнують, а підтримують безкоштовні екосистемні послуги з самоочищення та регулювання геосфер. Інтеграція цих алгоритмів у просторові ГІС-інтерфейси та Системи Підтримки Ухвалення Рішень робить екологічні знання реальною керівною силою, здатною переформатувати промисловість, містобудування та лісове господарство на засадах гармонійного, збалансованого та сталого співіснування людського суспільства та живої системи нашої планети.

Питання та завдання для самоконтролю

Теоретичні запитання:

1. Що таке екологічне прогнозування з позицій системного аналізу та які основні етапи розробки прогностичних алгоритмів?
2. Які існують класифікації методів прогнозування якості довкілля за термінами випередження (коротко-, середньо- та довгострокові)?
3. Охарактеризуйте різницю між експертними (інтуїтивними) та формалізованими методами побудови екологічних прогнозів.
4. Як у прогностичних алгоритмах враховується чинник невизначеності вихідних екологічних даних та природної стохастичності?
5. Поясніть сутність методу екстраполяції трендів при прогнозуванні динаміки забруднення атмосферного повітря та назвіть його обмеження.
6. Як критерії автокореляції та стаціонарності часових рядів впливають на вибір алгоритму прогнозування екологічних показників?
7. Опишіть методологію побудови прогностичних алгоритмів на основі авторегресійних моделей (наприклад, ARIMA) для моніторингу водних екосистем.
8. Що таке багатофакторний регресійний аналіз і як будується алгоритм прогнозування стану довкілля за наявності кількох джерел техногенного впливу?

9. Поясніть принципи формування навчальної, валідаційної та тестової вибірок екологічних даних при розробці прогностичних алгоритмів машинного навчання.
10. Як алгоритми класифікації та регресії на основі дерев рішень (Decision Trees) та випадкового лісу (Random Forest) застосовуються для прогнозування екологічних ризиків?
11. Охарактеризуйте використання прогностичних алгоритмів на базі генетичних алгоритмів для оптимізації параметрів екологічних моделей.
12. Яким чином алгоритми на основі нечітких часових рядів (Fuzzy Time Series) дозволяють прогнозувати якість середовища за умов якісних або неточних описів?
13. У чому полягає сутність метрик оцінки якості прогностичних алгоритмів (наприклад, MSE, RMSE, MAE, MAPE) стосовно екологічних задач?
14. Як алгоритми адаптивного прогнозування (зокрема метод експоненціального згладжування) реагують на швидкі зміни в техногенному навантаженні?
15. Опишіть особливості побудови прогностичних алгоритмів для оцінки динаміки поширення інвазійних видів рослин під впливом кліматичних факторів.
16. Як при розробці прогностичних алгоритмів розв'язується проблема «прокляття розмірності» (великої кількості контрольованих параметрів довкілля)?
17. Поясніть роль та специфіку алгоритмів сценарного прогнозування (інструменти «що, якщо...») в управлінні якістю навколишнього середовища.
18. Що таке перенавчання (overfitting) прогностичного алгоритму і якими методами еколог-аналітик може його уникнути?
19. Як інтегруються прогностичні алгоритми з геоінформаційними системами (ГІС) для створення карт-прогнозів просторового розподілу токсикантів?
20. Які етичні та методологічні ризики пов'язані з автоматичним прийняттям управлінських екологічних рішень на основі результатів роботи прогностичних алгоритмів?

Тестові завдання

Як у методології прогнозування часових рядів називається екологічний показник, статистичні характеристики якого (середнє значення, дисперсія) не змінюються з часом?

- А) Трендовий часовий ряд
- Б) Стаціонарний часовий ряд
- В) Мультиплікативний процес
- Г) Нелінійний стохастичний тренд

Який метод прогнозування стану довкілля доцільно обрати, якщо аналітичний опис системи повністю відсутній, а історичні статистичні дані замінені суб'єктивними оцінками висококваліфікованих фахівців?

- А) Авторегресійне моделювання
- Б) Метод екстраполяції найменших квадратів
- В) Експертні (інтуїтивні) методи прогнозування
- Г) Алгоритми регресії дерев рішень

Прогнозування за допомогою математичних моделей класу ARIMA (авторегресія інтегрованого рухомого середнього) найчастіше застосовується для оцінки:

- А) Просторово-розподіленого вимивання ґрунтів
- Б) Динаміки екологічних показників у вигляді послідовних часових рядів
- В) Генетичних мутацій рослин в інвазійних вогнищах
- Г) Кумулятивного ефекту від раптового хімічного викиду

Для чого при розробці прогностичних алгоритмів на основі машинного навчання вихідний масив екологічних даних обов'язково розділяють на навчальну (training) та тестову (testing) вибірки?

- А) Для штучного збільшення об'єму зібраної інформації
- Б) Для навчання алгоритму на одних даних та незалежної перевірки його прогностичної точності на інших

В) Для автоматичного видалення помилок вимірювання екологічних приладів

Г) Для приведення всіх екологічних показників до єдиної розмірності

Як називається негативне явище в моделюванні, коли прогностичний алгоритм занадто підлаштувався під специфічні шуми навчальної вибірки, через що показує високу точність на навчальних даних, але повністю втрачає здатність до прогнозування на нових реальних показниках довкілля?

А) Перенавчання (overfitting)

Б) Недонавчання (underfitting)

В) Мультиколінеарність

Г) Автокореляція залишків

Сценарне прогнозування екологічних процесів (інструментарій «що, якщо...») розробляється аналітиками насамперед для:

А) Точного визначення дати настання конкретної екологічної катастрофи

Б) Оцінки можливих варіантів розвитку стану довкілля залежно від прийняття різних управлінських рішень

В) Спрощення структури прогностичного алгоритму до лінійного вигляду

Г) Повного виключення математичного апарату з процесу моделювання

Яка метрика найчастіше використовується для оцінки похибки прогностичного алгоритму та розраховується як корінь квадратний із середнього значення квадратів різниць між прогнозованими та фактичними параметрами якості середовища?

А) MAE (Середня абсолютна похибка)

Б) MAPE (Середня абсолютна відсоткова похибка)

В) RMSE (Середньоквадратична помилка)

Г) Коефіцієнт детермінації R-квадрат

Який алгоритм машинного навчання, що базується на ансамблі безлічі незалежних дерев рішень, ефективно застосовується для прогнозування складних нелінійних екологічних ризиків?

А) Проста лінійна регресія

Б) Випадковий ліс (Random Forest)

В) Метод експоненціального згладжування

Г) Алгоритм найближчих сусідів без навчання

У чому полягає суть проблеми «прокляття розмірності» при побудові прогностичних алгоритмів екологічного моніторингу?

А) У повній відсутності географічних координат пунктів спостереження

Б) У стрімкому зростанні вимог до обсягу даних та складності моделі при збільшенні кількості контрольованих факторів довкілля

В) У використанні застарілих одиниць вимірювання концентрації речовин

Г) У неможливості округлення розрахованих прогнозних значень

Поєднання прогностичних алгоритмів динаміки забруднювачів із геоінформаційними системами (ГІС) дає можливість аналітику:

А) Візуалізувати майбутні зміни екологічної ситуації у вигляді динамічних карт просторового розподілу

Б) Повністю відмовитися від комп'ютерних обчислень

В) Автоматично скасувати дію державних екологічних нормативів

Г) Зменшити кількість хімічних елементів у періодичній системі Менделєєва

Ситуаційні задачі

Студент-еколог розробляє алгоритм для прогнозування концентрації діоксиду сірки в атмосферному повітрі міста на основі багаторічних щоденних спостережень. Перед початком моделювання він помітив, що середнє значення та розмах коливань цього показника суттєво змінюються від року до року через закриття одних фабрик та відкриття інших. Охарактеризуйте

цей часовий ряд за критерієм стаціонарності та пояснить, які труднощі виникнуть при спробі застосувати класичні методи лінійної екстракції тренду без попередньої трансформації даних.

На території Центрального Полісся необхідно терміново оцінити ризики та спрогнозувати швидкість поширення інвазійного виду рослин – рейнутрії японської – у заплавах річок після масштабної повені. Оскільки детальний моніторинг цього виду раніше не проводився і статистична база даних повністю відсутня, аналітики вирішили залучити провідних ботаніків та екологів регіону для побудови прогнозу. До якої групи методів належить такий підхід, які його головні переваги та обмеження в умовах дефіциту часу та інформації?

Наукова група буде прогнозувати алгоритм для оцінки рівня кисню у воді озера, використовуючи математичні моделі класу авторегресії рухомого середнього. Під час аналізу вихідних даних з'ясувалося, що поточний стан екосистеми критично залежить від її параметрів у попередні дні, тижні та сезони. Пояснить, яке явище в аналізі часових рядів ілюструє ця залежність і чому неврахування внутрішньої пам'яті системи призведе до повної втрати точності прогнозу.

Для побудови прогностичного алгоритму машинного навчання, що оцінює якість підземних вод навколо хімічного полігону, дослідники зібрали великий масив даних. Перед запуском навчання вони розділили всю інформацію на дві нерівні частини: на більшій частині алгоритм підбирав внутрішні коефіцієнти, а на меншій – перевірялася його здатність видавати правильні результати на незнайомих об'єктах. Опишіть методологічний сенс такого розділення вибірки та пояснить, чому не можна тестувати якість прогнозу на тих самих даних, де алгоритм навчався.

Інженер-еколог створив складну нейромережеву модель для прогнозування появи смогу в мегаполісі. Під час тестування на архівних даних, які використовувалися для її налаштування, модель показала абсолютну точність і безпомилково вгадувала кожне коливання. Однак, коли модель спробували використати для прогнозу на наступний місяць у реальному часі, вона почала видавати хаотичні результати з величезними помилками. Яку класичну проблему методології побудови прогностичних алгоритмів ілюструє цей випадок і як її уникнути?

Регіональне міністерство екології замовляє розробку прогностичної системи для оцінки стану лісових масивів Словечансько-Овруцького кряжу в умовах глобальних кліматичних змін. Розробники пропонують створити кілька варіантів прогнозу: за умови збереження поточних тенденцій, за умови посилення засух та за умови впровадження активних лісотехнічних заходів підсіву стійких порід. Як у системному аналізі називається такий підхід до прогнозування та яка його роль у прийнятті стратегічних управлінських рішень?

Еколог-аналітик порівнює два алгоритми прогнозування середньодобової концентрації пилу в робочій зоні кар'єру. Для оцінки їхньої ефективності він використовує метрику, що обчислює корінь квадратний із середнього значення квадратів відхилень прогнозованих значень від фактичних, отриманих із датчиків. Пояснить, яку саме сторону похибки оцінює ця метрика та чому вона сильніше реагує на поодинокі великі промахи в прогнозі, ніж на часті, але дрібні неточності.

Команда дослідників розробляє систему раннього попередження про спалахи розмноження комах-шкідників лісу. Вони вирішили побудувати алгоритм на основі ансамблю дерев рішень, де кожне окреме дерево голосує за певну ймовірність екологічної загрози на основі температури, вологості та віку насаджень, а остаточний прогноз формується як усереднений результат усього «лісу». Який сучасний метод машинного навчання реалізовано в цьому алгоритмі та в чому його перевага при аналізі нелінійних природних процесів?

Під час розробки алгоритму прогнозування якості поверхневих вод для великого річкового басейну науковці намагалися врахувати абсолютно всі можливі фактори: від хімічного складу опадів та швидкості течії до щільності населення в кожному селі та поголів'я худоби. У результаті алгоритм став настільки громіздким, що комп'ютерні потужності перестали справлятися з обчисленнями, а точність прогнозу впала через накопичення дрібних помилок у другорядних параметрах. Яку методологічну проблему, відому як «прокляття розмірності», ілюструє ця ситуація і як виконати оптимізацію моделі?

Муніципальна екологічна служба інтегрувала прогностичний алгоритм поширення вихлопних газів транспорту з цифровою картою міста. Тепер система здатна не просто видавати

графік майбутніх концентрацій речовин, а й візуально відобразити кольором зони найбільшого екологічного ризику на кожній вулиці залежно від часу доби та напрямку вітру. Опишіть переваги інтеграції прогностичних алгоритмів із геоінформаційними системами (ГІС) для практичного управління якістю навколишнього середовища.

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Тема 1. Система і її характеристики

Яке з наведених визначень найкраще описує поняття «система»?

- а) Будь-яка випадкова сукупність об'єктів або явищ навколишнього світу
- б) Сукупність взаємопов'язаних елементів, що утворюють єдине ціле і взаємодіють для досягнення певної мети

- в) Відокремлена частина матеріального світу, яка не піддається зовнішнім впливам
- г) Проста сума елементів, властивості якої дорівнюють сумі властивостей її складових

Як називається властивість системи, за якої її загальні властивості не зводяться до простої суми властивостей окремих елементів?

- а) Емерджентність
- б) Гомеостаз
- в) Дивергенція
- г) Структурованість

Елементи, які не належать до самої системи, але взаємодіють із нею, утворюють:

- а) Внутрішню структуру системи
- б) Підсистему нижчого рівня
- в) Навколишнє середовище (довкілля)
- г) Закриту термодинамічну зону

Яка характеристика визначає спосіб організації, характер та конфігурацію зв'язків між елементами системи?

- а) Функція
- б) Структура
- в) Межа
- г) Стан

Системи, які вільно обмінюються речовиною, енергією та інформацією з навколишнім середовищем, називаються:

- а) Ізольованими
- б) Закритими
- в) Відкритими
- г) Статичними

Що таке «гомеостаз» системи?

- а) Здатність системи переходити у хаотичний стан під впливом зовнішніх чинників
- б) Процес повного оновлення всіх елементів системи без збереження зв'язків
- в) Здатність системи підтримувати відносну стабільність своїх параметрів і функцій при змінах у довкіллі
- г) Спрямований розвиток системи від простих форм до більш складних

Зв'язок, за якого вихідний сигнал системи або її елемента впливає на вхідний сигнал, змінюючи характер подальшої роботи системи, називається:

- а) Прямим зв'язком
- б) Зворотним зв'язком
- в) Лінійним зв'язком
- г) Зовнішнім зв'язком

Який тип зворотного зв'язку зазвичай діє в системах для стабілізації їхнього стану та придушення відхилень?

- а) Позитивний зворотний зв'язок
- б) Негативний зворотний зв'язок
- в) Нейтральний зворотний зв'язок
- г) Односпрямований зворотний зв'язок

Якщо система складається з кількох частин, кожна з яких сама по собі є системою меншого масштабу, то такі частини називають:

- а) Надсистемами
- б) Елементарними частинками
- в) Підсистемами
- г) Автономними факторами

Яка характеристика описує поведінку системи та її спрямованість на виконання певного завдання або отримання результату?

- а) Об'єм системи
- б) Функція системи
- в) Ентропія системи
- г) Складність системи

Яка властивість екологічної системи відображає появу нових інтегративних якостей на рівні цілого, що відсутні у її окремих компонентів?

- А) Адаптивність
- Б) Емерджентність
- В) Гомеостаз
- Г) Ієрархічність

До якого класу систем за характером взаємодії з навколишнім середовищем належать усі природні екосистеми?

- А) Закриті системи
- Б) Ізольовані системи
- В) Відкриті системи
- Г) Статичні системи

Як у системному аналізі якості докільця називається здатність системи повертатися до стану динамічної рівноваги після зовнішнього антропогенного впливу?

- А) Синергізм
- Б) Стійкість системи
- В) Структурованість
- Г) Еволюційність

Що відбувається в екологічній системі, якщо в ній починає домінувати позитивний зворотний зв'язок після скидання забруднюючих речовин?

- А) Система стабілізує свій якісний стан
- Б) Посилюються процеси самоочищення середовища
- В) Відбувається стрімке відхилення від рівноваги та деградація системи
- Г) Система переходить у стан ізоляції

Яка характеристика визначає сукупність стійких зв'язків та взаємодій між елементами екологічної системи, що забезпечують її цілісність?

- А) Функція системи
- Б) Стан системи
- В) Поведінка системи
- Г) Структура системи

Як називається явище, коли сумарний токсичний ефект від одночасної дії кількох забруднювачів перевищує просту суму їхніх індивідуальних впливів?

- А) Гомеостаз
- Б) Синергетичний ефект
- В) Диференціація
- Г) Адитивність

Яка властивість екосистеми забезпечує її здатність підтримувати стабільність своїх внутрішніх параметрів (наприклад, хімічного складу води чи повітря) через внутрішні регуляторні механізми?

- А) Гомеостаз
- Б) Ієрархічність
- В) Нелінійність

Г) Емерджентність

Що є «входом» у системі моніторингу якості навколишнього середовища з погляду теорії систем?

А) Екологічні стандарти та нормативи (ГДК)

Б) Первинні дані вимірювань концентрацій забруднюючих речовин

В) Прогнозні моделі розвитку екологічної ситуації

Г) Управлінські рішення щодо обмеження викидів підприємств

Яка системна характеристика описує граничну здатність екосистеми витримувати антропогенне навантаження без незворотного порушення її структури та функцій?

А) Еволюційність середовища

Б) Пропускна спроможність (ємність) середовища

В) Дискретність системи

Г) Невизначеність системи

Розрахунок індексів якості води на основі спостережень за багатьма гідрохімічними показниками є прикладом реалізації якого системного принципу?

А) Декомпозиції системи

Б) Агрегування інформації

В) Ізоляції підсистем

Г) Випадкового пошуку

Тема 2. Холічний підхід до вивчення складних систем

Що є головним гаслом або фундаментальним принципом холізму (цілісності)?

а) Елементи системи завжди важливіші за саму систему

б) Ціле є більшим, ніж проста сума його частин

в) Будь-яку складну систему можна вивчити, розібравши її на найдрібніші деталі

г) Властивості системи залежать виключно від зовнішнього середовища

Який підхід до пізнання протиставляється холізму, намагаючись пояснити складні явища через властивості їхніх найпростіших компонентів?

а) Редукціонізм

б) Синергетика

в) Інтегралізм

г) Феноменологія

З погляду холічного підходу, дослідження живого організму виключно на рівні окремих хімічних молекул є:

а) Цілком достатнім для розуміння всіх життєвих процесів

б) Необхідним, але недостатнім, оскільки втрачаються системні якості організму

в) Помилковим методом, який взагалі не має наукової цінності

г) Єдиним можливим способом об'єктивного аналізу

Хто вважається автором терміна «холізм» та одним із перших дослідників, які сформулювали його філософські засади в ХХ столітті?

а) Людвіг фон Берталанфі

б) Ян Смутс

в) Норберт Вінер

г) Ілля Пригожин

Що відбувається з емерджентними властивостями складної системи під час її механічного розділення на окремі частини?

а) Вони зберігаються в кожній окремій частині

б) Вони зникають, оскільки руйнуються системні зв'язки

в) Вони підсилюються та стають більш вираженими

г) Вони трансформуються у фізичні константи елементів

Яка наука, що вивчає процеси самоорганізації у складних системах, тісно пов'язана з холічним підходом?

а) Синергетика

- б) Класична механіка
- в) Описова географія
- г) Лінійна алгебра

Холічний підхід у медицині (так звана холістична медицина) передбачає:

- а) Лікування виключно одного конкретного органу, де виявлено симптоми хвороби
- б) Лікування всього організму пацієнта з урахуванням його психічного, соціального та

екологічного стану

- в) Використання лише хімічно синтезованих лікарських засобів вузької дії
- г) Відмову від будь-яких діагностичних процедур на користь інтуїції

Яке поняття описує ситуацію, коли незначна зміна в одній частині складної системи через мережу взаємозв'язків призводить до масштабних наслідків усій системі?

- а) Ефект метелика
- б) Закон збереження енергії
- в) Принцип редукції
- г) Механічний детермінізм

Дослідження екосистеми з позицій холізму вимагає насамперед вивчення:

- а) Морфологічних ознак окремого виду рослин або тварин
- б) Хімічного складу поодиноких мінералів у ґрунті
- в) Кругообігу речовин, потоків енергії та трофічних зв'язків між усіма компонентами
- г) Тільки кліматичних показників регіону поза зв'язком із біотою

Що є основним обмеженням редукціоністського підходу порівняно з холічним підходом при аналізі складних систем?

- а) Висока вартість проведення експериментів
- б) Неможливість використання математичного апарату
- в) Ігнорування взаємозв'язків між елементами та контексту існування системи
- г) Надмірна увага до емерджентних властивостей

Яке головне філософсько-методологічне гасло найкраще описує сутність холічного підходу в системному аналізі?

- А) Частина завжди важливіша за ціле
- Б) Ціле є більшим, ніж проста сума його частин
- В) Будь-яку складну систему можна звести до набору простих хімічних реакцій
- Г) Взаємозв'язки між елементами не впливають на властивості системи

Який підхід до дослідження довкілля є протилежним (антагоністичним) до холістичного?

- А) Синергетичний
- Б) Екоцентричний
- В) Редукціоністський
- Г) Інтегральний

З погляду холізму, чому неможливо повністю спрогнозувати якість річкової води, вивчаючи токсичність кожної забруднюючої речовини окремо в лабораторії?

- А) Через неможливість точного вимірювання концентрацій
- Б) Через прояв емерджентних властивостей та синергетичних ефектів у реальній екосистемі
- В) Через постійну зміну об'єму річкового стоку
- Г) Через відсутність стандартизованих методик аналізу

Як холічний підхід розглядає співвідношення між цілою екосистемою та її окремими компонентами?

- А) Компоненти системи мають досліджуватися як повністю ізольовані об'єкти
- Б) Властивості цілого визначаються виключно механічним додаванням властивостей компонентів

- В) Ціле передує своїм частинам і визначає їхні функції та поведінку в системі
- Г) Стан цілої системи не залежить від змін у її структурі

Яка екологічна концепція ХХ століття, що розглядає Землю як єдиний саморегульований суперорганізм, є яскравим прикладом радикального холізму?

- А) Концепція екологічної ніші
- Б) Гіпотеза Гайї (Джеймса Лавлока)
- В) Теорія екологічного переходу
- Г) Закон мінімуму Лібіха

Що є головною перевагою застосування холістичного підходу при оцінці антропогенного впливу на навколишнє середовище?

- А) Можливість врахувати кумулятивні, запізнілі та приховані системні ефекти
- Б) Спрощення математичних розрахунків у моделях
- В) Можливість відмовитися від інструментального моніторингу довкілля
- Г) Зведення екологічного аналізу до вивчення лише одного базового показника

У чому полягає сутність «холістичного парадоксу» в системних дослідженнях якості довкілля?

- А) Екосистема одночасно є і відкритою, і повністю закритою для речовини
- Б) Для розуміння цілого потрібно знати його частини, але для розуміння частин необхідно вже знати властивості цілого
- В) Збільшення кількості інформації про систему призводить до повного зникнення зв'язків між елементами
- Г) Антропогенне навантаження одночасно підвищує і знижує біопродуктивність

Який тип мислення та організації досліджень є обов'язковим для реалізації холістичного аналізу складних соціоекологічних систем?

- А) Вузькоспеціалізований (монодисциплінарний)
- Б) Міждисциплінарний та трансдисциплінарний
- В) Суто теоретичний без залучення емпіричних даних
- Г) Спонтанний (інтуїтивний)

Як у рамках холістичної методології трактується поняття «організація системи»?

- А) Юридичний статус підприємства, що забруднює довкілля
- Б) Спосіб і характер взаємодії між елементами, що підтримує цілісність системи
- В) Проста кількість живих організмів на одиницю площі
- Г) Процес видалення пошкоджених компонентів з екосистеми

Який світоглядний принцип логічно впливає з холістичного підходу до аналізу системи «людина – техніка – довкілля»?

- А) Антропоцентризм (людина як господар природи)
- Б) Екоцентризм (людина як рівноправна частина єдиної біосфери)
- В) Технократизм (технології спроможні повністю замінити природні системи)
- Г) Споживацький підхід до природних ресурсів

Тема 3. Довкілля як система

Навколишнє середовище (довкілля) з погляду системного аналізу розглядається як:

- а) Сукупність природних умов, які існують незалежно одна від одної
- б) Складна, динамічна, відкрита система, що поєднує природні, антропогенні та соціальні компоненти
- в) Статичний простір, який слугує лише джерелом ресурсів для людини
- г) Закрита термодинамічна система, що не зазнає жодних зовнішніх змін

Яка оболонка Землі, що охоплює нижню частину атмосфери, всю гідросферу та верхню частину літосфери, є глобальною екологічною системою?

- а) Ноосфера
- б) Біосфера
- в) Магнітосфера
- г) Тропосфера

Компоненти довкілля, що мають неживу природу (світло, температура, вода, повітря), називаються:

- а) Біотичними факторами
- б) Антропогенними факторами

в) Абіотичними факторами

г) Едафічними факторами

Що є головним джерелом енергії, яке забезпечує функціонування довкілля як глобальної системи?

а) Внутрішнє тепло земного ядра (геотермальна енергія)

б) Енергія сонячного випромінювання

в) Енергія припливів і відпливів

г) Спалювання викопного палива людством

Який процес у довкіллі забезпечує багаторазове використання хімічних елементів (Кислорода, Карбону, Нітрогену тощо) і підтримує стабільність біосфери?

а) Екологічний моніторинг

б) Біогеохімічний кругообіг речовин

в) Антропогенна сукцесія

г) Радіаційний баланс

Здатність природного середовища витримувати антропогенне навантаження без порушення своїх основних системних функцій та самовідновлюватися називається:

а) Екологічною ємністю (або стійкістю) системи

б) Екологічною катастрофою

в) Екологічним слідом

г) Природною деградацією

Що є прикладом позитивного зворотного зв'язку в системі довкілля, який посилює зміни та може призвести до нестабільності?

а) Збільшення чисельності хижаків при зростанні кількості жертв, що згодом зменшує кількість жертв

б) Танення полярного льоду через потепління, що знижує альбедо (відбивну здатність) Землі та викликає ще більше потепління

в) Посилення випаровування води, що веде до утворення густих хмар, які відбивають сонячне світло і охолоджують поверхню

г) Поглинання надлишку вуглекислого газу океаном без зміни його хімічних властивостей

Як називається стан взаємодії суспільства та природи, за якого людство задовольняє свої потреби, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти свої потреби?

а) Індустріалізація

б) Сталий (стабільний) розвиток

в) Техногенез

г) Екологічний ексцентризм

Будь-які зміни в структурі чи функціонуванні довкілля, спричинені діяльністю людини, класифікуються як:

а) Еволюційні чинники

б) Антропогенні зміни

в) Космічні впливи

г) Геологічні процеси

Порушення динамічної рівноваги в природній системі під впливом надмірних навантажень, що призводить до її руйнування або до якісної перебудови, називається:

а) Екологічною кризою або катастрофою

б) Кліматичним оптимумом

в) Природною адаптацією

г) Сукцесійною зрілістю

Який фундаментальний системний процес у довкіллі забезпечує безперервне повторне використання хімічних елементів та стабільність якісного стану біосфери?

А) Техногенез

Б) Кругообіг речовин (біогеохімічні цикли)

В) Екологічна сукцесія

Г) Акумуляція токсикантів

Як називається соціоприродна мегасистема, що інтегрує в собі природне середовище, людське суспільство та створену ним технічну інфраструктуру?

А) Біогеоценоз

Б) Урбоекосистема

В) Соціоекологічна система

Г) Фітоценоз

Згідно з яким системним законом довкілля, будь-яка зміна в одному з компонентів природного середовища неминуче призводить до розвитку компенсуючих або деструктивних реакцій в інших його частинах?

А) Закон внутрішньої динамічної рівноваги

Б) Закон мінімуму Лібіха

В) Закон оптимальності

Г) Закон толерантності Шелфорда

Що є основним термодинамічним показником деградації та дезорганізації довкілля як системи під впливом надмірного антропогенного тиску?

А) Зростання біомаси

Б) Зниження концентрації вуглекислого газу

В) Зростання ентропії системи

Г) Збільшення енергетичного виходу

Як у системному аналізі називається просторово-часова неоднорідність компонентів довкілля, яку необхідно враховувати при проектуванні мереж екологічного моніторингу?

А) Гетерогенність середовища

Б) Ізоляція підсистем

В) Стаціонарність системи

Г) Гомогенність середовища

Яка системна характеристика довкілля відображає його спроможність засвоювати, нейтралізувати або виводити забруднюючі речовини без зміни своєї базової структури?

А) Інформаційна ємність

Б) Асиміляційна ємність (пропускна спроможність) середовища

В) Еволюційна пластичність

Г) Емерджентність біоти

Що є головним наслідком явища екологічної декомпозиції в природних системах під дією хімічного чи фізичного забруднення?

А) Поява нових корисних зв'язків між видами

Б) Руїнування функціональних зв'язків між компонентами та розпад цілісності системи

В) Швидке зростання стійкості екосистеми до зовнішніх чинників

Г) Повне припинення дії сили тяжіння всередині ландшафту

Концепція біотичної регуляції навколишнього середовища стверджує, що стабільність клімату та хімічних параметрів планети підтримується завдяки:

А) Виключно геологічним та вулканічним процесам

Б) Керуючій та стабілізуючій функції сукупності живих організмів (біоти)

В) Космічному випромінюванню

Г) Штучним інженерним спорудам людства

Який індикатор використовується в системному аналізі для кількісного виміру сукупного тиску людства на довкілля, вираженого в площі продуктивної території, необхідної для забезпечення ресурсами та асиміляції відходів?

А) Коефіцієнт зволоження

Б) Екологічний слід (Ecological Footprint)

В) Індекс біорозформатингноманіття Шеннона

Г) Бонітет ґрунту

Стан «рухомої рівноваги» довкілля, за якого його загальні інтегральні макропараметри залишаються сталими попри постійний потік речовини та енергії через межі системи, називається:

- А) Статичним спокоєм
- Б) Квазістаціонарним (динамічно рівноважним) станом
- В) Термодинамічним хаосом
- Г) Абсолютною ізоляцією

Правильна відповідь: Б

Тема 4. Моделювання природних систем

Що таке моделювання природних систем?

а) Процес точного і повного копіювання природного об'єкта в його реальних масштабах
б) Метод дослідження об'єктів або явищ шляхом побудови та вивчення їхніх спрощених аналогів (моделей)

в) Опис природи виключно за допомогою художніх засобів та літературних метафор

г) Збір статистичних даних без їхнього подальшого аналізу та узагальнення

Чому при моделюванні природних систем завжди створюється спрощений образ реальності, а не повна копія?

а) Через відсутність достатньо потужних комп'ютерів у сучасній науці

б) Оскільки природні системи надто складні й містять нескінченну кількість зв'язків, які неможливо врахувати одночасно

в) Для того, щоб модель була менш точною і легше підганялася під теорію

г) Спрощення є вимогою нормативно-правових актів у сфері екології

Моделі, які описують природну систему за допомогою математичних рівнянь, формул та логічних відношень, належать до типу:

а) Фізичних (матеріальних) моделей

б) Концептуальних моделей

в) Математичних (комп'ютерних) моделей

г) Графічних моделей

Як називається модель природного процесу, яка враховує фактор часу і дозволяє спостерігати за змінами стану системи в динаміці?

а) Статична модель

б) Динамічна модель

в) Стохастична модель

г) Семіотична модель

Якщо модель природної системи базується на чітких причинно-наслідкових зв'язках і для однакових вхідних даних завжди дає однаковий результат, вона є:

а) Детермінованою

б) Імовірнісною (стохастичною)

в) Евристичною

г) Емпіричною

Створення зменшеного лабораторного макета річки чи водосховища для дослідження процесів ерозії берегів є прикладом:

а) Математичного моделювання

б) Концептуального проектування

в) Фізичного (натурного) моделювання

г) Чисельного експерименту

Що є першим і базовим етапом у процесі побудови будь-якої моделі природної системи?

а) Написання програмного коду для комп'ютера

б) Формулювання концептуальної моделі (визначення мети, елементів та зв'язків)

в) Перевірка моделі на адекватність реальним даним

г) Проведення прогнозних розрахунків

Як називається перевірка відповідності побудованої моделі реальній природній системі за допомогою порівняння результатів моделювання з фактичними спостереженнями?

- а) Ідентифікація
- б) Верифікація (валідація)
- в) Агрегація
- г) Декомпозиція

Для чого найчастіше використовують імітаційне моделювання екосистем?

- а) Для безпосереднього керування погодними умовами в реальному часі
- б) Для прогнозування поведінки екосистеми за різних сценаріїв людського впливу чи

кліматичних змін

- в) Для повної заміни польових досліджень кабінетними розрахунками
- г) Для класифікації нових видів живих організмів

Яка помилка моделювання виникає через неправильне розуміння теоретичних закономірностей функціонування природної системи?

- а) Помилка округлення при обчисленнях
- б) Помилка вимірювання приладів
- в) Концептуальна помилка моделі
- г) Помилка введення даних

Як у системному аналізі називається процес перевірки відповідності побудованої математичної моделі реальному екологічному об'єкту або процесу за допомогою незалежних експериментальних даних?

- А) Верифікація
- Б) Валідація (оцінка адекватності)
- В) Декомпозиція
- Г) Агрегування

Які моделі природних систем обов'язково враховують випадкові чинники, ймовірнісні розподіли та стохастичну природу екологічних процесів?

- А) Детерміновані моделі
- Б) Статичні моделі
- В) Стохастичні моделі
- Г) Лінійні аналітичні моделі

Перенесення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, яке зумовлене виключно упорядкованим горизонтальним рухом повітряних мас (вітром), описується за допомогою моделі:

- А) Моделі адвекції
- Б) Моделі молекулярної дифузії
- В) Моделі Стрітера-Фелпса
- Г) Балансової моделі біоти

Для моделювання яких процесів у річкових екосистемах традиційно застосовується класична двокритеріальна модель Стрітера-Фелпса?

- А) Поширення радіонуклідів у донних відкладах
- Б) Динаміки біохімічного споживання кисню (БСК) та розчиненого кисню
- В) іграції важких металів по трофічних ланцюгах
- Г) Процесів ерозії берегової лінії

Який метод моделювання екологічних систем базується на багаторазовому чисельному моделюванні з використанням випадкових величин для оцінки ризиків та невизначеностей?

- А) Метод нечіткої логіки
- Б) Метод штучних нейронних мереж
- В) Метод Монте-Карло
- Г) Метод аналітичної екстраполяції

Який інструмент інтелектуального моделювання найкраще використовувати для прогнозування якості довкілля за наявності великих масивів даних, але за повної відсутності точних аналітичних формул чи фізичних законів зв'язку між параметрами?

- А) Рівняння матеріального балансу
- Б) Штучні нейронні мережі (ШНМ)

В) Концептуальні матричні моделі

Г) Лінійне програмування

Інтеграція математичних моделей просторового поширення токсикантів із геоінформаційними системами (ГІС) дозволяє створювати:

А) Текстові реферативні звіти

Б) Цифрові прогностичні карти-схеми забруднення

В) Стаціонарні таблиці нормативів ГДК

Г) Тільки експертні опитувальні листи

Якщо екологічна модель оперує якісними лінгвістичними змінними (наприклад: «високий рівень забруднення», «помірна стійкість»), то математичним апаратом для її побудови є:

А) Диференціальні рівняння вищих порядків

Б) Нечітка логіка (Fuzzy Logic)

В) Теорія ймовірностей часових рядів

Г) Матрична алгебра Леслі

Як у теорії моделювання складних нелінійних систем називається висока чутливість прогностичних моделей до найменших змін початкових умов, що робить довгостроковий екологічний прогноз неможливим?

А) Ефект синергізму

Б) Закон оптимуму

В) Ефект метелика (детермінований хаос)

Г) Принцип емерджентності

Робота з якою моделлю полягає у дослідженні балансу речовини чи енергії на «вході» та «виході» системи, без детального математичного опису складних внутрішніх біохімічних процесів самого об'єкта (принцип «чорної скриньки»)?

А) Імітаційна динамічна модель

Б) Модель матеріального балансу

В) Просторово-розподілена тривимірна модель

Г) Нейромережева модель класифікації

Тема 5. Методологія і практика побудови прогностичних алгоритмів

Що таке прогностичний алгоритм у контексті системних досліджень?

а) Набір інструкцій для випадкового вибору варіантів розвитку подій

б) Чітка послідовність математичних і логічних операцій, що дозволяє на основі вхідних даних розрахувати майбутній стан системи

в) Опис минулих станів системи без спроб зазирнути в майбутнє

г) Програма, яка автоматично виправляє помилки у роботі природної системи

Який метод прогнозування базується на поширенні тенденцій, виявлених у минулому та сьогодні, на майбутній період?

а) Екстраполяція

б) Експертне оцінювання

в) Інтуїтивне передбачення

г) Дедуктивне виведення

Сукупність відомостей про поведінку системи у минулому, яка використовується для розробки та навчання прогностичного алгоритму, називається:

а) Прогнозним фоном

б) Ретроспективною інформацією (історичними даними)

в) Цільовою функцією

г) Керуючим впливом

Як називається етап налаштування параметрів прогностичного алгоритму, під час якого мінімізується похибка між розрахованими та реальними історичними даними?

а) Навчання (або калібрування) алгоритму

б) Тестування надійності

в) Формалізація задачі

г) Візуалізація результатів

Який підхід до побудови прогностичних алгоритмів базується на використанні штучних нейронних мереж та аналізі великих масивів даних (Big Data)?

- а) Класичний аналітичний підхід
- б) Машинне навчання (Machine Learning)
- в) Метод експертних панелей (Дельфі)
- г) Номографічний метод

Часовий інтервал, на який розробляється прогноз (наприклад, доба, місяць, рік, десятиліття), має назву:

- а) Період попередження (горизонт прогнозування)
- б) Крок дискретизації
- в) Час запізнення сигналу
- г) Тривалість ретроспекції

Яка похибка прогнозу виникає внаслідок того, що в алгоритмі не враховано раптові випадкові збурення або форс-мажорні фактори довкілля?

- а) Систематична похибка
- б) Стохастична (випадкова) похибка
- в) Інструментальна похибка
- г) Обчислювальна похибка

Якщо прогностичний алгоритм показує відмінні результати на даних, на яких він навчався, але дає дуже велику помилку на нових даних, це явище називається:

- а) Перенавчанням (overfitting)
- б) Недонавчанням (underfitting)
- в) Оптимізацією алгоритму
- г) Конвергенцією моделі

Метод прогнозування, що полягає в опитуванні незалежної групи експертів у кілька турів із анонімним обговоренням результатів для досягнення консенсусу, називається:

- а) Методом Монте-Карло
- б) Методом Дельфі
- в) Методом найменших квадратів
- г) Сценарним аналізом

Для чого під час оцінювання якості прогностичного алгоритму використовують метрики RMSE (середньоквадратична помилка) або MAE (середня абсолютна помилка)?

- а) Для визначення швидкості роботи комп'ютерної програми
- б) Для кількісного вимірювання точності прогнозу та порівняння різних алгоритмів
- в) Для автоматичного виправлення вхідних даних алгоритму
- г) Для графічного відображення структури системи

Як у методології прогнозування часових рядів називається екологічний показник, статистичні характеристики якого (середнє значення, дисперсія) не змінюються з часом?

- А) Трендовий часовий ряд
- Б) Стаціонарний часовий ряд
- В) Мультиплікативний процес
- Г) Нелінійний стохастичний тренд

Який метод прогнозування стану довкілля доцільно обрати, якщо аналітичний опис системи повністю відсутній, а історичні статистичні дані замінені суб'єктивними оцінками висококваліфікованих фахівців?

- А) Авторегресійне моделювання
- Б) Метод екстраполяції найменших квадратів
- В) Експертні (інтуїтивні) методи прогнозування
- Г) Алгоритми регресії дерев рішень

Прогнозування за допомогою математичних моделей класу ARIMA (авторегресія інтегрованого рухомого середнього) найчастіше застосовується для оцінки:

- А) Просторово-розподіленого вимивання ґрунтів
- Б) Динаміки екологічних показників у вигляді послідовних часових рядів
- В) Генетичних мутацій рослин в інвазійних вогнищах
- Г) Кумулятивного ефекту від раптового хімічного викиду

Для чого при розробці прогностичних алгоритмів на основі машинного навчання вихідний масив екологічних даних обов'язково розділяють на навчальну (training) та тестову (testing) вибірки?

- А) Для штучного збільшення об'єму зібраної інформації
- Б) Для навчання алгоритму на одних даних та незалежної перевірки його прогностичної точності на інших
- В) Для автоматичного видалення помилок вимірювання екологічних приладів
- Г) Для приведення всіх екологічних показників до єдиної розмірності

Як називається негативне явище в моделюванні, коли прогностичний алгоритм занадто підлаштувався під специфічні шуми навчальної вибірки, через що показує високу точність на навчальних даних, але повністю втрачає здатність до прогнозування на нових реальних показниках довкілля?

- А) Перенавчання (overfitting)
- Б) Недонавчання (underfitting)
- В) Мультиколінеарність
- Г) Автокореляція залишків

Сценарне прогнозування екологічних процесів (інструментарій «що, якщо...») розробляється аналітиками насамперед для:

- А) Точного визначення дати настання конкретної екологічної катастрофи
- Б) Оцінки можливих варіантів розвитку стану довкілля залежно від прийняття різних управлінських рішень
- В) Спрощення структури прогностичного алгоритму до лінійного вигляду
- Г) Повного виключення математичного апарату з процесу моделювання

Яка метрика найчастіше використовується для оцінки похибки прогностичного алгоритму та розраховується як корінь квадратний із середнього значення квадратів різниць між прогнозованими та фактичними параметрами якості середовища?

- А) MAE (Середня абсолютна похибка)
- Б) MAPE (Середня абсолютна відсоткова похибка)
- В) RMSE (Середньоквадратична помилка)
- Г) Коефіцієнт детермінації R-квадрат

Який алгоритм машинного навчання, що базується на ансамблі безлічі незалежних дерев рішень, ефективно застосовується для прогнозування складних нелінійних екологічних ризиків?

- А) Проста лінійна регресія
- Б) Випадковий ліс (Random Forest)
- В) Метод експоненціального згладжування
- Г) Алгоритм найближчих сусідів без навчання

У чому полягає суть проблеми «прокляття розмірності» при побудові прогностичних алгоритмів екологічного моніторингу?

- А) У повній відсутності географічних координат пунктів спостереження
- Б) У стрімкому зростанні вимог до обсягу даних та складності моделі при збільшенні кількості контрольованих факторів довкілля
- В) У використанні застарілих одиниць вимірювання концентрації речовин
- Г) У неможливості округлення розрахованих прогнозних значень

Поєднання прогностичних алгоритмів динаміки забруднювачів із геоінформаційними системами (ГІС) дає можливість аналітику:

- А) Візуалізувати майбутні зміни екологічної ситуації у вигляді динамічних карт просторового розподілу
- Б) Повністю відмовитися від комп'ютерних обчислень
- В) Автоматично скасувати дію державних екологічних нормативів
- Г) Зменшити кількість хімічних елементів у періодичній системі Менделєєва

СИТУАТИВНІ ЗАДАЧІ

Тема 1. Система і її характеристики

Задача 1 (Емерджентність та компоненти). Під час дослідження впливу промислових стічних вод на річкову екосистему лаборанти окремо проаналізували токсичність чистого кадмію, концентрацію фосфатів та рівень рН води. Проте після скидання цих речовин у річку реальний рівень деградації біоти (масовий замор риби) виявився значно вищим, ніж прогнозована сума окремих шкідливих ефектів.

Завдання: Поясніть це явище з позицій системного аналізу. Яку базову властивість системи не було враховано при ізольованому аналізі компонентів? Опишіть, як взаємодія елементів створює нову системну якість.

Задача 2 (Зворотні зв'язки у стабілізації). У лісовому заказнику внаслідок незаконного полювання різко скоротилася популяція вовка (верхівкового хижака). Протягом перших двох років спостерігалось стрімке зростання чисельності козуль, що призвело до майже повного знищення підросту головних лісоутворюючих порід. На третій рік серед козуль спалахнула епізоотія, і їхня чисельність упала нижче початкового рівня.

Завдання: Визначте типи зворотних зв'язків (позитивний чи негативний), які діяли на кожному етапі розвитку цієї ситуації. Намалюйте принципову блок-схему контурів регулювання цієї підсистеми.

Задача 3 (Відкритість та межі системи). Для захисту орної землі від вітрової ерозії навколо поля було створено мережу лісосмуг. Екологи розглядають це поле як агроєкосистему. Через 5 років фермери помітили зміни не лише у структурі ґрунту, а й у рівні залягання ґрунтових вод та видовому складі комах-запилювачів на сусідніх ділянках.

Завдання: Обґрунтуйте, чому агроєкосистема є відкритою системою. Де проходять її просторові та функціональні межі і як обмін речовиною та енергією впливає на надсистему (навколишній ландшафт)?

Задача 4. На промисловому підприємстві модернізували очисні споруди, встановивши новітні фільтри для вловлювання конкретного газоподібного забруднювача. Однак за кілька місяців з'ясувалося, що загальний екологічний тиск на місцеву екосистему не зменшився, оскільки уловлена речовина у процесі утилізації почала потрапляти у стічні води у більш токсичній формі. Поясніть цей результат з позицій властивості цілісності системи та ефекту перенесення проблеми між підсистемами довкілля.

Задача 5. Екологічна інспекція зафіксувала одночасне скидання у водойму відходів від деревообробного заводу та хімічного комбінату. Окремо кожен із цих видів стоків у наявних концентраціях не викликав масової загибелі гідробіонтів під час лабораторних тестів, але їхнє змішування у річці призвело до екологічної катастрофи. Яку властивість системи та який специфічний системний ефект ілюструє ця ситуація?

Задача 6. Гірська лісова екосистема протягом тривалого часу зазнавала впливу атмосферних викидів металургійного підприємства, проте її зовнішній вигляд, видовий склад та ключові функції залишалися візуально незмінними. Проте після незначного літнього паводку відбулося раптове і масштабне всихання дерев та руйнування ґрунтового покриву. Опишіть поведінку системи, використовуючи поняття гомеостазу, внутрішнього резерву стійкості та критичної точки (порогу) переходу системи в новий стан.

Задача 7. У степовому заповіднику з метою охорони рідкісних видів рослин повністю заборонили випас копитних тварин та будь-яке втручання людини. Замість очікуваного розквіту біорізноманіття, через кілька років заповідна ділянка заросла чагарниками та агресивними бур'янами, що призвело до зникнення тих самих охоронюваних видів. Проаналізуйте помилку в управлінні екосистемою з погляду ігнорування її властивості як відкритої системи та порушення природних зв'язків між підсистемами.

Задача 8. Під час проектування нового водосховища автори проекту врахували лише гідрологічні та геологічні параметри території. Після наповнення чаші водосховища піднявся рівень ґрунтових вод, що викликало підтоплення навколишніх сіл, зміну мікроклімату регіону та

масове розмноження синьо-зелених водоростей. Який принцип системного аналізу щодо визначення меж системи та врахування зв'язків із навколишнім середовищем було порушено?

Задача 9. Державна служба моніторингу аналізує якість атмосферного повітря великого міста. Для цього використовуються дані постів спостереження, інформація про інтенсивність руху автотранспорту, метеорологічні умови та технологічні звіти фабрик. Усі ці розрізнені дані об'єднуються в єдину інформаційну мережу для прийняття рішень мерією. Визначте, що в цій системі управління якістю середовища виступає як «вхід», «структура», «процес» та «вихід».

Задача 10. Озеро, що розташоване поруч із аграрними угіддями, регулярно отримує змиви мінеральних добрив. Спочатку екосистема успішно компенсувала цей вплив за рахунок розростання вищої водної рослинності. Проте згодом процес набув лавиноподібного характеру: розмноження мікробіотопів спричинило дефіцит кисню, загибель риби, загнивання біомаси, що ще більше погіршило якість води. Охарактеризуйте зміну типу зворотного зв'язку в системі (від негативного до позитивного) у процесі її деградації.

Задача 11. Для боротьби зі шкідником лісу в екосистему штучно завезли новий вид комахоїдних птахів. Новий вид успішно знищив шкідника, але згодом витіснив корінних співочих птахів, переключився на поїдання корисних комах-запилювачів і спричинив спалах хвороб серед лісової фауни. Поясніть, чому спроба точкового керування складною природною системою без урахування її емерджентних властивостей призвела до непередбачуваної поведінки об'єкта.

Задача 12. Науковці досліджують вплив глобального потепління на зону тундри. Вони виявили, що танення вічної мерзлоти призводить до виділення парникових газів, які, потрапляючи в атмосферу, посилюють парниковий ефект, що викликає ще більш інтенсивне танення мерзлоти. Визначте архітектуру цього процесу з позицій теорії систем та опишіть роль цього контуру взаємодії у втраті стійкості екосистеми.

Задача 13. Регіональний ландшафтний парк поділений на кілька зон: заповідну, рекреаційну та господарську. Кожна зона функціонує за своїми правилами, але разом вони забезпечують збереження біорізноманіття всього регіону та сталий розвиток місцевих громад. Охарактеризуйте цю структуру за допомогою принципу ієрархічності та поясніть, чому якість функціонування всього парку не тотожна функціонуванню лише однієї з його зон.

Тема 2. Холічний підхід до вивчення складних систем

Задача 1 (Редукціонізм проти холізму в лісівництві). З метою підвищення продуктивності лісового господарства природний мішаний ліс було замінено на одновидову штучну плантацію сосни звичайної (*Pinus sylvestris*). На етапі проектування враховували лише швидкість росту деревини та оптимальну схему посадки. Через 10 років плантація зазнала масового ураження кореневою губкою та шкідниками, що призвело до масштабного всихання.

Завдання: Проаналізуйте помилку менеджерів з точки зору протиставлення редукціоністського та холістичного підходів. Які зв'язки та екосистемні функції було проігноровано заради оптимізації одного параметра?

Задача 2 (Ефект метелика в інвазійній біології). Під час благоустрою прибережної зони міського озера для зміцнення схилів було висаджено кілька кущів немісцевого виду рослин. Через кілька років ця рослина поширилася водотоками, витіснила аборигенну флору, що призвело до зникнення специфічних видів комах, зміни раціону місцевих птахів і, зрештою, до замулення та зміни гідрологічного режиму всієї річкової підсистеми регіону.

Завдання: Опишіть цей процес через призму холічного принципу загального зв'язку. Як мікрозміна на рівні одного елемента зумовила трансформацію системи глобального масштабу?

Задача 3 (Синергетичний ефект забруднення). У водосховищі одночасно потрапляють змиви азотних добрив із полів та теплові води від охолоджувальних контурів підприємства. Окремо кожен із цих чинників перебуває в межах гранично допустимих скидів (ГДС). Проте їхнє поєднання викликало бурхливе «цвітіння» води, дефіцит кисню та вторинне токсичне забруднення водойми.

Завдання: Сформулюйте холістичний висновок щодо якості середовища. Чому оцінка екологічної безпеки за ізольованими показниками нормування виявилася неефективною у складній системі?

Задача 4. Науково-дослідний інститут отримав завдання оцінити екологічний стан річкового басейну. Лабораторія гідрохімії детально вивчила хімічний склад води в усіх притоках, а лабораторія гідробіології – видовий склад риб. Коли звіти об'єднали, виявилось, що загальна екологічна траєкторія розвитку річки та причини її замулення залишилися незрозумілими. Обґрунтуйте з позицій холізму, чому механічне додавання результатів двох ізольованих редукціоністських досліджень не дозволило отримати адекватне уявлення про якість річкової системи як єдиного цілого.

Задача 5. Для ліквідації наслідків розливу нафтопродуктів на узбережжі екологи вирішили використати потужні хімічні детергенти, які пройшли успішні випробування у закритих акваріумах і показали високу ефективність у розщепленні плівки. Після масштабного застосування речовини на узбережжі нафта дійсно зникла, але це спровокувало повне вимирання донних безхребетних і колапс місцевого рибного промислу. Поясніть цю управлінську помилку через призму холістичного принципу взаємозв'язку та емерджентності складних природних об'єктів.

Задача 6. Екологічний аудитор намагається оцінити якість навколишнього середовища в місті, аналізуючи виключно звіти промислових підприємств про обсяги їхніх технологічних викидів у повітря. При цьому він ігнорує особливості міської забудови, специфіку локальних вітрових потоків та реакцію зелених насаджень. Використовуючи холістичну тезу «ціле передусе своїм частинам», поясніть, чому такий ізольований аналіз окремих джерел тиску не здатний відобразити реальну екологічну якість міського простору.

Задача 7. У лісовому масиві, що зазнає хронічного впливу кислотних дощів, ботаніки почали досліджувати стійкість головної лісоутворюючої породи дерев. Вони вивчали окремо листя, кору та кореневу систему в контрольованих умовах теплиці. Проте в реальному лісі дерева почали гинути значно швидше через руйнування мікоризних зв'язків із грибами та зміну кислотності ґрунту під дією мікроорганізмів. Опишіть, як «холістичний парадокс» проявляється у даному дослідженні та як аналітику розв'язати проблему вивчення цієї системи.

Задача 8. Міжнародна комісія розробляє стратегію збереження унікального водно-болотного угіддя. Частина експертів пропонує зосередити всі фінансові ресурси на охороні одного рідкісного виду птахів, який є символом цієї території. Інша група наполягає на фінансуванні збереження гідрологічного режиму та рослинних асоціацій усього регіону. Порівняйте ці два підходи (редукціоністський та холістичний) і докажіть перевагу екоцентричного холістичного мислення для забезпечення довгострокової якості середовища.

Задача 9. Під час оцінки впливу на довкілля майбутнього гірничо-збагачувального комбінату розробники проекту детально описали окремо вплив на повітря, окремо на підземні води та окремо на локальну флору. Проте вони не врахували кумулятивний синергетичний ефект, коли одночасне зниження рівня ґрунтових вод і запилення атмосферного повітря запускає нелінійний процес деградації всього регіонального ландшафту. Сформулюйте зауваження до цього проекту з позицій холістичної методології системного аналізу.

Задача 10. Кліматологи та екологи обговорюють гіпотезу Джеймса Лавлока про те, що жива речовина планети активно регулює стан атмосфери та океану, підтримуючи оптимальні умови для життя. Один із критиків стверджує, що глобальний клімат є результатом суто геологічних і фізико-хімічних процесів взаємодії газів. Спростуйте позицію критика, спираючись на організмичний (холістичний) погляд на біосферу як на єдину складну саморегульовану систему.

Задача 11. Управління екологічної безпеки зіткнулося з проблемою деградації великого озера через масове розмноження водоростей. Адміністрація вирішила застосувати метод механічного очищення плеса від біомаси. З погляду холістичного підходу, поведінка озера визначається не просто наявністю водоростей, а глибинною структурою зв'язків у системі «водозбірний басейн – агроландшафт – озеро». Чому точкове усунення симптому без холістичного аналізу причин не покращить якість водного об'єкта в майбутньому?

Задача 12. Наукова група розробляє комп'ютерну модель соціоекологічної системи регіону для прогнозування її сталого розвитку. Розробники вагаються: будувати модель як простий набір лінійних рівнянь для кожного екологічного фактора окремо чи використовувати апарат імітаційного моделювання складних мереж із нелінійними зворотними зв'язками. Який вибір

відповідає принципам холізму і чому саме він дозволить уникнути непередбачуваної поведінки моделі?

Задача 13. У промисловому регіоні спостерігається погіршення здоров'я населення. Медичні служби звинувачують у цьому хімічний завод, соціологи – низький рівень життя, а екологи – загальну деградацію екосистем. Жодна з груп не може запропонувати ефективну програму дій. Як холістичний підхід та залучення трансдисциплінарної методології системного аналізу можуть допомогти об'єднати ці розрізнені погляди для покращення якості життєвого середовища людини?

Тема 3. Довкілля як система

Задача 1 (Порушення біогеохімічного кругообігу). Тривале та інтенсивне внесення кислих мінеральних добрив на значній площі водозбору призвело до вимивання кальцію та магнію з ґрунту. Через систему підземного стоку це спричинило закислення малих річок, змінило розчинність важких металів у донних відкладах і порушило процеси самоочищення води.

Завдання: Розгляньте описану територію як геосистему. Визначте, як збій у кругообігу речовин в одній геосфері (літосфері) ланцюговою реакцією дестабілізував процеси в іншій (гідросфері).

Задача 2 (Екологічна ємність та антропогенний тиск). Навколо природного озера почалося стрімке будівництво відпочинкових комплексів. Очищення стічних вод здійснюється частково. Протягом перших років система озера «справлялася» із навантаженням завдяки природній фільтрації очеретом, але після перевищення певної кількості туристів прозорість води різко впала, зникли цінні види риб, а плесо затягнуло ряскою.

Завдання: Поясніть концепцію «екологічної ємності системи» на цьому прикладі. Що відбулося із точкою рівноваги екосистеми і чи є цей процес зворотним без зовнішнього втручання?

Задача 3 (Кліматичні зворотні зв'язки в масштабі ландшафту). У регіоні Полісся внаслідок масштабної осушувальної меліорації було осушено велике торфовище. Це призвело до зниження рівня ґрунтових вод на прилеглих територіях, зниження локальної вологості повітря, почастищення посух та масштабних лісових пожеж, які викидають у повітря додатковий вуглекислий газ.

Завдання: Охарактеризуйте довкілля регіону як систему. Які механізми саморегуляції було зруйновано і який контур зворотного зв'язку (стабілізуючий чи деструктивний) тут увімкнувся?

Задача 4. У регіоні інтенсивного ведення сільського господарства тривалий час застосовували стійкі пестициди для захисту посівів. Через кілька років хімічний аналіз показав, що концентрація цих речовин у тканинах хижих птахів та рибоїдних ссавців місцевих водойм виявилася у багато разів вищою, ніж у самій воді чи ґрунті агроландшафту. Опишіть цей процес з погляду функціонування довкілля як системи, використовуючи поняття потоків речовини та акумуляції токсикантів у трофічних ланцюгах.

Задача 5. На околиці лісового масиву збудували широку швидкісну автомагістраль із суцільним асфальтним покриттям та високими захисними екранами. Екологи помітили, що це призвело не лише до загибелі тварин під колесами, а й до поступової деградації рослинного покриву вглиб лісу, зміни гідрологічного режиму та припинення природного поновлення лісоутворюючих порід. Яку системну роль відіграють бар'єри та штучні межі в геосистемах і які наслідки це має для цілісності довкілля?

Задача 6. Велике промислове місто розташоване в улоговині, оточеній пагорбами. У періоди тривалої безвітряної погоди над містом формується стійкий смог, який не розсіюється, попри те, що заводи працюють у звичному режимі й не перевищують установлені нормативи викидів. Проаналізуйте цю ситуацію з позицій концепції просторово-часової гетерогенності довкілля та поясніть, чому метеорологічні чинники можуть трансформувати поведінку урбоекосистеми.

Задача 7. Металургійний комбінат здійснює постійне хронічне скидання стічних вод у велике озеро. Протягом багатьох років якість води в озері залишалася задовільною завдяки активній роботі донних мікроорганізмів та водної рослинності. Однак після того, як поруч відкрили невеликий цех гальванопластики, екосистема озера миттєво зруйнувалася, вода стала токсичною, а процеси самоочищення повністю припинилися. Поясніть це явище за допомогою

понять асиміляційної ємності середовища та екологічної декомпозиції системи під дією критичного навантаження.

Задача 8. У результаті вирубки заплавних лісів уздовж русла річки відбулася кардинальна зміна місцевого мікроклімату: літні температури повітря зросли, почастишали засухи, а рівень води в річці під час паводків почав критично підніматися, викликаючи масштабні руйнування. Охарактеризуйте взаємозв'язок між біотичним та абіотичним компонентами довкілля і поясніть, як закон внутрішньої динамічної рівноваги системи описує реакцію ландшафту на втрату лісового покриву.

Задача 9. В екосистему Полісся активно впроваджується інвазійний вид рослин – рейнуртія японська, яка утворює густі одновидові зарості на порушених землях. Це призводить до витіснення аборигенних видів трав і чагарників, зміни структури комах-запилувачів та прискорення ерозії берегів водойм. Опишіть цей процес як системну трансформацію довкілля, де поява одного нового елемента змінює вектор динаміки та якісні характеристики всієї підсистеми.

Задача 10. Науковці порівнюють стан двох природних систем: незайманого заповідного степу та монокультурного кукурудзяного поля. Під час тривалої посухи поле практично повністю висохло і потребувало штучного відновлення, тоді як заповідний степ зберіг свою структуру та швидко відновився після перших дощів. Порівняйте ці системи за допомогою термодинамічного показника ентропії та поясніть, як рівень різноманітності зв'язків впливає на загальну стійкість довкілля.

Задача 11. При аналізі соціоекологічної системи промислового регіону виявилось, що кошти, які виділяються на лікування хронічних захворювань населення, значно перевищують витрати, необхідні для встановлення сучасних очисних фільтрів на місцевих фабриках. Проаналізуйте цю ситуацію з позицій теорії систем і докажіть необхідність урахування прямих та зворотних зв'язків між підсистемою охорони здоров'я та підсистемою промислового виробництва для оптимізації якості життєвого середовища.

Задача 12. У великому місті реалізували проект масового вертикального озеленення фасадів будівель та створення «зелених дахів». За кілька років спостережень з'ясувалося, що це не лише покращило естетичний вигляд, а й знизило середню температуру повітря на вулицях у літню спеку, зменшило навантаження на дощову каналізацію під час злив та знизило рівень шуму. Які системні властивості довкілля (зокрема емерджентність) проявилися внаслідок інтеграції природних елементів у технічну інфраструктуру міста?

Задача 13. Дослідники помітили, що тривалий помірний випас диких копитних тварин на луках стимулює ріст травостою та підтримує стабільний хімічний склад ґрунту. Однак повне вилучення тварин із системи призводить до накопичення відмерлої органіки, загнивання коріння та зниження якості лучної екосистеми. Охарактеризуйте стан «рухомої рівноваги» або квазістаціонарного стану довкілля та поясніть роль біотичних сигналів у підтримці стабільності макропараметрів системи.

Тема 4. Моделювання природних систем

Задача 1 (Розробка концептуальної моделі сукцесії). На місці покинутого гранітного кар'єру починається природне відновлення рослинного покриву (первинна сукцесія). На оголеному субстраті з'являються перші накипні лишайники, згодом мохи, поодинокі трав'янисті рослини, а з часом – піонерні види дерев (береза, осика).

Завдання: Побудуйте текстову або блок-схемну концептуальну модель цього процесу. Виділіть ключові змінні стану, вхідні параметри (клімат, насіння) та внутрішні оператори (взаємодія рослин із субстратом), які необхідно врахувати для подальшого математичного моделювання.

Задача 2 (Валідація моделі міграції забруднюючих речовин). Науковці створили детерміновану математичну модель поширення викидів оксиду азоту від автомагістралі. Модель бездоганно працювала під час комп'ютерних тестів, але під час порівняння з реальними замірами на місцевості (в умовах пересіченого рельєфу та наявності лісосмуги) похибка становила понад 45%.

Завдання: У чому полягає проблема верифікації та валідації цієї моделі? Які фактори реальної природної системи було проігноровано (принцип спрощення) і як модернізувати модель для підвищення її адекватності?

Задача 3 (Імітаційне моделювання «Хижак – жертва» в інвазіях). У лісову екосистему проник небезпечний інвазійний шкідник комах, який знищує листя дуба. Для боротьби з ним планують інтродукувати спеціалізованого ентомофага (хижу комаху). Перед випуском у природу необхідно прорахувати ризики, щоб хижак після знищення шкідника не перекинувся на корисні аборигенні види.

Завдання: Який тип моделювання (статичний чи динамічний, детермінований чи стохастичний) слід обрати для вирішення цієї задачі? Опишіть структуру імітаційного експерименту.

Задача 4. Регіональне екологічне управління використовує комп'ютерну модель для прогнозування поширення викидів новозбудованого сміттєспалювального заводу. Модель бездоганно пройшла перевірку на відповідність законам аеродинаміки за допомогою тестових математичних рівнянь у лабораторних умовах. Проте під час першої реальної пилової бурі прогноз повністю розійшовся з фактичними замірами на місцевості. Проаналізуйте цю ситуацію з позицій відмінностей між верифікацією та валідацією екологічних моделей і поясніть, чому математична коректність не гарантує адекватність моделі.

Задача 5. Аналітики розробляють модель прогнозування якості води у водосховищі, яка має враховувати як закономірні сезонні зміни температури та сонячної радіації, так і випадкові фактори, як-от аварійні залпові скиди стічних вод чи раптові зливи. Поясніть, які методологічні обмеження виникнуть у дослідників, якщо вони спробують побудувати виключно детерміновану модель, і чому в даному випадку необхідне залучення стохастичного моделювання.

Задача 6. У місті, оточеному промисловою зоною, зафіксовано постійний сильний вітер, що дме в одному напрямку. Екологи помітили, що хмара забруднюючих речовин від заводу рухається чітким шлейфом уздовж міських кварталів практично без розсіювання в бокові сторони. Опишіть, який саме процес перенесення домінує в атмосфері за таких умов, та яку базову модель фізики середовища (адвекції чи молекулярної дифузії) слід обрати за основу для комп'ютерного моделювання цієї ситуації.

Задача 7. На річці, що протікає через великий промисловий центр, зафіксовано різке падіння рівня розчиненого кисню нижче за течією від місця випуску комунальних стічних вод, багатих на органічні сполуки. Згодом, на значній відстані від міста, показники кисню самостійно повернулися до норми. Яку класичну екологічну модель динаміки біохімічного споживання кисню слід застосувати для математичного опису цього процесу самоочищення річки та які ключові протилежні процеси вона має балансувати?

Задача 8. Дослідницька група намагається змоделювати потенційні екологічні ризики від підземного захоронення токсичних відходів у регіоні з надзвичайно складною і неоднорідною геологічною структурою, де точні фізичні параметри пластів неможливо виміряти безпосередньо. Які переваги надасть використання методів моделювання Монте-Карло у цій ситуації та як випадковий пошук допомагає подолати брак точних вихідних даних?

Задача 9. Перед науковцями стоїть завдання спрогнозувати рівень забруднення приземного шару повітря озonom у мегаполісі. У них є колосальний масив історичних даних щохвилинних спостережень за багато років, але хімічні реакції утворення озону під дією сонячного світла за участю вихлопних газів є занадто складними, нелінійними і до кінця не вивченими. Обґрунтуйте, чому в таких умовах доцільно відмовитися від класичних аналітичних моделей і застосувати штучні нейронні мережі.

Задача 10. Команда програмістів створила модель поширення нафтової плями в морі, але вона існує лише у вигляді набору диференціальних рівнянь у текстовому редакторі, що ускладнює роботу рятувальних служб. Як інтеграція цієї математичної моделі з геоінформаційними системами (ГІС) змінить якість сприйняття інформації та які нові можливості з'являться для управління кризовою ситуацією в режимі реального часу?

Задача 11. Для оцінки екологічного стану лісового масиву, що межує з хімічним підприємством, експерти використовують лінгвістичні описи місцевих лісників, такі як «стан хвої переважно пригнічений», «вплив викидів помірний» або «густота крони близька до норми». Поясніть, за допомогою якого математичного апарату теорії моделювання можна перевести ці якісні, суб'єктивні експертні висловлювання у чіткий алгоритм для прийняття рішень щодо екологічної безпеки.

Задача 12. Еколог-моделіст намагається створити довгостроковий прогноз динаміки глобальних кліматичних параметрів на століття вперед. Навіть після врахування всіх відомих факторів, найменша зміна початкової температури океану в моделі всього на мікроскопічну частку призводить до кардинально протилежних результатів прогнозу (від повного вимерзання до екстремального потепління). Яку властивість складних нелінійних природних систем ілюструє цей випадок і як детермінований хаос обмежує можливості екологічного прогнозування?

Задача 13. На підприємстві необхідно оцінити, яка кількість важких металів потрапляє в навколишнє середовище з димовими газами. Внутрішня будова печей та хімічні перетворення всередині камери згоряння є комерційною таємницею виробника і невідомі екологам. Опишіть, як за допомогою принципу «чорної скриньки» та побудови моделі матеріального балансу між сировиною на вході та готовою продукцією і відходами на виході можна розв'язати цю задачу без вивчення внутрішніх процесів агрегату.

Тема 5. Методологія і практика побудови прогностичних алгоритмів

Задача 1 (Проблема екстраполяції в умовах кліматичних змін). Гідролог розробляє алгоритм для прогнозування весняного водопілля на річці протягом наступних 20 років. Як ретроспективну інформацію він використав лінійну екстраполяцію даних спостережень за період з 1960 по 1990 роки. Проте прогнози на 2020-ті роки виявилися абсолютно невірними через різку зміну режиму зимових опадів та температур останнім часом.

Завдання: Яку методологічну помилку було допущено при побудові прогностичного алгоритму? Чому метод простої екстраполяції часових рядів неефективний для динамічних систем у стані нелінійних змін?

Задача 2 (Перенавчання алгоритму штучного інтелекту). Для прогнозування спалахів розмноження короєда в соснових лісах було навчено нейромережу. Навчання проводили на дуже детальних даних одного конкретного лісництва за 2024 рік. Алгоритм показав точність прогнозу 99% на цих даних. Однак, коли цей самий алгоритм застосували для прогнозування ситуації в сусідньому регіоні на 2026 рік, точність упала до 40%.

Завдання: Діагностуйте проблему алгоритму. Що таке «перенавчання» (overfitting) і які критерії формування вибірки даних (ретроспекції) потрібно виконати для побудови надійного екологічного прогнозу?

Задача 3 (Сценарний аналіз якості повітря). Муніципалітет міста планує побудувати новий сміттєспалювальний завод. Системним аналітикам доручено розробити прогностичний алгоритм для оцінки якості атмосферного повітря навколо міста на 10 років уперед. Алгоритм повинен враховувати різні варіанти: відсутність очисних споруд, встановлення сучасних фільтрів, зміну рози вітрів та можливе зростання кількості автомобілів.

Завдання: Опишіть практику побудови такого алгоритму на основі методів сценарного аналізу (Scenario Analysis). Що виступатиме як «прогностичний фон», а що – як «керовані змінні» у вашій прогностичній системі?

Задача 4. Студент-еколог розробляє алгоритм для прогнозування концентрації діоксиду сірки в атмосферному повітрі міста на основі багаторічних щоденних спостережень. Перед початком моделювання він помітив, що середнє значення та розмах коливань цього показника суттєво змінюються від року до року через закриття одних фабрик та відкриття інших. Охарактеризуйте цей часовий ряд за критерієм стаціонарності та поясніть, які труднощі виникнуть при спробі застосувати класичні методи лінійної екстракції тренду без попередньої трансформації даних.

Задача 5. На території Центрального Полісся необхідно терміново оцінити ризики та спрогнозувати швидкість поширення інвазійного виду рослин – рейнутрії японської – у за

заплавах річок після масштабної повені. Оскільки детальний моніторинг цього виду раніше не проводився і статистична база даних повністю відсутня, аналітики вирішили залучити провідних ботаніків та екологів регіону для побудови прогнозу. До якої групи методів належить такий підхід, які його головні переваги та обмеження в умовах дефіциту часу та інформації?

Задача 6. Наукова група будує прогнозний алгоритм для оцінки рівня кисню у воді озера, використовуючи математичні моделі класу авторегресії рухомого середнього. Під час аналізу вихідних даних з'ясувалося, що поточний стан екосистеми критично залежить від її параметрів у попередні дні, тижні та сезони. Поясніть, яке явище в аналізі часових рядів ілюструє ця залежність і чому неврахування внутрішньої пам'яті системи призведе до повної втрати точності прогнозу.

Задача 7. Для побудови прогностичного алгоритму машинного навчання, що оцінює якість підземних вод навколо хімічного полігону, дослідники зібрали великий масив даних. Перед запуском навчання вони розділили всю інформацію на дві нерівні частини: на більшій частині алгоритм підбирав внутрішні коефіцієнти, а на меншій – перевірялася його здатність видавати правильні результати на незнайомих об'єктах. Опишіть методологічний сенс такого розділення вибірки та поясніть, чому не можна тестувати якість прогнозу на тих самих даних, де алгоритм навчався.

Задача 8. Інженер-еколог створив складну нейромережеву модель для прогнозування появи смогу в мегаполісі. Під час тестування на архівних даних, які використовувалися для її налаштування, модель показала абсолютну точність і безпомилково вгадувала кожне коливання. Однак, коли модель спробували використати для прогнозу на наступний місяць у реальному часі, вона почала видавати хаотичні результати з величезними помилками. Яку класичну проблему методології побудови прогностичних алгоритмів ілюструє цей випадок і як її уникнути?

Задача 9. Регіональне міністерство екології замовляє розробку прогностичної системи для оцінки стану лісових масивів Словечансько-Овруцького кряжу в умовах глобальних кліматичних змін. Розробники пропонують створити кілька варіантів прогнозу: за умови збереження поточних тенденцій, за умови посилення засух та за умови впровадження активних лісотехнічних заходів підсіву стійких порід. Як у системному аналізі називається такий підхід до прогнозування та яка його роль у прийнятті стратегічних управлінських рішень?

Задача 10. Еколог-аналітик порівнює два алгоритми прогнозування середньодобової концентрації пилу в робочій зоні кар'єру. Для оцінки їхньої ефективності він використовує метрику, що обчислює корінь квадратний із середнього значення квадратів відхилень прогнозованих значень від фактичних, отриманих із датчиків. Поясніть, яку саме сторону похибки оцінює ця метрика та чому вона сильніше реагує на поодинокі великі промахи в прогнозі, ніж на часті, але дрібні неточності.

Задача 11. Команда дослідників розробляє систему раннього попередження про спалахи розмноження комах-шкідників лісу. Вони вирішили побудувати алгоритм на основі ансамблю дерев рішень, де кожне окреме дерево голосує за певну ймовірність екологічної загрози на основі температури, вологості та віку насаджень, а остаточний прогноз формується як усереднений результат усього «лісу». Який сучасний метод машинного навчання реалізовано в цьому алгоритмі та в чому його перевага при аналізі нелінійних природних процесів?

Задача 12. Під час розробки алгоритму прогнозування якості поверхневих вод для великого річкового басейну науковці намагалися врахувати абсолютно всі можливі фактори: від хімічного складу опадів та швидкості течії до щільності населення в кожному селі та поголів'я худоби. У результаті алгоритм став настільки громіздким, що комп'ютерні потужності перестали справлятися з обчисленнями, а точність прогнозу впала через накопичення дрібних помилок у другорядних параметрах. Яку методологічну проблему, відому як «прокляття розмірності», ілюструє ця ситуація і як виконати оптимізацію моделі?

Задача 13. Муніципальна екологічна служба інтегрувала прогностичний алгоритм поширення вихлопних газів транспорту з цифровою картою міста. Тепер система здатна не просто видавати графік майбутніх концентрацій речовин, а й візуально відображати кольором зони найбільшого екологічного ризику на кожній вулиці залежно від часу доби та напрямку вітру.

Опишіть переваги інтеграції прогностичних алгоритмів із геоінформаційними системами (ГІС) для практичного управління якістю навколишнього середовища.

Загальні ситуаційні задачі.

Задача 1.

На основі даних про водні екосистеми встановіть їхню динамічну спорідненість.

11. Водні природні екосистеми. Поверхневі водойми на території кряжу займають незначну площу (усього близько 3 %). Більшість із них представлена, переважно залежними від атмосферних опадів і підземних вод, струмками та малими річками з невеликим поперечним перерізом (0,1-0,5 м) та швидкою течією. Велику роль в регулюванні їх рівня води мають низинні та перехідні болота вздовж русла. Вони займають території тектонічних розломів або знижені частини великих лесових балок і дуже рідко заглиблення на плакорних ділянках (старичні водойми). Великі за площею водойми – результат людської діяльності (створення ставків). Це створює високу різноманітність умов, і як результат високу ценотичну різноманітність. Тому на території кряжу можна спостерігати близько половини водних екосистем Житомирського Полісся.

Важливою ознакою для характеристики водних екосистем є швидкість течії. Вона впливає на трофічний статус водойм, на здатність рослинних угруповань до існування та розвитку. В зв'язку з цим на третьому рівні ми виділяємо 11.1 Стоячі поверхневі води.

Водойми з повільною швидкістю течії найчастіше зустрічаються на околицях кряжу або долинах основних річкових систем. Абсолютна висота їх в порівнянні з територією, яка оточує кряж невелика і не перевищує 10 м (200-210м над рівнем моря). Їхньому утворенню сприяла різноманітна людська діяльність – утворення ставків, прокладання меліоративних каналів, загачування течій при виконанні дорожньо-будівельних робіт (Андриенко Т.Л. 1988).

Фітоценозна складова представлена переважно угрупованнями класу *Lemnetea R.Tx.1955* та *Utricularietea intermedio-minoris Pietsch 1965* або *Potametea Klika in Klika et Novak 1941*. Присутність цих угруповань характеризує напрям і стадію розвитку екосистем (Дубина Д.В. 1996). Перші представлені на наступних рівнях представлена екосистемами: 11.11. Постійні озера з вільноплаваючою рослинністю, 11.11.1 Постійні оліготрофні та мезотрофні озера з вільноплаваючою рослинністю, 11.11.11. Постійні оліготрофні озера з плаваючою на поверхні рослинністю (Рубцов Н.И., Котова И.Н., Махаева Л.В. 1966; Дубина Д.В. 1996).

11.11.11.1 Водойми з Ряскою малою.

Екотоп. Екосистема включає в себе мезо-, евтрофні водойми з слабкою течією або без неї. Дно мулисте або мулисто-піщане. Протягом вегетації рослин спостерігаються коливання рівня води. Глибина водойм від 0,05 до 2 м. Екосистема представлена частинами озер, ставків, заплав, заглибин в руслах пересихаючих чи колишніх річок, старичних водойм та старих меліоративних канавах. В більшості випадків вона розміщена в прибережній, частіше затіненій, смузі.

Фітоценоз: *Lemnetum minoris R.Tx.1955*.et (Oberd. 1957) *Th.Mull. et Gors 1960*. Угруповання переважно монодомінантні з доміантом *Lemna minor L.* Інколи не більше 5-10% примішуються *Riccia fluitans*, *Hydrocharis morsus-ranae L.*, *Polygonum amphibium L.*, *Potamogeton natans L.* Часто угруповання проникає в сусідні, формуючи екотонні утворення де зустрічаються представники флори різних фітоценозів.

Поширення. Екосистема зустрічається по всій території кряжу в долинах річок. Найчастіше ближче до країн кряжу де швидкість течії нижча та більше водойм з необхідними умовами. При цьому її площі незначні від 100 м² до 10 м² і менше. Найбільші масиви спостерігаються в долині річки Норинь (особливо в районі села Черевки). В скелястій частині кряжу носить фрагментарний характер (в Районі сіл Нова Рудня, Усово, Переброди, Червонка).

Охорона. Созологічна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Охорони не потребує.

11.11.11.2. Водойми з Ряскою горбатою

Екотоп. Екосистема включає в себе мезо-, евтрофні водойми з слабкою свіжою течією. Дно мулисте або мулисто-піщане. Вода тверда насичена мінералами Протягом вегетації рослин коливання рівня води майже не спостерігається. Глибина водойм від 0,05 до 1 м. Екосистема представлена частинами ставка неподалеку від впадання струмка, який починається за 7м з

підземного джерела та в меліоративній канавах, які прокладені в місцевості з рівнем залягання ґрунтових вод менше 1 метра та численними джерелами. В більшості випадків вона розміщена в прибережній, частіше затіненій, смузі.

Фітоценоз. Рослинне угруповання екосистеми *Lemnetum gibbae* Miyawaki et J.Tx. 1960 переважно монодомінантне з домінантом *Lemna gibba* L. Інколи не більше 10% примішуються *Lemna minor*, *Spirodela polyrhiza* Schleid. Рослинність розміщена в один ярус – надводний. Проективне покриття високе до 90-98%.

Поширення. Екосистема зустрічається території кряжу долинах річки Словечна (район села Тхорин) та Норинь (район сіл Черевки і Велідники).

Охорона. Созологічна категорія 3. Екосистема на території кряжу не охороняється але вона рекомендована до внесення в червоний список угруповань водних макрофітів (D.V. Dubyna 2003).

11.11.11.3 Рясково-Спіроделові водойми

Екотоп. Екосистема включає в себе евтрофні водойми з слабкою течією або без неї. Дно мулисте або мулисто-піщане. Протягом вегетації рослин можуть спостерігатися коливання рівня води. Глибина водойм від 0,1 до 3 м.

Екосистема представлена частинами озер, ставків, заплав, заглибин в руслах пересихаючих та старих меліоративних канавах. В більшості випадків вона розміщена в прибережній затіненій смузі.

Фітоценоз. Домінування *Spirodela polyrhiza* в угрупованні *Lemno-Spirodeletum polyrhizae* W.Koch. 1954 або *Spirodeletum polyrhizae* W.Koch. 1954 може бути більше чи менше виражене – від 50% до 90%. *Lemna minor* займає відповідно 50%-10%. В деяких випадках фітоценози повністю монодомінантні.

Поширення. Екосистема зустрічається території кряжу в долинах річок Селівониха, Норинь, Полохачевка, Желонь. У всіх місцезнаходженнях крім розміщеного в районі села Нові Велідники спостерігається субдомінант *Lemna minor*. На території скелястої частини кряжу за винятком району річки Селівониха екосистема не виявлена.

Охорона. Созологічна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Охорони не потребує.

11.11.12. Постійні мезотрофні озера з зануреною в воду рослинністю з союзом *Hydrocharition* Rubel 1933.

11.11.12.1. Водойми з Жабурником звичайним

Екотоп. Екосистема включає в себе евтрофні водойми з дуже слабкою течією або без неї. Дно мулисте або мулисто-піщане. Протягом вегетації рослин спостерігаються коливання рівня води. Глибина водойм від 0,25 до 1,5 м.

Екосистема представлена частинами ставків, заплав малих річок, та старих меліоративних каналів (віком 20-25 років). В більшості випадків вона розміщена в прибережній смузі. В невеликих ставках вона може займати до половини площі відкритого плеса.

Фітоценоз. *Hydrocharitetum morsus-ranae* van Langendonck 1935 Для цієї екосистеми характерна присутність інших видів класу *Lemnetea* при домінуванні *Hydrocharii morsus-ranae* L. Рослинність інколи розташована в два яруси. Наводний утворює *Hydrocharii morsus-ranae* L. 75-90% *Lemna minor* L., *Spirodela polyrhiza* до 5%, підводний *Elodea canadensis* Michx. (до 5-10 %). Екосистема часто проникає в сусідні особливо представлені асоціаціями *Typhetum angustifoliae* *Typhetum latifoliae* *Caricetum acutae* та іншими представниками класу *Phragmiti-Magnocaricetea*, утворюючи екотонні угруповання .

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається по всій території кряжу в долинах річок: верхів'я, Желонь і середня течія Норинь. На півдні кряжу вона займає меліоративні канали та малі річки, що впадають в річку Норинь в районі села Черевки. В центрі (в районі села Городець) і північному сході невеличкі лісові ставки (в районі села Піщаниця.). В західній частині кряжу екосистема не спостерігалася.

Охорона. Созологічна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів охорони не потребує.

11.11.12.2 Рясково-Жабурникові водойми

Екотоп. Екосистема включає в себе евтрофні та мезотрофні водойми з дуже слабкою течією або без неї. Дно мулисте або мулисто-піщане інколи з невеликим вмістом торф'яних відкладів. Протягом вегетації рослин може спостерігатися коливання рівня води. Глибина водойм від 0,25 до 1,5 м.

Екосистема представлена частинами ставків, заплав малих річок. В більшості випадків вона розміщена в прибережній смузі.

Фітоценоз. Lemno-Hydrocharitetum morsus-ranae Oberd. 1957. Домінантом в фітоценозі виступає *Hydrocharis morsus-ranae* 60-90% при значній присутності *Lemna minor* 5-15%.

Рослинність розташована в два яруси. Наводний утворює, *Spirodela polyrhiza* до 5 %, *Hydrocharis morsus-ranae*, *Lemna minor*, а підводний *Elodea canadensis* (до 5%) та *Ceratophyllum demersum* L. (5-10%).

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається території кряжу по окраїнах його лесової частини (в районі сіл Піщаниця, Кошечки та Гаєвичи.) найбільш типовими є угруповання описані на північ від Піщаниця.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Особливих заходів щодо охорони не потребує.

11.11.13. Постійні дистрофні та оліготрофні з незакріпленою рослинністю представлені на сьомому однією соцією.

11.11.13.1. Сфагнумово-пухирникові водойми.

Екотоп. Екосистема включає в себе оліготрофні слабо заболочені водойми з слабкою течією або без неї. Глибина 0,15-0,4 м.

Фітоценоз. Sphagno-Utricularietum intermediae Fijalkowski 1960. Домінують *Utricularia intermedia* L. 45-60% та різні види мохів - *Sphagnum fallax*, та *S. magellanicum*. В екотонній зоні зустрічаються типові болотні осоки - *Carex rostrata* Stoces., *C. limosa* L., *C. chordorrhiza* Ehrh., а також *Drosera rotundifolia* L., *Ledum palustre* L., *Andromeda polifolia* L., *Oxycoccus palustris* Pers.

Поширення. Екосистема зрідка зустрічається в заболочених елементах dna річкових долин Норині, Селівонихи та Червонки.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Потребує постійного моніторингу, як місце зростання рідкісних видів водно-болотної флори.

Спорадично на території кряжу зустрічаються угруповання вільноплаваючої рослинності, які можна віднести до порядку Lemno-Utricularietalia Passarge 1978, союзу *Utricularion vulgaris* Passarge 1964, асоціації Lemno-Utricularietum vulgaris Soó 1928. Вони представлені *Spirodela polyrhiza* (50%) *Utricularietum vulgaris* (50%)

В прибережній зоні мілкої заплави лісової річки, зарегульованої побудовою дороги, на південний захід від села Листвин, знаходиться рослинне угруповання, яке за своїм флористичним складом близьке до *Scorpidio-Utricularietum minoris* Th. Müll. Et Gcrs 1960 (Matuszkiewicz 2001). Переважають *Utricularia minoris* L. 60% та різні види мохів - *Sphagnum fallax*, та *S. magellanicum* (50%)

Ці екосистеми разом із попередньою можна віднести, як до екосистем водойм так і до екосистем літоралей.

До другої групи екосистем малорухливих поверхневих вод на рівні домінацену знаходяться 11.12. Постійні озера з прикріпленою рослинністю. На наступних рівнях вони представлені такими екосистемами, як 11.12.1 Постійні евтрофних та мезотрофних озера з прикріпленою рослинністю, 11.12.11 Постійні озера із прикріпленими рослинами з плаваючим на поверхні листям.

11.12.11.1 Водойми з рдесником плаваючим

Екотоп Екосистема займає слабопроточні або непроточні водойми – ставки, заводи, дрібні лісові озерця. Донні відкладення мулисті або мулисто-піщані. Глибина водойм 0,3-1,5 м.

Фітоценоз. Фітоценоз – Potametum natantis Soó 1927. Домінантом в фітоценозі виступає *Potamogeton natans* L (Дубина Д.В. 1987).. Рослинність частіше двохярусна. Перший надводний утворюється включеннями класу Phragmiti-Magnocaricetea Potametea Klika in Klika et Novak 1941 (*Typha latifolia* L, *Sparganium erectum* L). Другий водний утворений домінуючим діагностичним

видом угруповання та представниками класу Lemnetae (*Lemna minor*, *Spirodela polyrhiza*, *Hydrocharis morsus-ranae*).

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається по всій території кряжу. Найчастіше її можна спостерігати в районі сіл Листвин та Черевки, де вони приурочені до басейну річки Норинь.

Охорона. Созологічна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів охорони не потребує.

11.12.11.2. Лататтєві водойми

Екотоп. Екосистема займає мілководдя, що заростають прісноводних замкнутих і малопроточних евтрофних водоймищ з товщею води 150—200 (300) см і мулисто-піщаними, мулисто-торф'янистими донними відкладеннями. рН 6,5-7.

Фітоценоз. *Nymphaea lutea*-*Nymphaea alba* Tomasz 1977. Густа рослинність складається з трьох підярусів (надводного, наводного і підводного). Перший, розріджений заввишки до 250 см утворюють *Typha angustifolia* L, *T. latifolia* L, *Scirpus lacustris* L, *Phragmites australis* Trin. ex Steud. В другому переважають *Myriophyllum spicatum* L, *M. verticillatum* L, *Potamogeton berchtoldii* Fieb, *P. crispus* L, *P. natans*, *Batrachium carinatum* Schur, *Hippuris lanceolata* Retz а також *Lemna gibba*, *L. minor*, *Spirodela polyrhiza*

Поширення. Екосистема займає ставки, озера, широкі та глибокі меліоративні канали з повільною течією по всій території кряжу. Відмічено що в більш кислих водах переважає *Nymphaea lutea* L. а в менш кислих (лесова частина кряжу) – *Nymphaea alba* L.

Охорона. Созологічна категорія 2. На території кряжу не охороняється. Рекомендується до внесення до червоного списку рослинних угруповань. В річці Норинь в районі села Листвин зустрічається *Typha natans* (Дубина Д.В 1982)

В районі села Листвин в притоках річки Норинь зустрічаються рослинні угруповання з домінуванням *Potamogeton. crispus* (50-75%), які можна віднести до асоціації *Potamogeton crispus* Soó 1927. Монодомінантні угруповання *Ceratophyllum demersum* (70%) зі значною присутністю *Elodea canadensis* *Hydrocharis morsus-ranae* *Spirodela polyrhiza* можна віднести до асоціації *Ceratophylletum demersi* Egger 1933.

11.12.12 Постійні озера із зануреними у воду прикріпленими рослинами з союзу Potamion.

11.12.12.1 Водойми з елодеєю канадською

Екотоп. Екосистема займає малопроточні малі річки (зони заплав), меліоративні канали, непроточні ставки. Дно мулисто-піщане, піщане, торф'янисто-піщане. Глибина 0,2-1,0 м.

Фітоценоз. *Elodea canadensis* Egger 1933. Угруповання найчастіше монодомінантне. Зрідка зустрічаються в наводному ярусі *Hydrocharis morsus-ranae*, *Spirodela polyrhiza*, *Lemna minor*

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається по всій території кряжу. Вона відмічена в басейні річок Червонка, Словечна, Норинь, Желонь.

Охорона. Созологічна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребують.

Спорадично на території кряжу в басейні річки Норинь зустрічаються монодомінантні угруповання *Myriophyllum verticillati* (75%) з невеликою присутністю *Lemna minor* *Spirodela polyrhiza*, які можна віднести до асоціації *Myriophylletum verticillati* Soó 1927.

11.12.12.2. Водойми з водяним жовтецем

11.44.1. Вкорінена рослинність евтрофних водойм з плаваючим на поверхні води листям сформована багаторічниками (КЕЖП) (CORINE).

Екотоп. Екосистема займає частини евтрофних мало проточних та непроточних водойм з широкою амплітудою екологічних умов. Донні відклади мулисто-піщані з достатньою кількістю органічних речовин.

За антропогенною трансформацією відноситься до мезо- та еугемеробних. На території кряжу за генезисом її можна віднести до класу гідромеліоративних секцій трансформованих.

Фітоценоз. *Ranunculetum circinatis* Segal 1965. Переважно монодомінантні угруповання. Інколи мають надводний ярус із представників асоціацій *Typhetum latifoliae*, *Phragmitetum australis* (до 5%). В підводному ярусі часом спостерігаються: *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum*

verticillati L., *Elodea canadensis* (до 5%) з домінуванням *Batrachium foeniculaceum* V. Krecz. (70%-90%). З затінених окраїнах території яку займає екосистема в наводному ярусі зустрічаються *Lemna minor* і *Spirodela polyrhiza* (до 5-10%).

Поширення. Екосистема зрідка зустрічається території кряжу. Була відмічена лише біля його південної околиці в басейні річки Норинь. Оскільки вона пов'язана з водоймами, які мають значні площі відкритого плеса та значні глибини. На території кряжу її можна зустріти лише після виході основних річок на рівнину (села Листвин, Хайча, Бондарі)

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Оскільки вона раніше не наводилась для території Полісся, то потребує посиленого постійного моніторингу для визначення її стану і розвитку, а також можливо охорони.

11.12.13. Виринницеві водойми представлені територіями зайнятими союзом *Hottonion*.

11.12.13.1. Виринницево-плавушникові водойми

Екотоп. Екосистема займає непроточні або малопроточні водойми. Глибина до 15-20 см. Дно мулисте інколи мулисто-торфяне. Протягом сезону вегетації відмічаються значні коливання рівня води та його залежність від атмосферних опадів.

На території лесової частини кряжу екосистема займає наповнені водою мулисті пониження на дні великих балок.

Фітоценоз. Фітоценоз представлений асоціацією *Hottonietum palustris* R.Тх. 1937. відрізняється від інших типових описаних для Полісся. Дане угруповання можна ідентифікувати лише за набором діагностичних видів наведених Матюшкевичем для території Польщі (Matuszkiewicz 2001). Тут переважають види роду *Callitriche* L. особливо *Callitriche verna* L. (60-80%) в той же час *Batrachium aquatile* Dumort., *Hotonia palustris* L. (до 5%) представлена поодинокими рослинами. Серед інших видів в прибережній зоні трапляються представники угруповань *Catabroso-Polygonetum hydropiperis*, *Polygono-Bidentetum* та союзу *Lemnion minoris*.

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається по своїй території кряжу. Площі, які вони займають не перевищують 0,02 га. Найбільш типові угруповання зустрічаються в на дні широких балок півдня лесової частини кряжу. На півночі та сході в угрупованнях переважають представники роду *Callitriche*.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Особливих заходів з охорони не потребує але повинна бути в процесі постійного моніторингу.

11.2 Проточні поверхневі води найчастіше мало пов'язані з рослинними угрупованнями вищих судинних рослин. Причиною цього є нездатність більшості організмів зафіксувати на субстраті дна річок та струмків з значною течією своє насіння чи інші елементи що сприяють поширенню. Крім цього більшість із них не здатні в таких умовах захоплювати елементи мінерального живлення. Тому рослинність в цих угрупованнях представлена кількома видами мохів та водоростей прикріплених до дна чи берегів. Однак ці екосистеми є надзвичайно важливим елементом природи кряжу.

11.21 Струмки та річки на наступних рівнях розділяються за джерелами надходження води та їх сталістю. 11.21.1 Струмки з непостійним наповненням водою характеризуються зв'язком між наповненням водою та атмосферними опадами. В залежності від сезонних характеристик наповнення, вони представлені такими одиницями: 11.21.11 Тимчасові струмки; 11.21.11.1 Після дощові струмки; 11.21.11.2 Весняні струмки.

Для 11.21.2 Струмків з постійним наповненням водою частка опадів в загальному запасі води менша або надходження її регулюється болотними чи ставковими системами. В залежності від характеру дна та руху течії вони представлені: 11.21.21 Постійні річки та струмки з швидкою течією; 11.21.21.1 Водойми з порогами; 11.21.21.2 Неприливні водойми з бурхливою течією.

Територію 11.21.11. Тимчасових струмків можна розділити на дві зони, які вирізняються після спаду рівня води. Це заповнені водою заглибини та схили з оголеними гірськими породами. В першій зоні інколи можна спостерігати водну та вологолюбну рослинність: *Potamogeton crispus* L., *Athyrium filix-femina* Roth., *Carex vesicaria* L., *Juncus effusus* L., *Glyceria maxima* Holmb. за умов достатньої освітленості. В другій зоні вищі судинні рослини не зустрічаються. Вона представляє

собою піонерно-агломератну стадію сукцесії за моделлю інгібування (Миркин 2001), де інгібітором є періодичні стрімкі потоки води.

Розподіл на 11.21.11.1 Післядошові струмки і 11.21.11.2 Весняні струмки дещо умовний. Провести чітку межу між ними не завжди можливо, так як більшість із них наповнюється водою, як з дощів так і при таненні снігу. Винятком є весняні струмки приплакорних заглиблень, які не мають змоги зібрати достатнього об'єму води при випадінні дощу але за умови тривалого не розмерзання весною верхніх шарів ґрунту, здатні акумулювати в себе талі води.

Весняні струмки спостерігаються на лесових породах і стають причиною періодичної водяної ерозії. Рослинність на їх території розріджена або відсутня через вимивання родючих шарів ґрунту. Лише в екотонній зоні можна спостерігати окремих представників піонерної асоціації *Poo-Tussilaginietum farfarae* R.Tx. 1931.

11.21.21.1 Водойми з порогами і 11.21.21.2 Неприливні водойми з бурхливою течією. Висока швидкість течії та пороги викликані різким перепадом висот та виходами кристалічних порід на денну поверхню. Ці екосистеми не мають у своєму складі рослинних угруповань вищих рослин, але легко ідентифікуються за ектопічними ознаками. В екотонах зустрічається рослинність із сусідніх угруповань частіше класів *Potametea* та *Phragmiti-Magnocaricetea*.

В скелястій частині кряжу 11.21.11.1 Після дощіві струмки існують більш тривалий час (протягом 5-10 днів) в лесовій (1-2 дні). Так як і 11.21.11.2 Весняні струмки на скелястій частині кряжу (12-15 днів) а на лесовій (5-7 днів). При цьому потужність дощових струмків на скелястій частині вища а весняних нижча. Причиною цього є регуляція переміщення води та танення снігу лісовими та болотними угрупованнями на заході кряжу і їх мала присутність на сході. Крім цього тимчасові потоки лесової частини кряжу швидко концентруються в балках в той час, як це не можливо в скелястій.

Задача 2.

На основі даних про літоральні екосистеми Словечансько-Овруцького кряжу проаналізувати їхній екотонний характер.

Виходячи з концепції відносного континууму Р.Маргалєфа (Margalef 1994) до перехідних екотопів між водним та наземно-повітряним середовищем існування буде віднесено 12. Літоральні природні екосистеми (Шеляг–Сосонко Ю.Р., Соломаха В.А., Сипайлова Л.М. 1985). В залежності від постійності присутності води їх можна розділити на 12.1 Літоралі з постійною присутністю води та 12.2. Літоралі з непостійним затопленням. Перші представлені екотопами із представниками угруповань класу *Phragmiti-Magnocaricetea* (Шеляг–Сосонко Ю.Р., Соломаха В.А., Сипайлова Л.М. 1986). На наступних рівнях вони розділяються на 12.11 Високотравні і осокові літоралі; 12.11.1 Монодомінантні високотравні літоралі; 12.11.11. Літоралі з вкоріненим в ґрунт високотрав'ям залитим водою.

12.11.11.1. Літоралі з Рогозом широколистим

Екотоп. Екосистема представлена прибережними зонами та мілководдям непроточних або слабопроточних евтрофних водойм з глибокомулистим та мулисто-піщаним дном. Рівень води коливається але для більшості території характерне постійне затоплення (крім коротких періодів літньої засух)

Фітоценоз. *Typhetum latifoliae* SOO 1927. Угруповання маловидове з домінуванням *Typha latifolia* (покриття більше 95%). В відкритих водяних блюдцях зустрічається *Lemna minor* та *Spirodela polyrrhiza*. Інколи до домінуючого виду домішуються інші представники класу *Phragmiti-Magnocaricetea* – *Equisetum fluviatile* L., *Typha angustifolia*, *Glyceria maxima*, *Iris pseudocorus* L., *Glyceria fluitans* R.Br., *Phragmites australis*.

Можливо, що угруповання, в яких субдомінантою виступає *Typha angustifolia* відноситься до асоціацій рослинності *Typhetum latifolia-angustifolia* Schmale 1939. Найбільш яскраво це виражено в ставку на північ від села Пішаниця. Оскільки за іншими ознаками даний екотоп не вдалося диференціювати його віднесено до описуваної одиниці шостого рівня.

Поширення. Екосистема зустрічається на всій території кряжу. Приурочена до долин річок. Більш типові рослинні угруповання екосистеми зустрічаються в лесовій частині кряжу. Тоді, як в скелястій, спостерігаємо комбінації із іншими видами класу.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.11.11.2. Літоралі з рогозом вузьколистим.

Екотоп. Екосистема представлена прибережними зонами та мілководдям непроточних або слабопроточних евтрофних водойм з мулисто-піщаним дном. Рівень води коливається незначною мірою і для більшості території характерне постійне затоплення

Фітоценоз. *Typhetum angustifolia* SOO 1927. Угруповання монодомінантне з домінуванням *Typha angustifolia* (покриття 70-80%). В відкритих водяних блюдцях зустрічається, *Hydrocharis morsus-ranae*, *Lemna minor* та *Spirodela polyrrhiza*. Інколи до домінуючого виду домішуються інші представники класу *Phragmiti-Magnocaricetea* - *Equisetum fluviatile*, *Typha latifolia*, *Glyceria maxima*, *Iris pseudocorus*, *Glyceria fluitans*.

Поширення. Екосистема розміщена в річках на північних та південних околицях кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.11.11.3 Літоралі з Очеретом звичайним

Екотоп. Екосистема представлена евтрофними, мезо-евтрофними та мезотрофними водоймами з глибиною до 1.0 м. протягом вегетації спостерігаються значні коливання рівня води. Вода має нейтральну або слабо кислу реакцію.

Фітоценоз. *Phragmitetum australis* Schmale 1939. Угруповання з невеликою кількістю видів або лише з одним домінантом *Phragmites australis*. В екотонній зоні угруповання зустрічаються поодинокі представники класу *Phragmiti-Magnocaricetea* (*Iris pseudocorus*, *Glyceria fluitans*) а також *Comarum palustris* L., *Carex vesicaria* (Григора І.М. 1976).

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається території по всій території кряжу, як в долинах річок так і на заплавних болотах. В долині річки Норинь (В районі сіл Листвин і Черевки) зустрічається дуже часто і займає великі площі.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.11.11.4. Літоралі з Лепешняком великим

Екотоп. Екосистема представлена водоймами глибиною до 30-50 см. Дно не оторфоване.

Фітоценоз. *Glycerietum maxima* Hueck 1931. Домінантом виступає *Glyceria maxima* 60-90%. Часто зустрічаються *Equisetum fluviatile*, *Typha latifolia*, *Iris pseudocorus*. В заповнених водою ділянках з розрідженою рослинністю часто зустрічаються представники класу *Lemnetea*.

Поширення. Екосистема приурочена до заплав річок, лісових канав тощо. Найбільші масиви пов'язані із річкою Норинь і її притоками.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.11.11.5. Літоралі з хвощем плаваючим.

Екотоп. Екосистема представлена еулітораліями евтрофних, мезо-евтрофних та мезотрофних водойм з глибиною до 1.0 м. Протягом вегетації спостерігаються значні коливання рівня води. Вода має нейтральну або слабо кислу реакцію.

Фітоценоз. *Equisetetum fluviatilis* Steffen 1931. В угрупованні домінує *Equisetum fluviatilis* (80-90%). Інколи примішуються види класу *Phragmiti-Magnocaricetea* (*Typha angustifolia*, *Galium palustre* L. до 5-10%) також (*Juncus effusus*, *Scirpus sylvaticus* L, *Equisetum palustre* L. до 5%).

Поширення. Частіше зустрічається в прибережних зонах приток Норині. Найбільші масиви розташовані в центральній частині кряжу

Охорона. Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.11.2 Осокові та високотравні літоралі представлені екотопами з угрупованнями порядку *Magnocaricetalia* Pign 1953. та 12.11.21. Осоковими літораліями з союзом *Caricion gracilis* Neuhäusl 1959.

12.11.21.1 Літораль з осокою пухирчастою.

Екотоп. Екосистема представлена евтрофними заболоченими літораллями з намитими лучними легкосуглинковими ґрунтами в долинах річок. Середовище слабокисле. Часто спостерігається підвищений вміст заліза в субстраті та виходи залізної руди (лімоніту). Вологість едафотопу 16-19 балів.

Інколи піддаються викошуванню, випасанню та витоштуванню при русі тварин до водопою. Належить до мезогемеробних екосистем.

Фітоценоз. *Caricetum vesicariae* Br.-Bl. et Denis 1926. В угрупованні домінує *Carex vesicaria* (80-95%). До неї інколи примішуються види класу *Phragmiti-Magnocaricetea* (*Typha angustifolia*, *Galium palustre* до 10%) та інші вологолюбиві види (*Juncus effusus*, *Scirpus sylvestris*, *Equisetum palustre* до 2-5%). Дуже рідко трапляються поодинокі фанерофіти (*Betula pubescens* Ehrh., *Pinus sylvestris* L., *Alnus glutinosa* Gaertn. менше 5%) та велика кількість печіночних мохів (Зеров Д.К. 1964).

Поширення. Екосистема зустрічається на всій території кряжу. В західній частині утворює невеликі за площею монодомінантні угруповання. На сході до 5%-10% включає в себе інші види. Що можливо пов'язано із більш інтенсивною діяльністю людини.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Але має бути під постійним наглядом, так як дуже часто вміщує в себе рідкісні види орхідних, особливо із родів *Dactylorhiza* Nevski., *Orchis* L (Бумар Г.И. 1988; Бумар Г.И. 2001).

12.11.21.2 Літораль з осокою побережною.

Екотоп. Екосистема представлена евтрофними заболоченими літораллями з намитими лучними легкосуглинковими або опідзоленими ґрунтами в долинах річок. Середовище слабокисле. Вологість едафотопу 16-19 балів. Оліго- та мезогемеробні – піддаються викошуванню, випасанню та витоштуванню при русі тварин до водопою.

Фітоценоз. *Caricetum ripariae*. В угрупованні домінує *Carex ripariae* Curt. (75-80%). До неї інколи примішуються *Typha angustifolia*, *Galium palustre*, *Scirpus sylvestris*, *Equisetum palustre* (до 5-15%). Рідко в екстоні трапляються поодинокі *Betula pubescens*, *Pinus sylvestris*, *Alnus glutinosa* менше 10-15%

Поширення. Екосистема зустрічається на всій території кряжу. На сході і в центрі кряжу займає менші за площею ділянки

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Але має бути під постійним наглядом, так як дуже часто вміщує в себе рідкісні види орхідних, особливо із родів *Dactylorhiza* Nevski., *Orchis* L (Бумар Г.И. 1988; Бумар Г.И. 2001).

12.11.21.3. Літораль з осокою гострою

Екотоп. Екосистема представлена евтрофними заболоченими літораллями з намитими лучними легкосуглинковими ґрунтами заплавлі річок та старих меліоративних каналів. Середовище слабокисле. Вологість едафотопу 17-20 балів. Оліго- та мезогемеробні – піддаються викошуванню та випасанню.

Фітоценоз. *Caricetum acutae* Tx. 1937. Домінантом виступає *Carex acuta* L. (80-95%). Частка домішок осок і інших представників класу *Phragmiti-Magnocaricetea* дуже висока – до 20%. Часто зустрічаються *Glyceria fluitans* (до 10%), *Typha latifolia*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis*, *Carex vesicaria*, *Carex acutiformis* Ehrh.

Поширення. Найчастіше зустрічається на півдні Центральної частини кряжу в долині річки Норинь.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.11.22 Осоково-півнікові літоралі представлені екотопами з угрупованнями союзу *Magnocaricion elatae* W.Koch 1926.

12.11.22.1 Літораль з півниками болотними

Екотоп. Екосистема представлена евтрофними заболоченими літораліями з намитими лучними супіщаними ґрунтами в долинах річок. Середовище слабокисле. Вологість едафотопу 16-19 балів. Належить до оліго- та мезогеміробних екосистем.

Фітоценоз. *Iridetum pseudocori* Egger 1933. Домінантом виступає *Iris pseudocorus* (60-80%). Домішки осок і інших представників класу *Phragmiti-Magnocaricetea* дуже висока – до 40%. Субдомінантами частіше виступають *Typha latifolia*, *Typha angustifolia*, *Glyceria fluitans*, *Phragmites australis*, *Carex vesicaria*, *Carex acutiformis*. Флористичний склад угруповання підтверджує його проміжне становище між порядками *Magnocaricetalia* і *Phragmitetalia*.

Поширення. Екосистема локально зустрічається території кряжу в зоні формування річки Норинь, на південь від села Листвин. За межами цієї зони *Iris pseudocorus* входить до складу інших угруповань. На решті території кряжу його домінування не відмічалось.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.11.21.4 Літораль з Осокою гостроподібною

Екотоп. Екосистема представлена евтрофними заболоченими літораліями з намитими лучними легкосуглинковими намитими лучними супіщаними ґрунтами заплавлі річок та старих меліоративних каналів. Середовище слабокисле. Вологість едафотопу 17-20 балів. Оліго- та мезогеміробні – піддаються викошуванню та випасанню.

Домінантом виступає *Carex acutiformis* L. (80-95%). Частка домішок осок і інших представників класу *Phragmiti-Magnocaricetea* висока – до 20%. Часто зустрічаються *Glyceria fluitans* (до 10%), *Typha latifolia*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis*, *Carex vesicaria*, *Carex acutiformis*.

Поширення. Найчастіше зустрічається на півдні Центральної частини кряжу в долині річки Норинь.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.11.3 Літоралі з зануреними у воду низкорослими рослинами із порядком *Oenanthetalia aquatica* Hejny in Kopecky et Hejny 1956. включають 12.11.31 Літоралі поглиблень мілководних заток з замуленим дном із союзом рослинності *Oenanthion aquatica* Hejny 1948 ex Neüchaüsl 1959.

12.11.31.1 Літоралі з Стрілолистом стрілолистим

Екотоп. Екосистема представлена заплавами річок. Розташована на мілководній прибережній смузі глибиною до 0,5м. субстрат дна мулисто-піщаний слабо торфовий.

Фітоценоз. *Sagittario-Sparganietum emersi* R. Tx 1953. Угруповання моновидове з домінуванням *Sagittaria sagitifolia* L. (40-50%). Проективне покриття рослинності невисоке до 60%. Крім домінанта зустрічаються *Glyceria maxima*, *Typha angustifolia*, *Lemna minor*, *Hydrocharis morsus-renae* (не більше 5-10%).

Поширення. Екосистема зустрічається на річці Норинь, нижче за течією від села Хайча. На решті території великих угруповань з домінуванням *Sagittaria sagitifolia* не виявлено, хоча вона часто зустрічається в складі асоціації *Nympharo lutei-Nymphaetum albae*.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Вимагає постійного моніторингу на території кряжу.

12.11.4 Заплавні постійно затоплені луки з гідрофільною рослинністю з порядком *Nasturcio-Glycerietalia Pignatti* 1953 em. Kopecky in Kopecky et Hejny 1965.

12.11.41 Заплавні луки з гідрофільною рослинністю із різкими змінами рівня води з фітоценозом *Sparganio-Glycerion fluitans* Br.-Bl. et Siss. in Voer 1942.

12.11.41.1 Літоралі з Їжачою голівкою зринувшою

Екотоп. Прибережні ділянки мілководь прісноводних замкнених і слабопроточних мезотрофних водоймищ (рН 6,8-7,8) з товщею води 5-30 (інколи до 50 см) і піщаними, мулисто-піщаними донними відкладеннями

Фітоценоз. *Sparganietum emersi* Roll 1938. Рослинність з трьох ярусів надводного, наводного і підводного. Перший, густий заввишки до 70 см утворює едіфікатор за участю *Sagittaria sagittifolia* (I-20%), *Eleocharis palustris* Roem. Et Schult. (1-30%), *Myosotis palustris* L.,

Agrostis stolonifera L, (всі від 1-5 %). Другий, розріджений під'ярус утворюють *Potamogeton natans* L. (1-20 %), *Spirodela polyrhiza*, *Lemna minor*, *Hydrocharis morsus-ranae* (всі від 1-5 %). Третій, підводний, під'ярус розріджений. Його утворюють, *Ceratophyllum demersum*, *Elodea canadensis*.

Поширення. Екосистема відмічається по озерах на околицях території кряжу. Від села Пішаниця до села Переброди.

Охорона. Созологічна категорія 4. На – території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує але вимагає постійного моніторингу.

12.11.41.2 Літоралі з Лепешняком плаваючим

Екотоп. Екосистема представлена неглибокими водоймами або прибережними ділянками заплавл річок та ставків, зрідка в меліоративних канавах або по зниженнях вздовж доріг, де переважно постійно присутня вода. Ґрунти дерново-підзолисті глинисті або намиті суглинкові. Вологість 16-18 балів. Середовище з слабко кислою реакцією. Мезогемеробні, піддаються частковому викошуванню і випасанню.

Фітоценоз. *Glycerietum fluitantis* Wilczek 1935. Багатовидові угруповання з домінуванням *Glyceria fluitans* (більше 75%). Разом з нею присутні *Equisetum fluviatile* (2-5%), *Carex vesicaria* (1-5%), *Juncus effusus* (5%), *Typha angustifolia* (5%), *Scirpus sylvaticus* (до 5%).

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається по всій території кряжу. Найчастіше на межі між лісовою та скелястою частиною кряжу.

Охорона. Созологічна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.11.41.3. Літоралі з Ситнягом болотним

Екотоп. Екосистема представлена прибережними ділянками непроточних та слабопроточних водойм. Рівень води нестабільний з амплітудою коливань 30 см. при глибині 5-30 см. Ґрунти намиті лучні легкосуглинкові. Мезогемеробні, піддаються частковому викошуванню і випасанню.

Фітоценоз. *Eleocharitetum palustris* Schánnikov 1919. Переважно моновидові угруповання з домінуванням *Eleocharis palustris*. Інколи в залежності від інтенсивності коливання води та трюфності зустрічаються представники класів *Phragmiti-Magnocaricetea* (з інтенсивними коливаннями рівня води) *Lemnetae* (з малою амплітудою коливання рівня води та відносно великою глибиною) або *Videntea tripartiti* (на багатих Нітрогеном субстратах)

Поширення. Екосистема локально зустрічається території кряжу. Місцезнаходження приурочено до басейну річки Іллімка та Карпової долини. На решті території кряжу значні представництва угруповання не спостерігалися.

Охорона. Созологічна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.2. Літоралі з непостійним затопленням включають в себе екотопи заселені угрупованнями класу *Isoëto-Nanojuncetea* та деякими із класу *Videntalia tripartiti*. Вони включають в себе 12.21 Літоралі тимчасових водойм 12.21.1 Літоралі дрібних калюж; 12.21.11 Літоралі дрібних після дощових калюж.

12.21.11.1 Літоралі з Ситником жаб'ячим

Екотоп. Екосистема представлена ділянками на дні висихаючих калюж по лісових дорогах та дорогах в річкових долинах. Основними екологічними факторами які сприяють утворенню і існуванню екосистеми є надмірна волога (15-16 балів) та витоптування. Ґрунти частіше дерново-підзолисті супіщані і дуже рідко ясно-сірі і сірі опідзолені. Коливання води пов'язані з атмосферними опадами. Субстрат піщаний помірно порушений.

Фітоценоз. *Juncetum bufonii* Felföldy 1942. Характерною рисою є присутність флористичних елементів класів *Videntea tripartiti* (*Polygonum gydropiper* L, *Videns tripartita* L.) та *Plantegenetea majoris* (*Plantago major* L, *Roa annua* L). Ступінь їх присутності залежить від двох факторів: насиченості ґрунту мінеральними сполуками Нітрогену і степені витоптування (ущільнення) ґрунту. В першому випадку переважає *Videntea tripartiti* в другому *Plantegenetea majoris*, але в обох випадках домінує *Juncus bufonii* L. (60%). Рослинний покрив розріджений.

Поширення. Екосистема поширена по всій території кряжу. Зустрічається досить часто.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.22. Літоралі з непостійними затопленням. Включають до себе 12.22.1 Нітрофіковані літоралі з непостійними затопленням із порядком рослинності *Bidentalia tripartiti* Br.-Bl et Tx. 1943 та 12.22.11. Літоралі з угрупованнями де домінують однорічники нітрофіли із союзом *Bidentation tripartiti* Nodhagen 1940 (Якушенко Д.М. 2004)

12.22.11.1. Катаброво-гірчачкові літоралі

Екотоп. Екосистема представлена літоральними зонами невеликих водойм, та гідрофітних лук на багатих ґрунтах з високим вмістом мінеральних сполук Нітрогену(намиті лучні ґрунти легкосуглинкові; дерново-підзолисті глейові супіщані в поєднанні з болотними (30-50%) супіщані; лучно, муловато-, та торфувато-болотні осушені). Вологість 15-16 балів. Екосистема піддається значній антропогенній трансформації (витоптування, викошування, випасання).

Фітоценоз. *Catabroso-Polygonetum hydropiperis* Poli et J.Tx.1960. Трав'янистий покрив добре розвинутий. В угрупованні домінують *Catabrosa aquatica* Beauv. (50-95%) і *Polygonum hydropiper* (50-70%). Значну роль в рослинному покриві відіграє флора класу *Plantegenetea majoris*.

Поширення. Екосистема часто зустрічається території кряжу. Вона приурочена до річкових долин. Найбільше поширення має в долині річок Норинь і її притоках (річка Білка та безіменні притоки в Карповій та Черевківській долині).

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.22.11.2. Гірчачково-чередові літоралі

Екотоп. Екосистема представлена зволженими ділянками вздовж лісових доріг на берегах меліоративних каналів та малих річок. Перевага надається вологим (15 балів) супіщаним ґрунтам з високим вмістом нітратів.

Фітоценоз. *Polygono-Bidentetum* Lohm. 1950. Трав'янистий покрив добре розвинутий (до 90-95%). В угрупованні *Videns tripartita* (50-80%) або *Polygonum hydropiper* (50-70%). Значну роль в рослинному покриві відіграє флора класу *Plantegenetea majoris* (*Plantago major*, *Poa annua*, *Prunella vulgaris* L.) (до 10%). Часто зустрічається *Deschampsia caespitosa* Beauv (10-15%).

Поширення. Екосистема зустрічається на всій території кряжу. Її місцезнаходження пов'язані з річковими долинами, де відбувається акумуляція елементів мінерального живлення, змитих в результаті ерозії.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

12.22.11.3. Морсько-щавлеві літоралі.

Екотоп. Екосистема представлена літоральними зонами невеликих водойм, та гідрофітних лук на багатих ґрунтах з високим вмістом мінеральних сполук Нітрогену(намиті лучні ґрунти легкосуглинкові; дерново-підзолисті глейові супіщані в поєднанні з болотними (30-50%) супіщані; лучно, муловато-, та торфувато-болотні осушені). Вологість 15-16 балів. Екосистема піддається значній антропогенній трансформації (витоптування, викошування, випасання).

Фітоценоз. *Rumicetum maritime* Siss 1946. Трав'янистий покрив добре розвинутий. В угрупованні домінують *Rumex maritimi* (50-95%) і *Ranunculus sceleratus* (50-70%). Присутні види інших літоральних фітоценозів.

Поширення. Екосистема часто зустрічається території кряжу. Вона приурочена до річкових долин. Найбільше поширення має в долині річок Норинь і її притоках в районі сіл Черевки і Листвин.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

Задача 3.

На основі даних про болотні та прибережно-водні екосистеми Словечансько-Овруцького кряжу проаналізувати їхній екотонний характер.

До едафоцену 13. Перезволожені природні екосистеми належать 13.1 Заболочені ліси; 13.2. Верхові болота; 13.3. Низинні та перехідні болота. Основною диференціюючою ознакою є етап

розвитку боліт (Лопатин В.Д. 1972). Осокові болота є більш ранньою стадією розвитку а сфагнумові більш пізньою (Андриєнко Т.Л. 1982). Так як від товщини торфового шару залежить присутність видів пристосованих до проживання в цих умовах (Литвак І.П., Литвак П.В., Охрименко А.М. 1996). В болотах де тільки розпочався процес накопичення торфу переважають осоки (Смоляк Л.П., Рубан Н.Н. 1985). Коли товщина шару торфу не дозволяє корінню рослин досягати ґрунту переважають сфагнуми а також *Menyanthes trifoliata* L., *Ledum palustre* L., *Oxycoccus palustris*, *Andromeda polifolia* L. та інші види верхових боліт (Брадїс Є.М. 1969; Брадїс С.М., Бачурина Г.Ф. 1969; Брадїс Є.М., Кузьмичов А.І., Андриєнко Т.Л., Батячов Є.Б. 1973).

13.1 Заболочені ліси включають на наступних рівнях 13.11. Заболочені соснові ліси, 13.11.1. Заболочені бореальні соснові ліси (Брадїс Е.М. 1955; Григора І.М. 1976; Боч М.С., Мазинг В.В. 1979; Андриєнко Т.Л., Шеляг–Сосонко Ю.Р. 1983; Григора І.М., Воробйов С.О., Соломаха В.А. 2005)

13.11.11.1 Багново-соснові болота

Екотоп. Улоговини річкових терас і долин глибокі міжвалові депресії з лісовими оліготрофними середньо обводненими болотами з глибокими (1-3 м) перехідними верховими покладами

Фітоценоз. *Ledo-Pinetum* R. Tx. 1955. Деревостан з *Pinus sylvestris* зімкнутою 0,4-0,7, заввишки 6-9 м, IV-V бонітету. Трав'янисто-чагарничковий ярус густий (80—90%), диференційований на два під'яруси. Основний під'ярус заввишки 60-65 см утворюють *Vaccinium uliginosum* L. *Chamaedaphne calyculata* Moench. і *Ledum palustre* з покриттям 45-70 % кожен Другий ярус заввишки 25-30 см формує *Eriophorum vaginatum* L., за участю *Oxycoccus palustris*, *Andromeda polifolia*, *Drosera rotundifolia*. Моховий покрив добре виражений (85-95 %), в ньому переважають *Sphagnum cuspidatum*, *S. fallax*, *S. magellanicum*.

Основу складають бореальні болотяні види (*Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Eriophorum vaginatum*, *Oxycoccus palustris*, *Andromeda polifolia*, види роду *Sphagnum*)

Поширення. Екосистема спостерігається в річкових долинах річок Норинь, Селівониха, Червонка, Пертниця, Словечна та інших на кам'янистій частині кряжу.

Охорона. Созологічна категорія 3. На території кряжу не охороняється. Потребує охорони (Андриєнко Т.Л., Прядко О.І., Попович С.Ю. 1987).

13.11.11.2 Пухівково-соснові болота.

Екотоп. Улоговини річкових терас і реліктових долин з лісовими оліготрофними середньо обводненими болотами з глибокими (1-3 м) перехідними верховими покладами.

Фітоценоз. *Eriophoro vaginati – Pinetum* Hueck 1925. Деревостан з *Pinus sylvestris* зімкнутою 0,2-0,4, заввишки 6-8 м, IV-V бонітету. Трав'янисто-чагарничковий ярус густий (80-90%), диференційований на два під'яруси. Основний під'ярус заввишки 60-65 см утворюють *Vaccinium uliginosum* *Chamaedaphne calyculata* і *Ledum palustre* з покриттям 25-40 % кожен Другий ярус заввишки 25-30 см формує *Eriophorum vaginatum*, за участю *Oxycoccus palustris*, *Andromeda polifolia*, *Drosera rotundifolia* (Андриєнко Т.Л. 1977).. Моховий покрив добре виражений (85-95 %), в ньому переважають *Sphagnum cuspidatum*, *S. fallax*, *S. magellanicum*. Основу складають бореальні болотяні види (*Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Eriophorum vaginatum*, *Oxycoccus palustris*, *Andromeda polifolia*, види роду *Sphagnum*) (Григора І.М. 1969).

Поширення. Екосистема спостерігається в річкових долинах річок Норинь, Селівониха, Червонка, Пертниця невеликими ділянками посеред заболочених соснових лісів.

Охорона. Созологічна категорія 3. На території кряжу не охороняється. Потребує охорони (Андриєнко Т.Л., Прядко О.І., Попович С.Ю. 1987).

До морфоцену 13.2. Верхові болота належать 13.21 Журавлиново-сфагнумові болота з фітоценозом *Oxycocco-Sphagnetea*, 13.21.1 Дрібноосокові болота з домінуванням сфагнумів з фітоценозом *Sphagnetalia magellanici* Moore 1968 та 13.21.11. Дрібноосокові болота з домінуванням сфагнумів на болотних ґрунтах з фітоценозом *Sphagnion magellanici* Kästner et Flössner 1933 (Бачурина Г.Ф. 1964).

13.21.11.1. Болота з домінуванням *Sphagnum megellanici*

Екотоп. Улоговини річкових терас і реліктових долин з лісовими оліготрофними середньо обводненими болотами з глибокими (1-3 м) перехідними верховими покладами

Фітоценоз. *Sphagnetum megellanici* Kästner et Flössner 1933. Комплексні угруповання з трясовин та купин. Купини із *Eriophorum vaginatum* з пагорбками із *Pinus sylvestris*.(0,1-0,2). Покриття мохів до 90%. Основу складають бореальні болотяні види *Eriophorum vaginatum*, *Carex rostrata* Stokes., *C. limosa* L., *C. chordorrhiza* Ehrh., *Drosera rotundifolia*, *Ledum palustre*, *Andromeda polifolia*, *Охусоцус palustris*, види роду *Sphagnum*.

Поширення. Екосистема спостерігається в річкових долинах річок Норинь, Червонка, Пертниця невеликими ділянками посеред осокових боліт.

Охорона. Созологічна категорія 3. На території кряжу не охороняється. Потребує охорони (Андрієнко Т.Л., Прядко О.І., Попович С.Ю. 1987).

13.21.11.2. Болота з домінуванням *Sphagnum fuscum*.

Екотоп. Заболочені улоговини річкових терас і дно долин з лісовими оліготрофними середньо-обводненими болотами з глибокими (1-2 м) перехідними верховими покладами торфу.

Фітоценоз. *Sphagnetum fuscum*. В трясовині домінує *Sphagnum fuscum* при наявності інших сфагнумових мохів. Купини із *Eriophorum vaginatum* займають до 15-20% від загальної площі присутні типові бореальні болотяні види, *Carex rostrata*, *C. limosa*, *C. chordorrhiza*, *Drosera rotundifolia*, *Ledum palustre*, *Andromeda polifolia*, *Охусоцус palustris*,

Поширення. Екосистема спостерігається в річкових долинах річок Норинь, Червонка, Пертниця в західній частині кряжу.

Охорона. Созологічна категорія. На території кряжу не охороняється Потребує охорони (Андрієнко Т.Л., Прядко О.І., Попович С.Ю. 1987).

13.21.11.3. Пухівково-сфагнумові болота

Екотоп. Улоговини річкових терас і реліктових долин з лісовими оліготрофними середньо обводненими болотами з глибокими (1-3 м) перехідними верховими покладами

Фітоценоз. *Eriophoro vaginati-Sphagnetum fallax* Hueck 1928. Деревостан з *Pinus sylvestris* зімкнутою 0,1-0,2, заввишки 3-5 м, IV-V бонітету. Трав'янисто-чагарничковий ярус густий (80-90%), диференційований на два під'яруси. Основний під'ярус заввишки 60-65 см утворюють *Chamaedaphne calyculata* і *Ledum palustre* з покриттям 20-25 % кожен Другий ярус заввишки 25-30 см формує *Eriophorum vaginatum*, за участю *Охусоцус palustris*, *Andromeda polifolia*, *Drosera rotundifolia*. Моховий покрив добре виражений (85-95 %), в ньому переважають *Sphagnum cuspidatum*, *S. fallax*, *S. magellanicum*.

Поширення. Екосистема спостерігається в річкових долинах річок Норинь, Червонка, Пертниця невеликими ділянками посеред осокових боліт.

Охорона. Созологічна категорія 3. На території кряжу не охороняється. Потребує охорони (Андрієнко Т.Л., Прядко О.І., Попович С.Ю. 1987).

13.21.11.4. Пухівково-сонові болота

Екотоп. Екосистема займає улоговини річкових долин з лісовими оліготрофними середньо обводненими болотами з глибокими (1-2 м) перехідними верховими покладами.

Фітоценоз. *Eriophoro vaginati- Pinetum sylvestris* Hueck 1925. Деревостан з *Pinus sylvestris* зімкнутою 0,2-0,3, заввишки 3-6 м, IV-V бонітету. В трав'янисто-чагарничковому ярусі домінує *Eriophorum vaginatum* (30%). Трав'янисто-чагарничковий ярус густий (80-90%), диференційований на два під'яруси. Основний під'ярус заввишки 60-65 см утворюють *Chamaedaphne calyculata* і *Ledum palustre* з покриттям 20-25 % кожен Другий ярус заввишки 25-30 см формують *Охусоцус palustris*, *Andromeda polifolia*, *Drosera rotundifolia*. Моховий покрив добре виражений (85-95 %), в ньому переважають *Sphagnum cuspidatum*, *S. fallax*, *S. magellanicum*.

Поширення. Екосистема спостерігається в річкових долинах річок Норинь, Червонка, Пертниця невеликими ділянками посеред осокових боліт.

Охорона. Созологічна категорія 3. На території кряжу не охороняється. Потребує охорони (Андрієнко Т.Л., Прядко О.І., Попович С.Ю. 1987).

13.3. Низинні та перехідні болота включають в себе 13.31 Осокові болота з фітоценозом *Scheichzerio-Caricetea nigrae*, 13.31.1. Мезотрофні осокові болота з фітоценозом *Scheichzerietalia*

palustris Nordh. 1937 та 13.31.11 Мезотрофні осокові болота на неглибоких торф'яних ґрунтах з фітоценозом *Caricion lasiocarpae* Venden Bergh. ap. Lebrun et .all. 1949 (Брадис Е.М., Андриенко Т.Л. 1974)

13.31.11.1. Болота з Осокою пухнатоплодою

Екотоп. Улоговини терас і реліктові долини з обводнюючими оліготрофними і мезотрофними болотами з перехідними і змішаними верховими торф'яними покладами, часто в низовинах з кислим субстратом.

Фітоценоз. *Caricetum lasiocarpae* Koch 1926. Деревний і чагарниковий яруси відсутні. Трав'яний ярус розріджений (45-50%). У монодомінантних співтовариствах одноярусний, утворений домінантою (20-40 %), а також субдомінантними *Menyanthes trifoliata* і *Oxycoccus palustris* (по 10-15 %). У осокових співтовариствах є розріджений (10-15 %) верхній ярус з осок – *Carex lasiocarpa* Ehrh. або *C. limosa*, *C. rostrata*. *Sphagnum fallax*, іноді *S. palustre*, *S. obtusum*. Основу складають бореальні види сфагнових боліт (*Carex lasiocarpa*, *C. limosa*, *C. rostrata*, *C. chordorrhiza*, *Rhynchospora alba* Vahl., *Menyanthes trifoliata*).

Поширення. Рівномірно поширені по річковим долинам всього кряжу.

Охорона. Созологічна категорія 3. Екосистема на території кряжу охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує (Балашев Л.С., Андриенко Т.Л., Кузьмичев А.И., Григора И.М. 1982).

До 13.31.1. Мезотрофних осокових боліт належать 13.31.12 Мезотрофні осокові болота на глибоких торф'яних ґрунтах з фітоценозом *Rhynchosporion albae* Koch 1926.

13.31.12.1 Болота з Осокою Багнувою

Екотоп. Екосистема представлена улоговинами терас і реліктовими долинами з обводнюючими оліготрофними і мезотрофними болотами із перехідними і змішаними верховими торф'яними покладами, часто в низовинах з кислим субстратом. Торфи не розкладені або слабо розкладені.

Фітоценоз. *Caricetum limosae* Br.-Bl. 1921. Деревний і чагарниковий яруси відсутні. Трав'яний ярус розріджений (45—50%). У монодомінантних осокових угрупованнях одноярусний, утворений домінантою (20— 40 %), а також субдомінантними (%). У осокових співтовариствах є розріджений (10—15 %) верхній ярус з осок — *Carex lasiocarpa*, *C. rostrata*. *Sphagnum fallax*, іноді *S. palustre*, *S. obtusum* (по 10—15 %).

Поширення. Екосистема зустрічається в південно-західній частині кряжу. Займає долини річок Норинь, Селівониха, Пертниця. Площі екосистем невеликі не більше 0,1-0,2 га.

Охорона. Созологічна категорія 3. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Необхідне проведення постійного моніторингу стану екосистеми на території кряжу (Балашев Л.С., Андриенко Т.Л., Кузьмичев А.И., Григора И.М. 1982).

До 13.31 Осокових боліт належать 13.31.2 Осокові болота понижень рельєфу із слабо кислою реакцією ґрунту з фітоценозом *Caricetalia nigra* Koch 1926 em Nordh. 1937 та 13.31.21 Осокові болота на намитому ґрунті із слабо кислою реакцією з фітоценозом *Caricion nigrae* Koch 1926 em Klika 1934.

13.31.21.1 Болота з Осокою чорною та Ситником жаб'ячим

Екотоп. Екосистема представлена улоговинами річкових терас і долин, глибокими міжваловими депресіями з лісовими оліготрофними середньо обводненими болотами з глибокими (1—3 м) перехідними верховими покладами. Середовище субстрату кисле. Вологість едафотопу 17-19 балів.

Фітоценоз. *Caricetum nigrae* Br.-Bl. 1915. В багатовидовому угрупованні домінує *Carex nigra* Reichard. (50-75%) субдомінантою є *Juncus effusus* (15-25%) (Андриенко Т.Л. 1983). Види союзу *Caricion nigrae*: *Ranunculus flammula* L. і *Stellaria palustris* Retz. займають 5-10%. Серед видів класу *Scheichzerio-Caricetea nigrae* зрідка зустрічається *Eriophorum polystachyon* L. (менше 2-5%). Серед інших часто зустрічаються *Pinus sylvestris*, *Betula pubescens* та *Molinia caerulea* Moench. (до 15-20%). Це пов'язано з тим що екосистема розміщується в заглиблення посеред соснового лісу представленого асоціацією *Molinia-Pinetum*.

Деревний ярус створює *Pinus sylvestris*, *Betula pubescens*, трав'янисто-чагарничковий - *Carex nigra*, *Juncus effusus*, *Molinia caerulea*, *Juncus conglomeratus* L. та зрідка *Vaccinium uliginosum*. Моховий ярус представлений *Sphagnum cuspidatum*, *S. fallax*, *S. tagellanicum* з домішками мохів роду *Polytrichum*.

Поширення. Екосистема зустрічається території скелястої частини кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 3. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Вимагає постійного моніторингу як місце зростання рідкісних видів (Андриєнко Т.Л.1975; Балашев Л.С., Андриєнко Т.Л., Кузьмичев А.И., Григора И.М. 1982).

Задача 4.

На основі даних про лісові та чагарникові екосистеми зробити аналіз їхнього динамічного стану.

14.1 Ліси і чагарники на четвертому рівні розділяються на 14.11. Вологі листяні ліси з фітоценозом *Alnetea glutinosae*, 14.12. Широколистяні ліси з фітоценозом *Querceto-Fagetea*, 14.13. Мішані ліси з фітоценозом *Quercetea robori-petraeae*, 14.14.. Хвойні ліси з фітоценозом *Vaccinio-Piceetea*, 14.15. Чагарники на лесових ґрунтах з фітоценозом з фітоценозом *Rhamno-Prunetea*, 14.16. Напівприродні екосистеми лісів і чагарників створені під впливом антропогенних чинників з фітоценозом *Robinitea*, 14.17. Ліси на початкових сукцесійних стадіях відновлення, 14.18. Вторинні післялісові ліси та чагарники з фітоценозами *Epilobietea angustifoliae* та *Urtico-Sambucetea* (Сукачев В.И. 1957; 1972; Поварніцин В.О. 1959; Анучин Н.П. 1977).

14.11. Вологі листяні ліси (*Alnetea glutinosae*), представляють на нижчих рівнях 14.11.1. Гігрофітні та гігромезофітні листяні ліси з фітоценозом *Alnetalia glutinosae* R.Tx. 1937, 14.11.11. Вільхові ліси з фітоценозом *Alnion glutinosae* Meijer Drees 1936 (Поварніцин В.О. 1971).

14.11.11.1. Вільхові ліси на багатих ґрунтах

Екотоп. Екосистема представлена пониженими ділянками річкових долин, прибережними ділянками, міжваловими депресіями за умови наявності водонепроникного горизонту. Ґрунти намиті лучні легкосуглинкові, намиті опідзолені та дерново-підзолисті супіщані, дерново-підзолисті сильноглейові піщані. Вологість 16-19 балів. Середовище слабокисле (рН 4,2-4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 0,5-1,0% та гумусу 1.2-1.5 млн. Мдж'га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоптуванню, викошуванню, і випасанню.

Фітоценоз. *Ribeso nigri-Alnetum* SOL.-GORN. 1987. Деревостан сформований *Alnus glutinosa* (75-90 %) зрідка трапляється *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris*, *Carpinus betulus* L. В підліску зімкненістю 30% переважають *Salix pentandra* L., *Frangula alnus* Mill. та зрідка трапляється *Salix caprea* L. Травостан зімкненістю 90-100% сформований *Urtica dioica* L. (5-15%), *Galium rivale* Griseb. (5-10%) *Poa trivialis* L. (5%), *Geum rivale* L. (5%) та рядом представників класу *Molinio-Arrhenatheretea* та *Phragmiti-Magnocaricetea*.

Поширення. Екосистема зустрічається по всій території кряжу. Найчастіше вона зустрічається в межах річкових долин лесової частини кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.11.11.2. Вільхові ліси на бідних ґрунтах

Екотоп. Екосистема представлена пониженнями річкових долин. Ґрунти лучно, муловато-, та торфувато-болотні осушені, намиті опідзолені та дерново-підзолисті супіщані. Вологість 14-18 балів. Середовище слабокисле (рН 4,0-4,3), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 0,5-1,0% та гумусу 1,1-6,5 млн. Мдж'га. Мезо- олігогемеробна екосистема що піддається витоптуванню, збору рослин і випасанню.

Фітоценоз. *Sphagno squarrosi-Alnetum* SOL.-GORN. 1987. Деревостан сформований *Alnus glutinosa* (40%), *Betula pubescens* (5%), *Pinus sylvestris* (5%). В підліску зімкненістю 20 % переважають *Betula pubescens* і *Frangula alnus*. Травостан зімкненістю 50% сформований *Carex elongata* L., *Carex vesicaria*, *Scirpus sylvaticus*. Моховий покрив (40%) складається переважно з *Sphagnum squarrosum* (25%).

Поширення. Екосистема зустрічається на скелястій частині території кряжу. Частіше вона знаходиться за 1-3 км від витоку річок і до їх виходу на рівнину.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Вимагає постійного моніторингу так як має важливе значення для підтримання водного балансу річок і прирічкових територій.

14.11.11.3. Комишово-вільхові ліси

Екотоп. Екосистема представлена заболоченими пониженнями річкових долин. Ґрунти лучно, муловато-, та торфувато-болотні осушені, наміті опідзолені та дерново-підзолисті ґрунти супіщані. Вологість 14-18 балів. Середовище слабокисле (рН 4,0-4,3), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 0,5-1,0% та гумусу 1,1-6,5 млн. Мдж\га. Мезо- олігогемеробна екосистема що піддається витоштуванню, збору рослин і випасанню.

Фітоценоз. com. *Scirpus sylvestris*-*Alnus glutinosa*. Деревостан сформований *Alnus glutinosa* (80%) дуже рідко з поодинокими особинами *Pinus sylvestris*, *Populus tremula* L., *Betula pubescens*, *Betula pendula*. В підліску зімкненістю 20% переважають *Frangula alnus* (5-10%) та *Salix pentandra* (1-5%). Травостан зімкненістю 90-100% сформований *Scirpus sylvaticus* (75-90%), *Thelypteris palustris* Schott. (1%) *Carex elongata* (1%), *Carex vesicaria* (2%), *Galium rivale*(1%), *Poa trivialis* (3%), *Geum rivale* (1%) (Григора І.М. 1971).

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається по всій території кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.11.11.4. Гостровидно-осоково вільхові ліси

Екотоп. Екосистема представлена заболоченими пониженнями річкових долин. Ґрунти лучно, муловато-, та торфувато-болотні осушені. Вологість 15-18 балів. Середовище слабокисле (рН 4,0-4,3), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 0,5-1,0% та гумусу 1,1-6,5 млн. Мдж\га. Мезо- олігогемеробна екосистема що піддається викошуванню, витоштуванню та випасанню.

Фітоценоз. *Carici acutiformis*-*Alnetum Scamoni* 1935. Деревний ярус розріджений монодомінантний із *Alnus glutinosa* (40-75%), зрідка зустрічаються чагарники із видів роду *Salix* L (Андрієнко Т.Л. 1980). Травостан зімкненістю 90-95% сформований із домінуючої *Carex acutiformis* (більше 80%). Зрідка трапляються *Scirpus sylvaticus* (до 5%), *Carex elongata* (2-3%), *Carex vesicaria* (2%), *Galium rivale* (2%), *Poa trivialis* (1%), *Geum rivale* (1%).

Поширення. Екосистема займає декілька локалітетів на північному березі річки Норинь.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.11.11.5. Видовжено осоково-дубові ліси

Екотоп. . Екосистема представлена заболоченими пониженнями річкових долин. Ґрунти лучно, та торфувато-болотні. Вологість 14-16 балів. Середовище слабокисле (рН 4,0-4,3), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 0,5-1,0% та гумусу 1,1-6,5 млн. Мдж\га. Олігогемеробна екосистема, що піддається низькому рекреаційному тиску.

Фітоценоз. *Carici elongatae-Quercetum Socol*. 1972. В деревному ярусі домінують *Alnus glutinosa* (40-50%) і *Quercus robur* L. (50-60%). Зрідка трапляється *Pinus sylvestris*, *Populus tremula*, *Betula pubescens*, *Betula pendula*. В трав'янисто-чагарничковому ярусі домінує *Carex elongata* (більше 80%). Часто зустрічаються бореальні види *Vaccinium myrtillu* (до 20%), *Trientalis europaea* L. (1-2%), *Luzula pilosa* Willd., *Pyrola rotundifolia* L., *Maianthemum bifolium* F. W. Schmidt. Також постійно присутній *Chrysosplenium alternifolium* L. (до 5%) (Григора І.М. 1972).

Поширення. Зустрічається в кількох локалітетах біля витоків ріки Норинь. Найбільш характерні ділянки розташовані на захід від села Листвин.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Потребує постійного моніторингу і може претендувати на включення до списку екосистем (біотопів), що потребують охорони.

14.11.11.6. Болотно-папоротево березові ліси

Екотоп. Екосистема представлена пониженнями річкових долин. Ґрунти лучно, торфувато-болотні, супіщані. Вологість 14-18 балів. Середовище слабокисле (рН 4,0-4,3), карбонатів (CaCO₃,

MgCO₃) 0,5-1,0% та гумусу 1,1-6,5 млн. Мдж\га. Мезо- олігогемеробна екосистема що піддається витоπτуванню, збору рослин і випасанню.

Фітоценоз. *Betula pubescens*-*Thelypteris palustris* Czerw 1972. Деревостан розріджений, сформований, *Betula pubescens* (30-50%)із *Alnus glutinosa* (5%) *Pinus sylvestris* (5%). В підліску зімкненістю 20 % переважають *Betula pubescens* і *Frangula alnus*. Травостан зімкненістю 50% сформований *Carex elongata*, *Carex vesicaria*, *Scirpus sylvaticus*. Моховий покрив (40%) складається переважно з *Sphagnum tagellanicum* S. fallax, *S squarrosum* (Григора І.М. 1972).

Поширення. Екосистема поширена в західній частині кряжу та на його північній околиці.

Охорона. Созологіна категорія 3. Екосистема на території кряжу не охороняється. Потребує постійного моніторингу через присутність великої кількості рідкісних видів.

14.11.2. Вологі листяні ліси і чагарники з фітоценозом *Salicetalia aurite* Doing 1962 представлені на шостому рівні 14.11.21. Гігромезофітними чагарниками з фітоценозом *Salicion cinereae* Th. Müller et Görs ex Passarge 1961.

14.11.21.Верболози з верб п'ятитичинкової та попелястої

Екотоп. Екосистема представлена дном річкових долин та лесових балок. Ґрунти намиті лучні ґрунти легкосуглинкові та намиті опідзолені та дерново-підзолисті ґрунти супіщані. Вологість 14-17 балів. Середовище слабокисле (рН 4,3-4,7), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 1-2% та гумусу 1,3-1,7 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема що піддається витоπτуванню, частковій рубці і випасанню.

Фітоценоз. *Salicetum pentandro-cinereae* Passarge 1961. В чагарниковому ярусі зімкненістю 80% переважають *Salix pentandra*, *Salix cinerea* рідше *Acer negundo* L., *Salix mirsinifolia* L. Травостан зімкненістю 75% сформований *Juncus effusus* (10-20%), *Lysimachia vulgaris* L. (5-25%), *Deschampsia caespitosa* (10-25%).

Поширення. Екосистема зустрічається по всій території кряжу. В балках домінантом частіше стає *Salix mirsinifolia*.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.12. Широколистяні ліси з ектопами заселеними угрупованнями класу *Quercus-Fagetea* далі розділяються за флористичними ознаками (Шеляг–Сосонко Ю.Р. 1974; 1982; Клеопов Ю.Д. 1990). На п'ятому рівні вони включають 14.12.1. Мезогігрофітні і мезофітні широколистяні ліси на багатих та середньо багатих ґрунтах з фітоценозом *Fagetalia sylvaticae* Pawlowski 1928. 14.12.2. Термофільні освітлені діброви з фітоценозом *Quercetalia pubescenti-petreae* Klika 1933 (Якушенко Д.М. 2002). Перші на шостому розділяються на 14.12.11. Мезогігрофітні широколистяні ліси на багатих ґрунтах з фітоценозом у вигляді союзу рослинності *Alno-Ulmion* Br.-Bl. et R.Tx. 1943 та 14.12.12. Мезофітні широколистяні ліси на багатих та середньо багатих ґрунтах з фітоценозом *Carpinion betuli* Issier 1931.

14.12.11.1. Широколистяні вологі зірчничково-вільхові ліси

Екотоп. Екосистема розміщена на дні балки на намитих лучних ґрунтах легкосуглинкових. Вологість 14-16 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-5,6), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 2-4 % та гумусу 1,5-1,7 млн. Мдж\га. А- олігогемеробна екосистема.

Фітоценоз. *Stellario nemorum-Alnetum glutinosae* Lohm 1957. Одноярусний або двох'ярусний деревостан утворює *Quercus robur*, а в другому, якщо він виражений, *Carpinus betulus* і *Tilia cordata* Mill. У невеликій кількості зустрічаються також *Acer platanoides* L, *Ulmus glabra* Huds.. У віці 70-140 років має зімкнуту крон 0,8-1,0, висоту 20-32 м і I або II бонітет. Підлісок дуже розріджений і представлений окремими кущами звичайних неморальних видів (*Corylus avellana* L., *Swida sanguinea* Oriz., *Euonymus europaea* L.). Трав'янистий ярус густий (50-70 %).

Поширення. Екосистема зустрічається на заході лесової частини території кряжу. Відмічається дві зони поширення – Городецько-Антоновицька та Білківсько-Листвинська

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Вимагає режиму постійного моніторингу.

14.12.11.2. Широколистяні вологі зірчничкові-вільхові ліси з цибулею ведмежою.

Екотоп. Екосистема розміщена на дні балки на намитих лучних ґрунтах легкосуглинкових. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезогірофітні, мезогуміфільні, та від нітрофільні, , олігогамедебні.

Фітоценоз. *Stellario nemorum-Alnetum glutinosae* var. *Allium ursinum*. Одноярусний або двох'ярусний деревостан утворює *Quercus robur*, а в другому, якщо він виражений, *Carpinus betulus* і *Tilia cordata*. У невеликій кількості зустрічаються також *Acer platanoides*, *Ulmus glabra*. У віці 70-140 років має зімкнуту крону 0,8-1,0, висоту 20-32 м і I або II бонітет. Підлісок дуже рідкісний і представлений окремими кущами звичайних неморальних видів (*Corylus avellana*, *Euonymus europaeus*). Трав'янистий ярус густий (50-70 %) з *Allium ursinum* L. з незначною домішкою звичайних видів широколистяних лісів.

Поширення. Екосистема відмічена в балці на дні яру в 1,5 км на схід від села Городець.

Охорона. Созологічна категорія 3. Екосистема на території кряжу не охороняється.

14.12.11.3. Широколистяні вологі вільхові трясунковидноосокові ліси.

Екотоп. Екосистема представлена пониженими ділянками річкових долин, прибережними ділянками, міжваловими депресіями за умови наявності водонепроникного горизонту. Ґрунти намиті лучні легкосуглинкові, намиті опідзолені та дерново-підзолисті супіщані, дерново-підзолисті сильноглейові піщані. Вологість 16-19 балів. Середовище слабокисле (рН 4,2-4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 0,5-1,0% та гумусу 1,2-1,5 млн. Мдж/га. Мезогемербна екосистема що піддається витоштуванню, викошуванню, і випасанню.

Фітоценоз. *com. Carici brizoidi-Alnus glutinosa*. Деревостан сформований із *Alnus glutinosa* (80%). В підліску зімкненістю 20% переважають *Frangula alnus* (10-15%), *Padus avium* Mill. (5%), *Corylus avellana* (5%). Травостан зімкненістю 75-90 % сформований в основному із *Carex brizoides* L. Угрупування займає проміжне становище між союзами *Alno-Ulmion* та *Alnion glutinosae*.

Поширення. Екосистема зустрічається на сході скелястої частини території кряжу

Охорона. Созологічна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.12.11.4 Широколистяні вологі калюжничево-вільхові ліси

Екотоп. Екосистема представлена пониженими ділянками річкових долин та прибережними ділянками. Ґрунти намиті лучні легкосуглинкові, намиті опідзолені та дерново-підзолисті супіщані, дерново-підзолисті сильноглейові піщані. Вологість 16-19 балів. Середовище слабокисле (рН 4,2-4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 0,5-1,0% та гумусу 1,2-1,5 млн. Мдж/га. Мезогемербна екосистема що піддається витоштуванню, викошуванню, і випасанню.

Фітоценоз. *Caltho laetae-Alnetum Stuchlik 1968*. Деревостан сформований із *Alnus glutinosa* (80%). В підліску зімкненістю 20% переважають *Frangula alnus* (10-15%), *Padus avium* Mill. (5%), *Corylus avellana* (5%). Травостан зімкненістю 75-90 % сформований в основному із *Caltha palustris* L. Часто зустрічаються *Cardamine pratensis*, *Equisetum palustre*, *Filipendula ulmaria*, *Myosotis palustris*. В моховому ярусі переважає *Sphagnum squarrosum*. Угрупування займає проміжне становище між союзами *Alno-Ulmion* та *Alnion glutinosae*.

Поширення. Екосистема зустрічається на сході скелястої частини території кряжу

Охорона. Созологічна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

Спорадично по лесовій території кряжу зустрічаються угруповання, які можна вважати близькими до асоціації *Fraxino-Alnetum* W. Mat. 1952. Деревостан складається із *Fraxinus excelsior* (10-30%), *Quercus robur* (10-25%), *Populus tremula* (10%), *Carpinus betulus* (5-10%). Чагарниковий ярус представлений *Padus avium*, *Corylus avellana*, *Euonymus verrucosa*, *Viburnum opulus*. Травостан з проєктивним покриттям (30-40%) складається із *Aegopodium podagraria*, *Pulmonaria obscura*, *Anemone nemorosa*, *Stellaria nemorum*. Через невеликі площі угруповань (40-100 м²) розкиданих по території кряжу (на північний захід від села Велідники, на південь від села Можари, на північний захід від села Кобилин) екотопи із цими угрупованнями не виділені, як окрема екосистема.

14.12.12. Мезофітні широколистяні ліси на багатих та середньо багатих ґрунтах представлені великою різноманітністю екосистем на сьомому рівні (Якушенко Д.М. 2001).

14.12.12.1 Широколистяні грабово-липові ліси

Екотоп. Екосистема розміщена на схилах лесових балках з виходами рихлих супіщаних та легко суглинистих порід. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних мезогуміфільні, та субнітрофільні, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, олігогамеробні.

Фітоценоз. *Tilio cordatae-Carpinetum* Iss.1 1931 em. Oberd. 1953. Деревостан двох'ярусний. Перший ярус утворює незначною участю *Acer platanoidis* У віці 80-100 років має зімкнуту крон 0,8-1,0, висоту 22-30 м і I або II бонітет. Другий ярус *Carpinus betulus*. У прорідженому підліску зустрічаються *Corylus avellana* (0,1-0,2), *Euonymus verrucosa* Scop., *E. europaea*, *Tilia cordata*. У середньогустомутравостої (35-55 %) переважають *Carex pilosa* Scop. або *Aegopodium podagraria* L., З супутніх видів з проектним покриттям до 5 % звичайні *Stellaria holostea* L., *Asarum europaeum* L., *Galeobdolon luteum* Huds., *Pulmonaria obscura* Dumort., *Stellaria nemorum* L.

Поширення. Екосистема розміщена від балок на захід від лінії Оленичи-Кобилин до лінії Бігунь-Городець.

Охорона. Созологічна категорія 4. На території кряжу екосистема не охороняється.

14.12.12.2. Широколистяні липово-кленові ліси

Екотоп. Екосистема займає схили різної експозиції і крутизни горбів, балок річкових долин, а також плакорні ділянки. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті супіщані, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних від субгумільних до мезогуміфільних, та від субнітрофільних до гемінітрофільних, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, олігогамеробні.

Фітоценоз. *com. Acer platanoides-Tilia cordatae*. Деревостан сформований *Tilia cordatae* (10-20%), *Acer platanoides* (5-20%), *Carpinus betulus* (5-15%), *Quercus robur* (5%), *Populus tremula* (1-2%). В підліску зімкненістю 40-60% переважають *Corylus avellana* (20-30%), *Euonymus verrucosus* (5%) зрідка трапляється *Lonicera xilosteam* L. Травостан зімкненістю 20% сформований *Pulmonaria obscura* (1-5%), *Stellaria holostea* (1-5%), *Galeobdolon luteum* (2%), *Carex pilosa* (1-5%), *Anemona nemorosa* L. (10%) *Hepatica nobilis* Mill. (1-3%).

Поширення. Екосистема зустрічається на території кряжу в районі сіл Городець, Антоновичи, Задорожок.

Охорона. Созологічна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. (Шеляг–Сосонко Ю.Р. 1969; Якушенко Д.М. 2004)

14.12.12.3. Широколистяні грабово-перестрічкові ліси

Екотоп. Екосистема займає схили різної експозиції і крутизни горбів, балок річкових долин, а також плакорні ділянки. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті супіщані, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних від субгумільних до мезогуміфільних, та від субнітрофільних до гемінітрофільних, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, олігогамеробні.

Фітоценоз. *Melampyrum nemorosi-Carpinetum* Pass. 1957. Одноярусний деревостан утворює *Quercus robur* або *Carpinus betulus* з участю *Betula pendula*, *Acer platanoides*, *Populus tremula*. У підліску (0,2—0,4) переважає, *Sorbus aucuparia*, *Corylus avellana*, *Frangula alnus* за участю *Euonymus verrucosa*. Трав'янистий ярус, проектне покриття якого в різних асоціаціях коливається від 25 до 60 %, складений із неморальних тіньюлюбивих видів *Melampyrum nemorosum* L. (5-10%), *Stellaria holostea* (5%), *Anemona nemorosa* (5-10%), *Carex pilosa* (1%), *C. brizoides* (до 10%).

Поширення. Екосистема зустрічається території кряжу на місці відновлення лісу природним шляхом після вирубки (через 15-30 років) освітлених старих дубових лісів.

Охорона. Созологічна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Вимагає процесу постійного моніторингу.

14.12.12.4. Широколистяні грабово-зеленчукові ліси

Екотоп. Екосистема займає схили різної експозиції і крутизни горбів, балок річкових долин, а також плакорні ділянки. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті супіщані, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані. Кислотність рН

4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних від субгумільних до мезогуміфільних, та від субнітрофільних до гемінітрофільних, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, олігогамеробні.

Фітоценоз. *Galeobdolon luteae-Carpinetum* Shevchyk et al. 1996. Одноярусний деревостан утворює *Carpinus betulus* з участю *Quercus robur*, *Betula pendula*, *Tilia cordata*, *Acer platanoides*, *Fraxinus excelsior* L., *Populus tremula*. У віці 50-100 років він має зімкнуту крону 0,8-1,0, висоту 15-25 м і I-II. У підліску (0,2-0,6) переважає *Euonymus verrucosa*, *E. europaea*, *Sorbus aucuparia* L., *Corylus avellana*, за участю *Frangula alnus* і *Swida sanguinea*. Трав'янистий ярус, проектне покриття якого в різних асоціаціях коливається від 25 до 60 %, складений із неморальних тіньолюбивих видів *Galeobdolon luteum*, *Asarum europium*, *Stellaria holostea*, *Anemona nemorosa*, *Aegopodium podagraria*, *Carex breviculcus* DC., *C. pilosa*, *C. brizoides*.

Поширення. Екосистема утворює дві територіальні одиниці локально зосереджені в районі сіл Городець, Антоновичи та Задорожок і характеризують межу двох геоботанічних районів. Перша одиниця знаходиться на лінії Городець-Задорожок і пов'язана із дерново-підзолистими кам'янистими ґрунтами, друга – в зоні між вищевказаними населеними пунктами пов'язана з балками в лесових осадових породах.

Охорона. Созологічна категорія 4. На території кряжу екосистема не охороняється.

14.12.12.5. Широколистяні грабово-дубові волосистоосокові ліси

Екотоп. Рівнинні ділянки нешироких плакорів, а також схили різної крутизни і експозиції горбів, річкових долин і балок з ясно-сірими і сірими опідзоленими сильнозмитими супіщаними свіжими вологими ґрунтами на лесах. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних мезогуміфільні та субнітрофільні, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, олігогамеробні.

Фітоценоз. *Carici pilosae-Carpinetum* R. Neuhausl et Z. Neuhauslova 1964 Деревостан двох'ярусний. Перший ярус утворює *Quercus robur* за участю *Fraxinus excelsior*, *Acer pseudoplatanus*, *Ulmus glabra*. Другий, як правило густіший, ярус формує *Carpinus betulus* за участю *Tilia cordata*, *Acer platanoides*. Загальна зімкнута крона рівна 0,9-1,0, висота у віці 70-90 років досягає 22-26 м при I або II бонітеті. Підлісок самостійний ярус не формує. Він представлений окремими екземплярами *Euonymus verrucosa*, *E. europaea*, *Corylus avellana*. Трав'янистий ярус, як правило, рідкий (20-30%). У ньому переважають *Carex pilosa*, а у вологіших умовах злегка понижених ділянок або нижньої частини схилів *Aegopodium podagraria*. Окрім них з проектним покриттям 1-5 % зустрічаються *Stellaria holostea*, *Asarum europaeum*, *Galeobdolon luteum*, *Viola reichenbachiana* Jord. Ex. Boreau., і з меншим – *Convallaria majalis* L., *Geum urbanum* L., *Pulmonaria obscura*, *Scrophularia nodosa* L., *Campanula rapunculoides* L., *Polygonatum multiflorum* All., *Ranunculus cassubicus* L.

Поширення. Екосистема локально розміщена в балках між населеними пунктами Городець і Антоновичи.

Охорона. Созологічна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється.

14.12.12.6. Широколистяні грабово-зірочникові ліси

Екотоп. Екосистема займає схили пагорбів, балок річкових долин, а також плакорні ділянки. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті супіщані, ясно-сірі і сірі опідзолені середньозмиті легкосуглинкові, дерново-підзолисті малорозвинені сильнокамяністі глинисто-піщані на елювії кристалічних порід, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані та виходи рихлих осадових лесових порід. Кислотність рН 4,5-5,6.

Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних від субгумільних до мезогуміфільних, та від субнітрофільних до гемінітрофільних, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, олігогамеробні.

Фітоценоз. *Stellario-Carpinetum* Oberd 1957. Одноярусний деревостан утворює *Quercus robur* або *Carpinus betulus* з участю *Betula pendula*, *Tilia cordata*, *Acer platanoides*, *Fraxinus excelsior*, *Populus tremula*. У віці 50-100 років він має зімкнуту крону 0,8-1,0, висоту 15-25 м і I-II. У підліску (0,2-0,6) переважає *Euonymus verrucosa*, *E. europaea*, *Sorbus aucuparia*, *Corylus avellana*, за участю *Frangula alnus* і *Swida sanguinea*. Трав'янистий ярус, проектне покриття якого в різних асоціаціях

коливається від 25 до 60 %, складений із неморальних тіньолюбивих видів *Asarum europium*, *Stellaria holostea*, *Anemona nemorosa*, *Aegopodium podagraria*, *Carex breviculus*, *C. pilosa*, *C. brizoides*.

Поширення. Екосистема розташована на схилах вершин (переважно північної експозиції) на території Червонсько-Городецького геоботанічного району ацидофільних скельнодубових та дубових лісів та в балках західної частини Овруцького геоботанічного району дубово-грабових лісів. Найбільші масиви на кам'янистій зосереджені на південний захід від лінії Листвин-Задорожок-Городець та на північ від лінії Тхорин-Нагоряни. На лесовій частині кряжу на схід від лінії Нові Велідники-Оленичі екосистема зустрічається у вигляді невеликих локалітетів площею біля 0,01 га. Між лініями Верпа–Листвин та Велідники-Оленичі має більші площі і займає по 0,05-0,1 га вздовж дна балок. На захід від лінії Верпа–Листвин балки лесової частини (особливо борти і прибортові схили) представлені саме цією екосистемою. Характерною рисою східних територій зайнятих екосистемою є присутність на її екотонах великої кількості *Lonicera xilosteum*.

Охорона. Созологічна категорія 4. На території кряжу екосистема не охороняється

14.11.12.7. Широколистяні грабові зірочниково-плющові ліси

Екотоп. Екосистема займає плакори та схили пагорбів з дерново-підзолистими середньокам'янистими ґрунтами. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних, мезогуміфільні, гемінітрофільні, олігогемеробні та агемеробні.

Фітоценоз. *Stellario-Carpinetum* var. *Hedera helix*. Деревостан різновіковий, двох'ярусний. У першому ярусі *Quercus robur*, в другому – *Carpinus betulus*. В меншій кількості присутні *Betula pendula*, *Populus tremula*, *Acer platanoides*. У наземному покриві переважає *Hedera helix* L. (50—80%) (іноді підіймається по стовбурам дерев до висоти 5 м), *Asarum europaeum*, *Maianthemum bifolium*, *Oxalis acetosella* L., *Stellaria holostea*, *Polygonatum odoratum* (Таргонський П.Н., Примак М.Б. 1980).

Поширення. Екосистема займає одну локальну ділянку і пролягає від плакору на висоті 265 м до схилів річкової долини 240-250 м.

Охорона. Созологічна категорія 3. Охороняється в ботанічному заказнику «Плющ» Кв 8,13. Городецького лісництва Словечанського держлісгоспу

14.11.12.8 Широколистяні грабово-дубові пальчатоосокові ліси

Екотоп. Рівнинні ділянки плакорів, а також схили малої крутизни північної експозиції горбів, річкових долин і балок з ясно-сірими і сірими опідзоленими сильнозмитими супіщаними свіжими вологими ґрунтами на лесах. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних мезогуміфільні, та від субнітрофільні, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, олігогамеробні.

Фітоценоз. *Carici digitatae-Carpinetum* Kramarets et V.SI 1995 in V.SI. 1995. Деревостан двох'ярусний. Перший ярус утворює *Quercus robur* за участю *Fraxinus excelsior*, *Acer pseudoplatanus*, *Ulmus glabra*. Другий, формує *Carpinus betulus* за участю *Tilia cordata*, *Acer platanoides*. Загальна зімкнута крон рівна 0,9-1,0, висота у віці 70-90 років досягає 22-26 м при I або II бонітеті. Підлісок представлений окремими екземплярами *Corylus avellana*. Трав'янистий ярус, як правило, рідкий (20-30%). У ньому переважають *Carex digitata*, а у вологіших умовах злегка понижених ділянок або нижньої частини схилів *Aegopodium podagraria*. Окрім них з проектним покриттям 1-5 % зустрічаються *Stellaria holostea*, *Asarum europaeum*, *Galeobdolon luteum*, *Maianthemum bifolium*, і з меншим – *Convallaria majalis* L., *Geum urbanum* L., *Pulmonaria obscura*, *Scrophularia nodosa* L., *Campanula rapunculoides* L., *Polygonatum multiflorum* All., *Ranunculus cassubicus* L.

Поширення. Екосистема локально розміщена в балках між населеними пунктами Городець і Антоновичи.

Охорона. Созологічна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється.

14.12.2. Термофільні освітлені діброви з фітоценозом *Quercetalia pubescenti-petreae* Klika 1933 corr. Moravec in Veg. et Theurill 1984 останнім часом сильно скоротили свої площі (Didukh Ya. P. 1996). З 1995 року в результаті вирубки та природної трансформації рослинності зникли дві ділянки зайняті екосистемою 14.12.21. Мезофітні освітлені кварцетальні діброви з фітоценозом *Potentillo albae-Quercion petreae* Br.-Bl. 1932 em Rivas-Martinez 1972.

14.12.21.1 Діброви з перстачем білим.

Екотоп. Екосистема розміщена на південних схилах пагорбів. Ґрунти ясно-сірі і сірі лісові. Кислотність рН 5-5,6. Едафічні умови мезофітні, мезогуміфільні, гемінітрофільні. Олігогемеробна, в умовах мезогемеробії швидко скорочує свої площі і часом зникає.

Фітоценоз. *Potentillo albae-Quercetum* Libb 1933. В деревному ярусі домінує *Populus tremula* (50-75%), часто зустрічаються *Betula pendula*, *Quercus robur*, *Carpinus betulus*, *Acer platanoides*. В травостані часто зустрічаються *Potentilla alba* L., *Betonica officinalis* L. s. I., *Campanula persicifolia* L., *Convallaria majalis* L., *Trifolium alpestre* L., *Maianthemum bifolium*, *Oxalis acetosella*, *Polygonatum odoratum*. Характерною є присутність видів класів *Quercus-Fagetea*, *Trifolio-Geranietea*, *Molinio-Arrhenatheretea*. (Chytry M., Horak J. 1997)

Поширення. Локально зустрічається в районі села Старі Велідники. На даний час відомо три локалітети. За останні роки 2 з них трансформувалися і їх неможливо ідентифікувати як такі що належать до даної соції.

Охорона. Созологічна категорія 4. На території кряжу не охороняється. Вимагає негайного введення охоронного режиму.

14.13. Мішані ліси з фітоценозом *Quercetea roburi-petraeae* представлені 14.13.1. Мезофітні та мезогітрофітні мішані ліси з фітоценозом *Quercetalia roboris* R.Tx. 1931 14.13.11. Мезофітні судіброви з фітоценозом *Quercion roburi-petraeae* Br.-Bl. 1932 (Шеляг–Сосонко Ю.Р. 1995)

14.13.11.1 Ацидофільні скельно-дубові ліси

Екотоп. Екосистема розташована на схилах та плакорах кам'янистої частини кряжу висотою від 210 до 280 м. на дерново-підзолистих середньо та сильнокам'янистих ґрунтах на елювії рожевих овруцьких кварцитів. Гідрологічні умови від мезофітних до гігромезофітних. Глибина залягання ґрунтових вод 1,5-2 м. Кислотний режим ґрунту – рН 4,5-5,5. Едафотоп також характеризується гемінітрофільними, субагумільними умовами. Сукупність факторів антропогенного впливу характеризує екосистему, як мезо- та олігогемеробну.

Фітоценоз. *Calamagrostio arundinacea-Quercetum petraea* Scam. et Pass. 1959. Деревостан утворений домінуванням *Quercus petraea* Liebl. віком 60-100 років III-IV бонітету з поодинокими домішками *Betula pendula*, *Pinus sylvestris*, *Quercus robur*. Другий ярус (0,1-0,2) *Populus tremula*, *Pyrus comunitis* L, *Malus sylvestris* L, *Sorbus aucuparia*. В підліску зустрічаються *Quercus petraea*, *Alnus glutinosa* *Pinus sylvestris* (20%). Серед чагарників переважає *Rhododendron luteum* Sweet (0,7) а також зустрічаються *Frangula alnus*, *Genista tinctoria* L., *Salix cinerea*, *Rubus nessensis* W. Hall., *Sarothamnus scorpiarius* Koch. В трав'янисто-моховому ярусі переважають *Festuca ovina* L., *Calamagrostis arundinacea* Roth. Постійно присутні бореальні види *Vaccinium myrtillus*(30%), *Melampyrum pratense* L., *Maianthemum bifolium*, та *Pteridium aquilinum* Kuhn., *Convallaria majalis*, *Polygonatum odoratum* Druce.. Серед мохів найчастіше зустрічаються *Hypnum cupressiformis* Hedw., *Leucobryum glaucum*.

Поширення. Екосистема площею менше 10 га розташована на території Червонсько-Городецького геоботанічного району ацидофільних скельнодубових та дубових лісів. Її угруповання зосереджені в районі села Червонка. Трохи менше на західній і більше на східній околиці на схилах висоти 274.

За особливостями розташування екосистеми на Словечансько-Овруцькому кряжі можна виділити дві територіальні одиниці. Перша на західному березі річки Червонка, друга на східному. За видовим складом на чотири територіальних одиниці. Вони пов'язані з особливостями едафічних умов. В межах річкової долини субдомінантою є *Pinus sylvestris*. Поверх виходів уламкової породи овруцьких кварцитів тут розташовані дерново-підзолисті ґрунти на відносно потужній основі осадових порід. На плакорі висоти 220 (західна околиця села Червонка) зустрічається монодомінантна ділянка *Quercus petraea* з високим вмістом *Sorbus aucuparia*. На схід від Червонки на висоті 274 в чагарниковому ярусі переважає *Rhododendron luteum*. На південному схилі висоти 274 субдомінантою є *Betula pendula*.

Охорона. Созологіна категорія 3. Вся екосистема і особливо з фітоценозом *Calamagrostio arundinacea-Quercetum petraea* var. *rhododendron luteum* пропонується включити до «Червоного списку рослинних угруповань України». Охороняються в державному заказнику «Кам'яна гірка» кв.36 вид 29 Кованковського лісництва Словечанського держлісгоспу.

14.13.11.2. Дубові трясуноквидноосокові мішані ліси

Екотоп. Екосистема займає відносно рівні погано дренавані ділянки. Ґрунти дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані та ясно-сірі і сірі опідзолені слабозмиті легкосуглинкові. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних від субгумільних до мезогуміфільних, та від субнітрофільних до гемінітрофільних, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, олігогамеробні.

Фітоценоз. *Carici brizoidi-Quercetum roboris* Orlov, Yakushenko et Vorobyov 1999. Деревостан однарусний з *Quercus robur* із незначною домішкою *Betula pendula*, *Populus tremula*, *Acer platanoides*, *Pinus sylvestris*, *Carpinus betulus* і *Alnus glutinosa* (на вологіших ділянках). У віці 50-100 років він має зімкнуту крону 0,6-0,9, висоту 18-28 м і II-III бонітет. Густиий підлісок утворює *Corylus avellana* і *Frangula alnus*. До них домішуються *Sorbus aucuparia*, *Euonymus europaea*, *E. verrucosa*, а на вологіших ділянках – *Salix cinerea*. Травянистий ярус густиий з проектним покриттям 50-80 %, з яких на долю *Carex brizoides* доводиться 25-65 %. З проектним покриттям до 5 % зустрічаються *Calamagrostis arundinacea*, *Maianthemum bifolium*, *Oxalis acetosella*, *Stellaria holostea*, *Pteridium aquilinum* і в більш вологих місцях – *Molinia caerulea*.

Флористичне ядро складають бореальні лісові і лугові види (*Pteridium aquilinum*, *Oxalis acetosella*, *Maianthemum bifolium*, *Molinia caerulea*, *Calamagrostis arundinacea*, *Potentilla erecte* Rausch., *Deschampsia caespitosa*, *Luzula pilosa*, *Lysimachia vulgaris* L), а також неморальні (*Carex brizoides*, *Stellaria holostea*, *Milium effusum* L, *Aegopodium podagraria*, *Pulmonaria obscura*, *Athyrium filix-femina* Roth.)

Поширення. Екосистема розташована, як на кам'янистій частині кряжу так і на лесовій. При цьому на першій вона може утворювати великі за площею масиви до кількох гектарів, як суцільні так і мозаїчні. В лесових балках це невеликої площі локальні утворення на схилах пагорбів. На кам'янистій частині кряжу дуже часто спостерігаються елементи бореальної флори (*Vaccinium myrtillus* L., *Luzula pilosa*, *Pyrola rotundifolia*, *Maianthemum bifolium*, *Trientalis europaea*).

Охорона. Созологічна категорія 3. На території кряжу екосистема не охороняється

14.13.11.3. Березово-дубові мішані ліси.

Екотоп. Екосистема розташована на схилах різної експозиції і крутизни горбів, балок, річкових долин, а також плакорів. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені змиті легкосуглинкові та супіщані на лесових породах, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані, дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах супіщані, дерново-підзолисті малорозвинені сильнокам'яністі глинисто-піщані на елювії кристалічних порід, дерново-підзолисті слабоповерхнево оглеєні глинисто-піщані, дерново-підзолисті глейові середньокам'яністі глинисто-піщані, дерново-підзолисті сильноглейові глинисто-піщані. Кислотність рН 4,5-5,5. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних від субгумільних до мезогуміфільних, та від субнітрофільних до гемінітрофільних, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, оліго- та мезогамеробні.

Фітоценоз. *Betulo pendulo-Quercetum roboris* R.Tx 1930. Однарусний деревостан утворює *Quercus robur* з незначною участю *Betula pendula*, *Tilia cordata*, *Carpinus betulus*, *Pinus sylvestris*, *Acer platanoides*, *Fraxinus excelsior*, *Cerasus avium* Moench., *Populus tremula*. У віці 60-160 років він має зімкнуту крону 0,7-1,0, висоту 18-30 м і I-II, рідше III бонітет. У підліску (0,2-0,6) переважає *Corylus avellana* за участю *Euonymus verrucosa*, *E. europaea*, *Padus racemosa*, *Swida sanguinea*, *Frangula alnus* і *Sorbus aucuparia*. У травостої, проектне покриття якого в різних асоціаціях коливається від 25 до 60 %, окрім вже названих домінуючих видів зустрічаються *Astragalus glycyphyllos* L., *Dactylis glomerata* L., *Geum urbanum*, *Pulmonaria obscura*, *Viola mirabilis* L., *Lathyrus vernus* Bernh., *Melica nutans* L., *Brachypodium sylvaticum* Beauv., *Milium effusum* L., *Polygonatum multiflorum* і ін.

Флористичне ядро складають типові неморальні тіньолюбиві види з широким ареалом та бореальні види, що зустрічаються в дубових лісах (*Oxalis acetosella*, *Maianthemum bifolium*, *Pteridium aquilinum*, *Rubus saxatilis* L.).

Поширення. Територіальну диференціацію даної екосистеми необхідно проводити через властивості екотопу. Екотоп характеризується двома відмінними формами. Перша індукується високим вмістом у флорі бореальних видів і пов'язаних з комплексом дерново-підзолистих ґрунтів, друга – неморальних, пов'язаних ґрунтами на лесових осадових породах. В зв'язку з цим перша пов'язується з синфітоіндикаційними ознаками класу *Vaccinio-Piceetea* (асоціація *Quercus roboris-Pinetum*), а друга з ознаками класу *Quercus-Fagetea* (союз *Carpinion betuli*).

Охорона. Созологічна категорія 4. На території кряжу екосистема не охороняється

14.13.12. Мезогігрофітні судіброви виділені в окрему одиницю виходячи із потреби розділити екотопи зайняті союзом рослинності *Quercion robori-petraeae* Br.-Bl. 1932 за едафічними умовами.

14.13.12.1. Вологий дубовий мішаний ліс.

Екотоп. Екосистема займає понижені погано дреновані ділянки на дерново-підзолистих неоглеєних ґрунтах на піщаних відкладах супіщаних. Кислотність рН 4,3-5,4. Едафічні умови від мезофітних до мезогігрофітних від субгумільних до мезогуміфільних, та від субнітрофільних до гемінітрофільних, з різноманітними щодо вмісту карбонатів ґрунтами, олігогамеробні

Фітоценоз. *Molinio caeruleae-Quercetum roboris* Scam. et Pass. 1959. Деревостан одноярусний з *Quercus robur* і *Alnus glutinosa* із незначною домішкою *Betula pendula*, *Populus tremula*, *Acer platanoides*, *Pinus sylvestris*, *Carpinus betulus*. У віці 50-100 років він має зімкнуту крону 0,6-0,9, висоту 18-28 м і II-III бонітет. Густий підлісок утворює *Frangula alnus*. До них домішуються *Sorbus aucuparia*, *Euonymus europaeae*, *E. verrucosa*, *Padus racemosa*, *Salix cinerea*. Трав'янистий ярус густий з проектним покриттям 50-80 %, з яких на долю *Molinia caerulea* доводиться 25-50 %. З проектним покриттям до 5 % зустрічаються *Calamagrostis arundinacea*, *Maianthemum bifolium*, *Oxalis acetosella*, *Stellaria holostea*, *Pteridium aquilinum* і в менш вологих місцях – *Carex brizoides*.

Флористичне ядро складають бореальні лісові і лугові види (*Pteridium aquilinum*, *Oxalis acetosella*, *Maianthemum bifolium*, *Molinia caerulea*, *Calamagrostis arundinacea*, *Potentilla erecta*, *Deschampsia caespitosa*, *Luzula pilosa*, *Lysimachia vulgaris*), а також неморальні (*Carex brizoides*, *Stellaria holostea*, *Milium effusum*, *Aegopodium podagraria*, *Athyrium filix-femina*)

Поширення. Екосистема розташована понижених ділянках на території Червонсько-Городецького геоботанічного району ацидофільних скельнодубових та дубових лісів. На захід від лінії Бігунь-Листвин-Черевки.

Охорона. Созологічна категорія 4. На території кряжу екосистема не охороняється (Brzeg A., Kasprowicz M., Krotoska T. 1989)

14.14. Хвойні ліси представлені екотопами зайнятими рослинними угрупованнями класу *Vaccinio-Piceetea* (Якушенко Д.М. 2003) на п'ятому рівні представлені 14.14.1 Європейськими хвойними лісами розміщеними на південь від тайги з фітоценозом *Cladonio-Vaccinietalia* Br.-Bl. 1939 (Грибова С.А. 1980; Андриенко Т.Л. 1986; Воробйов С.О., Григора І.М., Мельник В.І. 2002). На шостому рівні екотопи ці екотопи розділяються за особливостями едафотопу, які індукуються видовим складом рослинних угруповань (Кондратюк Є.М. 1960; Бобров Е.Г. 1978).

За ряду причин соснові ліси виходять на території, які мають неморальні едафічні умови середовища. Тут вищенаведений геоцен представлений екосистемами 14.14.11. Освітлені соснові ліси на відносно багатих ґрунтах з фітоценозом *Festuco ovinae-Pinion* Vorobyov, Balasov et Solomakha 1997.

14.14.11.1. Зінов'ятно-соснові ліси

Екотоп. Екосистема представлена схилами пагорбів та освітленими бортами балок. Ґрунти дерново-підзолисті слабоповерхнево оглеєні глинисто-піщані ясно-сірі і сірі опідзолені супіщані. Вологість 11-13 балів. Середовище слабкисле (рН 4,3-4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 1,0-1,5% та гумусу 1,2 млн. Мдж/га. Мезогемеробна екосистема що піддається витоптуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню (Якушенко Д.М., Орлов О.О. 2004).

Фітоценоз. *Chamaecytiso zingeri*-Pinetum Vorobyov, Balasov et Solomakha 1997.. В угрупованні крім *Pinus sylvestris* домінує *Chamaecytiso zingeri* Kláscová (20-50). Деревостан сформований переважно *Pinus sylvestris*. Значну частку займають *Betula pendula*, *Populus tremula*, *Quercus robur*. В підліску зімкненістю 10% переважають *Lonicera xilosteuum* та *Sorbus aucuparia*.

Травостан зімкненістю 50-80% сформований із видів класу *Vaccinio-Piceetea* (*Maianthemum bifolium*, *Trientalis europaea*, *Pyrola rotundifolia*, *Vaccinium myrtillus* та інші), *Molinio-Arrhenatheretea* (*Poa pratensis* L., *Ranunculus acris* L., *Rumex acetosa* L.), *Robinitea* (*Cheledonia majus* L., *Geum urbanum* L., *Urtica dioica*). Домінують *Veronica chamaedris* L., *Poa pratensis*, *Poa nemoralis* L.

Поширення. Екосистема зустрічається в лесовій частині території кряжу а також біля межі між лесами та скелястою частиною кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистеми на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.14.12. Сухі бори включають в себе екотопи з найнижчим рівнем вологості.

14.14.12.1. Кладонієво-соснові ліси

Екотоп. Екосистема представлена плакорами піщаних пагорбів. Ґрунт дерново-приховано підзолистий на перевіяних пісках піщаних. Вологість 7-12 балів. Середовище слабокисле (рН 3,9-4,3), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 0,5% та гумусу 0,2 млн. Мдж/га. Оліго- мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню і випасанню (Якушенко Д.М., Орлов О.О. 2004).

Фітоценоз. *Cladonio*-Pinetum Juraszek 1927. Деревостан сформований соснами IV-V бонітету. Травостан зімкненістю 5-10 % сформований *Antenaria dioica* Gaertn., *Arctostaphylos uva-ursi* Spreng., зрідка *Festuca polesica* Zapal., *Hieracium umbellatum* L., *Nardus stricta* L., *Thymus serpyllum* L., *Veronica spicata* L. Мохово лишайниковий ярус з покриттям (50-75%) представлений *Cladonia rangiferina*, *C. deformes*, *C. gracilis* (Маслова В.Р. 1977) та іншими а також *Polytrichum piliferum*.

Поширення. Екосистема зустрічається території кряжу районі сіл Черевки та Сирниця.

Охорона. Созологіна категорія 3. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Вимагає постійного моніторингу (Мякушко В.К. 1978).

14.14.13. Мезофітні бори представлені екотопами зайнятими мезофіт ними угрупованнями союзу *Dicranio-Pinion* Libbert 1933 (Онищенко В.А., Андрієнко Т.Л., Прядко О.І. 2003; Панченко СМ., Онищенко В.А. 2003)

14.14.13.1 Свіжі соснові ліси

Екотоп. Екосистеми займають плоскі межиріччя і тераси річок з середньо хвилястим мезорельєфом, ґрунти дерново-підзолисті неоглесні на піщаних відкладах глинисто-піщані та супіщані або дерново-підзолисті глевкати на піщаних і супіщаних відкладах супіщані, свіжі, з кислотністю рН 4,5-5,5. Едафічні умови характеризуються субгумільністю та субнітрофільністю з низьким вмістом карбонатів, мезогамеробні (Якушенко Д.М., Орлов О.О. 2004).

Фітоценоз. *Dicranio-Pinnetum* Preising et Knapp 1942. Деревостан одноярусний з *Pinus sylvestris* I-II бонітету заввишки 24-26 м у віці 80-90 років і зімкнутістю крон 0,6-0,8. Підлісок не завжди виражений. Трав'янисто-чагарничковий ярус розріджений (10-20 %). Домінування звичайно не виражено. Як асектатори звичайні *Calluna vulgaris*, *Peucedanum oreoselinum*, *Melampyrum pratense*, *Trientalis europaea*, *Hieracium umbellatum*, Моховий покрив 20-50 % . Переважають *Pleurozium schreberi* і *Dicranum rugosum* з домішкою *Hylocomium splendens* та видів родів *Polytrichum* і *Sphagnum*.

Поширення. Екосистема розташована переважно на території Червонсько-Городецького геоботанічного району ацидофільних скельнодубових та дубових лісів. Найбільші її масиви зустрічаються на південний захід від лінії Червонка-Усово-Переброди, на північний захід від лінії Червонка-Бігунь-Листвин, на північ від лінії Бігунь-Словечно-Піщаниця, в долині річок Норинь, Селівониха, Червонка, Пертниця, Словечна. Зрідка невеликими масивами екосистема зустрічається на околицях лесової частини кряжу (Овруцький геоботанічний район дубово-грабових лісів) в місцях де товщина лесів мінімальна та спостерігаються активні процеси

опідзолення. За територіальними та екологічними умовами екосистему можна диференціювати на три зони: схилів околиць кряжу; долин річок; околиць лесової частини кряжу.

Охорона. Созологічна категорія 5. На території кряжу екосистема не охороняється.

14.14.13.2. Вологі соснові ліси.

Екотоп. Екосистема розташована на плоских межиріччях, міжвалових депресіях і терасах річок з середньо хвилястим мезорельєфом, ґрунти дерново-підзолисті слабоповерхнево оглеєні глинисто-піщані, дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах глинисто-піщані, дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах супіщані, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані, вологі з кислотністю рН 4,5-5,5. Едафічні умови характеризуються субгумільністю та субнітрофільністю з низьким вмістом карбонатів, мезогамеробні (Якушенко Д.М., Орлов О.О. 2004).

Фітоценоз. *Molinia caeruleae*-Pinetum W.Mat. et J. Mat. 1973. Деревостан одноярусний з *Pinus sylvestris* I-II бонітету заввишки 24-26 м у віці 80-90 років і зімкнутістю крон 0,6-0,8. Як домішка зустрічається *Betula pubescens*. Підлісок не виражений. Трав'яний-чагарничковий ярус 40-70% Домінантом виступає частіше всього *Vaccinium myrtillus* з покриттям 30-60%, іноді *Rhodococcum vitis-idaea* Avror., як субдомінант -*Molinia caerulea*. Як асекатори звичайні *Ledum palustre*, *Calamagrostis arundinacea*, *Vaccinium uliginosum*, *Carex nigra*. Моховий покрив 20-50%. Переважають *Pleurozium schreberi* і *Dicranum rugosum* з домішкою *Hylocomium splendens*, *Polytrichum* і *Sphagnum*.

Основу складають бореальні види з широкими голарктичними і євразійськими ареалами *Vaccinium myrtillus*, *Rhodococcum vitis-idaea* Avror., *V. uliginosum*, *Ledum palustre*, *Lycopodium annotinum* L., *L. clavatum* L., *Luzula pilosa*, *Trientalis europaea*, *Pyrola rotundifolia*.

Поширення. Екосистема розташована переважно на території Червонсько-Городецького геоботанічного району ацидофільних скельнодубових та дубових лісів. Зрідка в західній частині Овруцького геоботанічного району дубово-грабових лісів Найбільші її масиви зустрічаються по околицях кряжу на висотах менше 210, в верхів'ях долин річок Норинь, Селівониха, Червонка, Пертниця, Зимуха, Бігунь, Словечна, Ясенець, Полохачевка, Желонь. За територіальними та екологічними умовами екосистему можна диференціювати на дві зони: ділянок контакту схилів кряжу з болотами Поліської рівнини; верхів'я долин річок.

Охорона. Созологічна категорія 4. На території кряжу екосистема охороняється в ботанічному заказнику «Крим'є» (Городецьке лісництво кв 39, Словечанського лісгоспзагу) (Литвак П.В. 1996).

14.14.14 Світлі бори і субори займають екотопи з відносно підвищеним вмістом карбонатів.

14.14.14.1 Зимолубково-соснові субори

Екотоп. Екосистема представлена бортами і схилами балок та неглибокими міжваловими депресіями. Ґрунти дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах супіщані, ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті легкосуглинкові. Вологість 12-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,0-4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 0,5-2% та гумусу 1,1-1,2 млн. Мдж/га. Мезо- олігогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубці різного ступеня, випалюванню і випасанню (Якушенко Д.М., Орлов О.О. 2004).

Фітоценоз. *Peucedano*-Pinetum W.Mat (1962) 1973. Деревостан сформований *Pinus sylvestris* (20-50%), *Quercus robur* (10-15%), *Betula pendula* (20-30%), *Populus tremula* (10-75%). В підліску зімкненістю 10-40% переважають *Frangula alnus* (5%), *Sorbus aucuparia* (5%), *Corilus avelana* (1-3%). Травостан зімкненістю 25-70% сформований *Convallaria majalis* (5-10%), *Solidago virgaurea* L. (5%), *Chimophila umbellata* W.Barton. (5-15%), *Melampyrum pratense* (1-5%), *Luzula pilosa* (1-2%).

Поширення. Екосистема зустрічається на лесовій частині території кряжу та на півдні скелястої частини кряжу.

Охорона. Созологічна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує (Мякушко В.К. 1978).

14.14.14.2 Зимолубково-соснові субори з домінуванням Хвоща лісового

Екотоп. Екосистема представлена і схилами балок та неглибокими міжваловими депресіями. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті легкосуглинкові та виходи рихлих

легкосуглинкових порід. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 1,5-2% та гумусу 0,3-1,1 млн. Мдж\га. Мезо- олігогемеробна екосистема, що піддається витоптуванню, вирубці різного ступеня, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Peucedano-Pinetum var. Equisetum sylvaticum. Деревостан сформований Pinus sylvestris (20-50%), Quercus robur (10-15%), Betula pendula (20-30%), Populus tremula (10-75%). В підліску зімкненістю 10-40% переважають Frangula alnus (5%), Sorbus aucuparia (5%), Corilus avelana (1-3%). Травостан зімкненістю 25-75% сформований домінантом Equisetum sylvaticum L.(25-60%), Convallaria majalis (5%), Solidago virgaurea (5%), Chimophila umbellata (5-15%), Luzula pilosa (1-2%).

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається на півдні лесової частини території кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.14.14.3 Дубово-соснові ліси

Екотоп. Плакори пагорбів, межиріччя і тераси річок, у підніжжя схилів і на вирівняних ділянках. Ґрунти свіжі дерново-підзолисті слабоповерхнево оглеєні глинисто-піщані, дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах супіщані, дерново-підзолисті глевкати на піщаних і супіщаних відкладах супіщані, дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах супіщані дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах глинисто-піщані, що формуються на флювіальних відкладеннях та ясно-сірі і сірі опідзолені середньозмиті супіщані. Кислотність рН 4,5-5,5. Едафічні умови характеризуються субгумільністю та субнітрофільністю з низьким вмістом карбонатів, оліго- та мезогемеробні (Якушенко Д.М., Орлов О.О. 2004).

Фітоценоз. Quercus robur-Pinetum J.Mat 1973. Деревостан двох'ярусний із зімкнутістю крон 0,7-0,8. Верхній, перший, ярус заввишки 22-26 м утворює Pinus sylvestris I бонітету з домішкою Betula pendula. Другий ярус заввишки 16-18 м формує Quercus robur II-III бонітету. Підлісок зімкнутістю 0,2-0,4 заввишки 2-3 м утворений частіше Corylus avellana. Трав'яний-чагарничковий ярус густий (50-80%), переважає Pteridium aquilinum (25-60%), в більш знижених місцях – Convallaria majalis (30-40 %), субдомінанти Vaccinium myrtillus (20-40%) або Polygonatum odoratum. Види асекатори зазвичай Melica nutans, Carex digitata L., Luzula pilosa, Peucedanum oreoselinum, Maianthemum bifolium, Convallaria majalis, Betonica officinalis, Platanthera bifolia Rich. Моховий ярус не виражений.

Основа складають лісові бореальні (Vaccinium myrtillus, Luzula pilosa, Pyrola rotundifolia, Maianthemum bifolium, Trientalis europaea) і неморальні види (Melica nutans, Crucjata glabra Ehrend., Carex digitata, Polygonatum odoratum).

Поширення. Екосистема поширена по всій території кряжу. Найбільші масиви знаходяться в районі сіл Нова Рудня та Усово.

Охорона. Созологічна категорія 3. На території кряжу екосистема охороняється в ботанічному заказнику «Крим'є» (Городецьке лісництво кв 39, Словечанського лісгоспзагу) (Козьяков С.Н., Шабарова С.И. 1969)

14.14.14.4. Дубово-соснові ліси рододендронові

Екотоп. Екосистема займає плакори та схили пагорбів та річкових терас, з середньо вологими або вологими ґрунтами, глинисто-піщаними (або супіщаними) ґрунтами на флювіоглаціальних, древнеалювіальних відкладеннях. Обов'язковою умовою є наявність кам'янистої або крупнощербнистої основи глибиною менше 1 м. Ґрунти дерново-підзолисті глевкати на піщаних і супіщаних відкладах супіщані, дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах глинисто-піщані, дерново-підзолисті малорозвинені сильнокам'яністі глинисто-піщані на елювії кристалічних порід. вологі з кислотністю рН 4,5-5,5. Едафічні умови характеризуються субгумільністю та субнітрофільністю з низьким вмістом карбонатів, оліго- та мезогемеробні (Бурчак–Абрамович Н.И. 1956).

Фітоценоз. Quercus robur-Pinetum var. Rhododendron luteum. Деревостан однарусний із зімкнутою крон 0,7-0,8, з переважанням Pinus sylvestris і значною участю (30%) Quercus robur, що мають у віці 60-70 років висоту 25-27 м і I-II бонітет. Густий (0,5-0,8) підлісок утворений

Rhododendron luteum заввишки 1,5-2 м. Трав'янисто-чагарничковий ярус розріджений (20-40%) і відрізняється мозаїчністю, він диференційований на два під'яруси. Перший, розріджений, заввишки 70-80 см утворюють *Brachypodium sylvaticum*, *Festuca gigantea* Vill., *Deschampsia cespitosa*, *Molinia caerulea*. Другий, основний, під'ярус заввишки 25-40 см формують доміанти – *Vaccinium myrtillus* або *Carex brizoides* з покриттям 15-30 %, одинично зустрічаються *Maianthemum bifolium*, *Melampyrum pratense*, *Luzula pilosa*, *Trientalis europaea*, *Veronica chamaedrys*. Іноді трав'яний-чагарничковий ярус дуже розріджений (5-10%). Моховий покрив звичайно не виражений, окремими куртинами і плямами зустрічаються *Polytrichum juniperinum*, *Pleurozium schreberi*. У рододендрово-сфагнових співтовариствах моховий покрив (40-60%), в ньому переважають *Sphagnum nemoreum*, *S. centrale*, *S. palustre*. У цих співтовариствах з'являються деякі болотяні види – *Carex nigra*, *Lysimachia vulgaris*, *Drosera rotundifolia*. Основу складають бореальні лісові види (*Pinus sylvestris*, *Vaccinium myrtillus*, *Rhodococcum vitis-idaea* Avrор., *Pyrola minor* L., *P. rotundifolia*, *Luzula pilosa*, *Trientalis europaea*, неморальні (*Quercus robur*, *Carex brizoides*, *Ajuga reptans*, *Melica nutans*, *Festuca gigantea*), а також лугово-болотні види з широкими ареалами (*Carex nigra*, *C. cinerea* Poll., *Scirpus sylvaticus*, *Lysimachia vulgaris*, *Ranunculus acris*) (Орлов О.О., Якушенко Д.М. 2000).

Поширення. Екосистема розташована на території Червонсько-Городецького геоботанічного району ацидофільних скельнодубових та дубових лісів на висоті вище 210 м.

Охорона. Созологічна категорія 3. На території кряжу екосистема охороняється в ботанічному заказнику «Крим'є» (Городецьке лісництво кв 39, Словечанського лісгоспзагу)

14.14.15. Сирі та мокрі бори представлені найвологішими угрупованнями цього геоцену.

14.14.15.1. Бухово-соснові ліси

Екотоп. Екосистема представлена пониженими ділянками річкових долин. Ґрунти лучно, муловато-, та торфувато-болотні осушені, наміті опідзолені та дерново-підзолисті ґрунти супіщані. Вологість 15-17 балів. Середовище слабокисле (рН 4,0-4,2), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 0,5% та гумусу 1,2 млн. Мдж/га. Олігогемеробна екосистема що піддається витоπτуванню, вирубкам різного ступеня (Якушенко Д.М., Орлов О.О. 2004).

Фітоценоз. *Vaccinio uliginosae-Pinetum* Kleist 1929. Деревостан сформований із *Pinus sylvestris* (30-50%) з домішкою *Betula pubescens* (5%), *Betula pendula* (5%), *Populus tremula* (5%). В підліску зімкненістю 30-40% переважають *Frangula alnus* (до 30%), *Sorbus aucuparia* (5-10%). Трав'янисто-чагарничковий ярус зімкненістю 50-75% сформований із *Vaccinium uliginosum* (30-40%), *Vaccinium myrtillus* (15-25%), *Molinia caerulea* (10%), *Carex nigra* (1-5%).

Поширення. Екосистема спорадично зустрічається по всій скелястій частині території кряжу. Найбільші масиви сконцентровані в долині річки Норинь.

Охорона. Созологічна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує (Мякушко В.К. 1978).

14.15. Чагарники на лесових ґрунтах представлені екотопами зайнятими рослинними угрупованнями класу *Rhamno-Prunetea*. На шостому рівні це 14.15.1. Чагарникові екосистеми на ясно-сірих і сірих лесових ґрунтах займають території заселені угрупованнями порядку *Prunetalia spinosae* R.Тх. 1952, на сьомому – 14.15.11. Чагарникові екосистеми лесових плакорів з союзом рослинності *Pruno-Rubion fruticosi* R.Тх. 1952 corr. Doing 1962 (Удра И.Ф. 1981).

14.15.11.1. Теренові чагарники.

Екотоп. Екосистема представлена сухуватими лесовими плакорами. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені середньозмиті легкосуглинкові.

Вологість 8-10 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-4,6), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 2-3% та гумусу 1,1-1,3 млн. Мдж/га. Мезогемеробна екосистема що піддається витоπτуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. *Rubro fruticosi-Prunetum spinosae* Web. 1974 n.inv. Wittig 1976. В угрупованні з проективним покриттям чагарникового ярусу 50-80% трав'янистого 40-60% домінують *Prunus spinosa* L. (50-75%), *Crataegus curvisepala* (25-30%), *Rosa canina* L. (1-5%).

Поширення. Екосистема зустрічається в центрі лесової частини території кряжу. Найбільші масиви розміщені в районі села Сорокопень.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Вимагає постійного моніторингу.

Екотопи зайняті союзом рослинності *Prunion fruticosa* R.Tx. 1952. належать до 14.15.12. Чагарникових екосистем лесових схилів із змитими ясно-сірими ґрунтами.

14.15.12.1. Глодові чагарники

Екотоп. Екосистема представлена лесовими схилами річкових долин. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті супіщані. Вологість 8-12 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 1,5-2 % та гумусу 1,1-1,2 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема що піддається витоπτуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Com. *Crataegus*. В угрупованні з проективним покриттям чагарникового ярусу 50-90% трав'янистого 40-50% домінує *Crataegus pseudokyrstostila* (50-75%). Часто зустрічаються *Prunus spinosa* (10-25%), *Rubus fruticosus* (1-5%), *Rosa canina* (1-5%). Можливо дане угруповання є варіацією асоціації *Rubo fruticosi-Prunetum spinosae* пов'язаною з більш вологими умовами середовища (*Rubo fruticosi-Prunetum spinosae* var *Crataegus curvisepala*).

Поширення. Екосистема зустрічається в центрі та на півдні лесової частини території кряжу. Найбільш характерні екотопи спостерігаються біля села Сорокопень.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Вимагає постійного моніторингу.

14.16. Ліси на початкових сукцесійних стадіях відновлення. Це екосистеми що розвиваються але дослідження їх видового складу та умов існування дозволяють визначити напрям розвитку (Шеляг–Сосонко Ю.Р., Андриенко Т.Л., Осычнюк В.В., Дубына Д.В. 1984)

14.16.1. Похідні ліси утворюються на території кряжу в результаті природного процесу відновлення типової рослинності після її попереднього зникнення з природних або антропогенних причин. Відповідно до концепції моно клімаксу, за умов стабільного розвитку на їх місці утворюються типові для таких едафічних умов лісові екосистеми. Тому цей геоцен, як і ряд інших пов'язаних із початковими стадіями розвитку фітоценозів, на рівні синоцену буде розділений за провідними едафічними факторами. Насамперед до уваги було взято кислотність, вміст карбонатів і гумусу.

14.16.11. Похідні ліси на багатих ґрунтах розміщені на лесовій частині кряжу (Удра И.Ф. 1981).

14.16.11.1. Вторинні березові ліси на багатих ґрунтах.

Екотоп. Екосистема представлена лесовими схилами річкових долин. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті супіщані. Вологість 8-12 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 1,5-2 % та гумусу 1,1-1,2 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема що піддається витоπτуванню, викошуванню і випасанню.

Фітоценоз. Складається із видів класів *Molinio-Arrhenatheretea* та *Epilobietea angustifolii*. Домінують *Betula pendula* (80-100%) і *Calamagrostis epigeios* Roth. (40-60%). Часто зустрічаються *Agrostis tenuis* Sibth. (10-20%) і *Fragaria vesca* L. (5-10%). В більш мезоксерофітних умовах присутні види класу *Koelerio-Corynephoretea*.

Поширення. Екосистема зустрічається по всій лесовій території кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.16.11.2. Вторинні осикові ліси на багатих ґрунтах.

Екотоп. Екосистема представлена лесовими схилами річкових долин, частіше схилами балок. Ґрунти ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті супіщані та виходи рихлих осадових порід. Вологість 9-12 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 1,5-2 % та гумусу 1,1-1,2 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема що піддається витоπτуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Складається із видів класів *Quercus-Fagetea* та *Epilobietea angustifolii*. Домінують *Populus tremula* (80-95%), *Corilus avelana* (20-50%), *Driopterix filix-mas* Schott. (10-30%). часто зустрічаються *Quercus robur* (5-10%), *Sorbus aucuparia* (до 5%), *Salix caprea* (до 5%).

Поширення. Екосистема зустрічається по всій лесовій території кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує. Необхідним є контроль за вирубкою так як вона приводить до посилення водної ерозії ґрунтів.

14.16.12. Похідні ліси на бідних ґрунтах розміщені на скелястій частині кряжу та на південній околиці лесової частини.

14.16.11.1. Вторинні березові ліси на бідних ґрунтах

Екотоп. Екосистема займає плакори пагорбів, межиріччя і тераси річок. Ґрунти дерново-підзолисті слабоповерхнево оглеєні глинисто-піщані, дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах супіщані, дерново-підзолисті глевкаті на піщаних і супіщаних відкладах супіщані, дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах супіщані дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах глинисто-піщані, що формуються на флювіальних відкладеннях та ясно-сірі і сірі опідзолені середньозмиті супіщані. Кислотність рН 4,5-5,5. Едафічні умови субгумільні та субнітрофільні з низьким вмістом карбонатів, оліго- та мезогамеробні.

Фітоценоз. Включає в себе види класів *Vaccinio-Piceetea*, *Quercetea robori-petraeae*, *Epilobietea angustifolii*, *Nardo-Callunetea*. Домінують *Betula pendula* (90-95%) та *Festuca ovina* (75-80%). Трав'янисп-чагарничковий ярус 70-90%. Основу складають бореальні види з широкими голарктичними і євразійськими ареалами *Vaccinium myrtillus*, *Rhodococcum vitis-idaea* Avror., *Lycopodium annotinum*, *L. clavatum*, *Luzula pilosa*, *Trientalis europaea* (Андриєнко Т.Л. 1982).

Поширення. Екосистема зустрічається в західній і північній частині кряжу. Найбільші масиви розміщені на околицях села Городець.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.16.11.2. Вторинні осикові ліси на бідних ґрунтах

Екотоп. Екосистема представлена міжваловими депресіями. Ґрунти дерново-підзолисті слабоповерхнево оглеєні глинисто-піщані. Кислотність рН 4,5-5,5. Едафічні умови субгумільні та субнітрофільні з низьким вмістом карбонатів, оліго- та мезогамеробні.

Фітоценоз. Включає в себе види класів *Vaccinio-Piceetea*, *Quercetea robori-petraeae*, *Epilobietea angustifolii*, *Nardo-Callunetea*. Домінують *Populus tremula* (70-75%) та *Calluna vulgaris* Hull. (45-60%). Трав'янисп-чагарничковий ярус 50-70%. Основу складають бореальні види з широкими голарктичними і євразійськими ареалами *Vaccinium myrtillus*, *Rhodococcum vitis-idaea* Avror., *Lycopodium annotinum*, *L. clavatum*, *Luzula pilosa*, *Trientalis europaea*. Часто зустрічаються *Festuca ovina*, *Festuca polesica*, *Chimophila umbellata* (Андриєнко Т.Л. 1982).

Поширення. Зрідка зустрічається на заході кряжу. Найбільші масиви зосереджені на південний захід від села Черевки.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.17. Напівприродні екосистеми лісів і чагарників створені під впливом антропогенних чинників включають в себе екотопи сформовані в результаті інвазії рослинних угруповань класу *Robinetea*, а також розвитку насаджень із місцевих та інтродукованих видів. Вони характеризуються нестабільністю видового складу, пов'язаною із знаходженням біоценозів на початкових стадіях сукцесійного розвитку.

14.17.1. Трансформовані лісові насадження з інтродукованих видів схильних до інвазії представлені екотопами заселеними угрупованнями порядку *Cheledonio-Robinietales* Nadač et Sofron 1980 (Дидух Я.П. 1982; Миркин Б.М., Наумова Л.Г. 2001). В умовах високої трофності розташовані 14.16.11 Робінієві ліси на багатих ґрунтах.

14.17.11.1 Робінієві ліси з Кленом ясенелистим.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок та прибортовими схилами. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 12-15 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 2-4% та гумусу 1,1-1,4 млн. Мдж/га. Мезогамеробна екосистема що піддається витоптуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. *Cheledonio-Aceratum negundi* L. et A. Jsb 1989. Деревостан сформований *Robinia pseudoacacia* L. (30-50%), *Acer negundo* (40-75%). Зрідка трапляються *Pinus sylvestris* *Betula pendula*

Populus tremula. В підліску зімкненістю 50-80% домінує *Sambucus nigra* L. (20-25%). Травостан зімкненістю 40-50% сформований із типових представників класу: *Urtica dioica* (20-25%), *Cheledonium majus* (15-20%), *Geum urbanum* (5%), *Galium aparine* L. (2-5%). На освітлених узліссях проєктивне покриття травостану зростає до 95-100% всередині Робінієвіого лісу з Кленом ясенелистим знижується до 25-30%.

Поширення. Екосистема зустрічається на лесовій частині території кряжу. Найбільш типові об'єкти розташовані в районі села Білка.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

В умовах нижчої трофності знаходяться екосистеми 14.17.12. Робінієві ліси на середньо-багатих ґрунтах представлені союзом рослинності *Cheledonio-Robinion*.

14.17.12.1 Чистотіло-робінієві ліси

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок та їх схилами, зрідка плакорами чи схилами річкових долин. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості, дуже рідко (в районі сіл Черевки і Листвин) дерново-підзолисті неоглеєні на піщаних відкладах глинисто-піщані. Вологість 12-15 балів. Середовище слабокисле (pH 4,3-5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 1,5-5% та гумусу 1,1-1,4 млн. Мдж/га. Мезогемеробна екосистема що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню

Фітоценоз. *Cheledonio-Robinetum Jurco* 1963. Деревостан сформований *Robinia pseudoacacia* (50-90%), Зрідка трапляються *Pinus sylvestris* (до 10%), *Betula pendula* (до 5%), *Populus tremula* (до 3%), *Quercus robur* (2%). В підліску зімкненістю 50-80% домінує *Sambucus nigra* (20-25%) *Acer negundo* (10-25%), *Physocarpus opulifolius* Maxim. (до 10%). Травостан зімкненістю 50-80% сформований із типових представників класу: *Cheledonium majus* (25-50%), *Urtica dioica* (20-45%), *Geum urbanum* (5%), *Galium aparine* (2-5%).

Поширення. Екосистема зустрічається переважно на лесовій частині території кряжу

Охорона. Созологіна категорія 7. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.17.12.2 Бузиново-робінієві ліси

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок та їх схилами, зрідка придонними схилами. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості,

Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (pH 4,5-5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мдж/га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню

Фітоценоз. *Sambuco nigrae-Robinetum Scepka* 1982. Деревостан сформований *Robinia pseudoacacia* (50-80%), Зрідка трапляються *Pinus sylvestris* (до 15%), *Betula pendula* (до 5%), *Populus tremula* (до 3%), *Quercus robur* (1-5%). В підліску зімкненістю 50-90% домінує *Sambucus nigra* (50-75%) *Acer negundo* (5-10%), *Physocarpus opulifolius* (до 10%). Травостан зімкненістю 50-80% сформований із типових представників класу: *Cheledonium majus* (25-50%), *Urtica dioica* (20-75%), *Geum urbanum* (5%), *Galium aparine* (2-5%).

Поширення. Екосистема зустрічається на лесовій частині території кряжу

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.17.2. Трансформовані лісові насадження з місцевих видів мають високий ступень подібності із ділянками самовідновлення (Работнов Т.А. 1985). Вплив людини на їх розвиток приводить до виникнення ряду відмінностей. Частіше вони пов'язані із невідповідністю едафічних умов в місці насадження (насадження *Pinus sylvestris* в умовах сприятливих для неморальної флори) або впливом людини на хід розвитку угруповання (наприклад вирубування *Betula pendula* і *Populus tremula* при насадженнях *Pinus sylvestris*). Оскільки едафотоп впливатиме на подальший розвиток угруповань виділяємо 14.17.21. Трансформовані лісові насадження з місцевих видів в районі неморальних дібров (Удра И.Ф. 1981).

14.17.21.1. Насадження Клена платанолистого.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (pH 4,5-5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мджґа. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Домінує *Acer platanoides*. В чагарниковому ярусі часом зустрічається *Physocarpus opulifolius*. Травостан розріджений 20-30% із представників класу *Robinitea*.

Поширення. Зрідка зустрічається в центрі та на півдні лесової частини кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.17.21.2 Яворові насадження.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (pH 4,5-5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мджґа. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Домінує *Acer pseudoplatanoides* L. Травостан розріджений 20-30% із представників класу *Quercu-Fagetea* та *Robinitea*.

Поширення. На лесовій частині кряжу зустрічаються локальні ділянки насаджень. На заході відбувається інтенсивний процес розвитку в сторону утворення угруповання союзу *Carpinion betuli* на сході рослинність наближена до класу *Robinitea*.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.17.21.3 Насадження дуба звичайного на лесах.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (pH 4,5-5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мджґа. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Домінують *Quercus robur* (90-100%) *Physocarpus opulifolius* (10-50%), *Agrostis tenuis* (25-30%). Часто присутні види класу *Robinitea*

Поширення. На лесовій частині кряжу дуже часто зустрічаються локальні ділянки насаджень.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.21.4. Польовицево-березові ліси.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (pH 4,5-5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 3-5% та гумусу 1,2-1,4 млн. Мджґа. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню

Фітоценоз. *Agrostis tenuis*-*Betuletum nova*. Деревостан сформований переважно *Betula pendula* (75-90%) зрідка *Robinia pseudoacacia*, *Pinus sylvestris*, *Quercus robur*.

Підлісок мало виражений зімкненістю 5-10% переважає *Sorbus aucuparia*.

Травостан зімкненістю 75-95% сформований домінантом *Agrostis tenuis* (30-50%) та *Veronica chamaedris* (10-15%), *Geum urbanum* (1-2%), *Urtica dioica* (1-3%) так і рядом видів класу *Molinio-Arrhenatheretea* (*Poa pratensis*, *P. nemoralis*).

Поширення. Екосистема зустрічається на лесовій частині території кряжу

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.21.5. Соснові насадження на багатих ґрунтах.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок а також прибортовими частинами схилів. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (pH 4,5-4,8), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 3-5% та гумусу 1,2-1,4 млн. Мджґа. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню (Рябуха Е.В. 1977)

Фітоценоз. В деревостані домінує *Pinus sylvestris* (75-95%). Трав'янисто-чагарничковий ярус представлений видами класів *Molinio-Arrhenatheretea*, *Nardo-Callunetea*, *Epilobietea angustifolii*. Флора класу *Vaccinio-Piceetea* тільки починає формуватися і її розвиток залежить від віку насадження вмісту карбонатів у ґрунті та глибини залягання водонепроникного шару глини. Це обумовлено впливом способу розкладання опаду хвойних на процеси опідзолення.

Поширення. Екосистема поширена вздовж балок лесової частини кряжу на схід від лінії Верпа-Листвин.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.21.6. Липові насадження на багатих ґрунтах

Екотоп. Екосистема представлена бортами та прибортовими плакорними ділянками лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної ступені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабкисле (рН 4,7-5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 3-5% та енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мдж/га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню

Фітоценоз. В деревному ярусі домінує *Tillia cordata*. Травостан розріджений (менше 5-10%) представлений поодинокими тіньовитривалими представниками класу *Robinitea*.

Поширення. Екосистема розміщена на невеликими локалітетами (чисельністю 5 штук) на схід від лінії Левковими-Старі Велідники.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.21.7 Тонконогово-Грабові ліси.

Екотоп. Екосистема представлена бортами та прибортовими плакорними ділянками лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної ступені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабкисле (рН 4,7-5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 3-5% та енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мдж/га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню

Фітоценоз. *Poa nemoralis*- *Carpinetum* Kramarets et V.Si. 1995. В деревному ярусі домінує *Carpinus betulus* і *Betula pendula*. Травостан розріджений (менше 5-10%) представлений *Poa nemoralis* (до 5%) та поодинокими тіньовитривалими представниками класу *Robinitea*.

Поширення. Екосистема розміщена на невеликими локалітетами на схід від лінії Верпа-Листвин.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує, крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.22. Трансформовані лісові насадження з місцевих видів в районі ацидофільних дібров з часом приводять до утворення типових угруповань кореальної флори або мішаних ацидофільних дібров.

14.17.22.1. Соснові насадження на бідних ґрунтах.

Екотоп. Екосистема займає плакори та схили пагорбів з дерново-підзолистими часом середньокам'янистими ґрунтами. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних, мезогуміфільні, гемінітрофільні, олігогемеробні та мезогемеробні (Рябуха Е.В. 1977).

Фітоценоз. На початкових стадіях розвитку насадження співдомінантами деревного ярусу являються *Pinus sylvestris* (50-70%) та *Betula pendula* (30-50%). Постійно присутні види класів *Quercetea robori-petraeae*, *Vaccinio-Piceetea* та *Nardo-Callunetea*. З часом в результаті санітарних рубок частка *Pinus sylvestris* зростає до 75-90% і в результаті трансформації травянисто-чагарничкова рослинність класу *Nardo-Callunetea* замінюється на рослинність класу *Vaccinio-Piceetea* (Порфирьев В.С. 1960).

Поширення. Екосистема зустрічається на скелястій частині кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує

14.17.22.2. Дубові насадження на бідних ґрунтах.

Екотоп. Екосистема займає плакори та схили пагорбів з дерново-підзолистими часом середньокам'янистими ґрунтами. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогірофітних, мезогуміфільні, гемінітрофільні, олігогемеробні та мезогемеробні.

Фітоценоз. Домінантом в деревному ярусі виступає *Quercus robur* (50-70%). Під розрідженим підліском формуються угруповання класів *Epilobietea angustifoliae* та *Nardo-Callunetea* (покриття 75-90%). Присутність типових елементів класу *Vaccinio-Piceetea* постійне (10-25%).

Поширення. Екосистема зустрічається на скелястій частині кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує

14.17.3. Трансформовані лісові насадження з інтродукованих видів не схильних до інвазії зустрічаються на бортах балок та ярів а також на різних ділянках скелястої частини кряжу. Вони представляють собою змінені з часом агротопи, які розвиваються, як лісові екосистеми. При цьому домінуючим фанерофітом продовжує виступати інтродукований вид. У відповідності до розміщення по відношенню до едафічних зон кряжу розвиток може йти як по неморальному типу так і по бореальному. 14.17.31. Насадження інтродукованих видів не схильних до інвазії лісової частини кряжу представляють угруповання які розвиваються по першому типу (Удра И.Ф. 1981).

14.17.31.1. Насадження рослин роду *Populus* L на бортах балок.

Екотоп. Екосистема представлена бортами та прибортовими плакорними ділянками лісових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної ступені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,7-5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 3-5% та енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, спонтанному вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. В першому ярусі домінують інтродуковані види. Частіше *Populus nigra* L. Деревостан розріджений не більше 75%. Трав'янисту рослинність представляють види класу *Molinio-Arrhenatheretea*. Часто трапляються рудеральна рослинність класів *Agropyretea intermedio-repentis*, *Artemisietea vulgaris*.

Поширення. Екосистема зустрічається в південносхідній частині кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує

14.17.31.2. Насадження рослин роду *Padus* Mill на бортах балок.

Екотоп. Екосистема представлена бортами та прибортовими плакорними ділянками лісових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної ступені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,7-5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 3-5% та енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, спонтанному вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. В першому ярусі домінують інтродуковані види. Частіше *Padus avium* Mill. або *Padus virginiana* Roem. 75-90%. Трав'янисту рослинність представляють види класу *Molinio-Arrhenatheretea*.

Поширення. Екосистема зустрічається в південносхідній частині кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує

14.17.31.3. Насадження *Quercus macrocarpa* Michx. на бортах балок.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лісових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної ступені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Домінують *Quercus macrocarpa* (90-100%) та *Physocarpus opulifolius* (10-50%), Часто присутні види класу *Robinetea*. В 2005 році відмічався інтенсивний підріст *Quercus macrocarpa* в межах території насадження та по її околицях, що може говорити про здатність даного виду до поширення та інвазії в умовах кряжу.

Поширення. На лісовій частині кряжу дуже часто зустрічаються локальні ділянки насаджень.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.31.4. Насадження *Acer rubrum* L. на бортах балок.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мджґа. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Домінують *Acer rubrum* (90-100%) та *Physocarpus opulifolius* (10-50%), Часто присутні види класу *Robinia*. В 2005 році відмічався інтенсивний підріст *Acer rubrum*, що говорить про здатність даного виду до поширення та інвазії в умовах кряжу.

Поширення. На лесовій частині кряжу зрідка зустрічаються локальні ділянки насаджень в центральній частині кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.31.5. Насадження *Acer saccharinum* L. на бортах балок.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мджґа. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Домінують *Acer saccharinum* (90-100%) та *Physocarpus opulifolius* (10-50%), Часто присутні види класу *Robinia*. Трав'янистий ярус розріджений до 10%.

Поширення. На лесовій частині кряжу зрідка зустрічаються локальні ділянки насаджень в центральній частині кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.31.6. Насадження *Pinus banksiana* Lamb. на бортах балок.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мджґа. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. В деревному ярусі домінує *Pinus banksiana* (75%). Часто зустрічаються *Robinia pseudoacacia* (15-20%) *Pinus sylvestris* (5%) та *Betula pendula* (5%). В трав'янистому ярусі зустрічаються переважно види класу *Robinia* (60-70%).

Поширення. Зустрічаються в центральній частині кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.31.7. Насадження *Picea abies* Karst. на бортах балок.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мджґа. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. *Picea abies* утворює монодомінантні угруповання із розрідженим травостоем (до 5%). Покриття *Picea abies* (95-100%). В травостой переважають *Micelis muralis* Dumort. (2-3%) *Veronica officinalis* L. (1-2%), на прогалинах *Rubus cespitosus* L. (2-3%). В районі села Кобилин в чагарниковому ярусі *Euonymus verrucosus* (25-30%) (Барбарич А.І. 1953).

Поширення. Спорадично зустрічається по всій території кряжу. Найбільші масиви знаходяться в районі сіл Білка, Левковичі і Кобилин.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.31.8. Насадження *Elaeagnus argentea* Pursh. на бортах балок.

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок та схилами річкових долин. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної степені змитості. Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 2-5% енергія гумусу 1,2-1,4 млн. Мдж/га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. Рослинне угруповання представляє собою чагарники з густим травостоєм. Домінантом виступає *Elaeagnus argentea* (75-95%). Трав'янистий покрив переважно із представників класів *Molinio-Arrhenatheretea* та *Sedo-Scleranthetalia*

Поширення. Зустрічається на півдні лесової частини кряжу в районі сіл Хайча і Довгиничі.

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.32. Насадження інтродукованих видів не схильних до інвазії на плакорах скелястої частини кряжу розвиваються як екосистеми з бореальними рослинними угрупованнями.

14.17.32.1. Насадження *Pinus banksiana* скелястої частини кряжу

Екотоп. Екосистема займає схили пагорбів з дерново-підзолистими середньокам'янистими ґрунтами. Кислотність рН 4,5-5,6. Едафічні умови від мезофітних до мезогігрофітних, мезогуміфільні, гемінітрофільні, олігогемеробні та мезогемеробні.

Фітоценоз. Рослинність наближена до союзу *Dicranio-Pinion* при домінуванні в деревному ярусі *Pinus banksiana* (80-100%) і *Festuca ovina* (30-50%) в трав'янистому.

Поширення. Спонтанно зустрічається по всій скелястій частині кряжу.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.17.32.2. Насадження *Picea abies* скелястої частини кряжу

Екотоп. Екосистема займає схили пагорбів з дерново-підзолистими середньокам'янистими ґрунтами рідше з дерново-підзолисті слабоповерхнево оглеєні глинисто-піщані, дерново-підзолисті глейові середньокам'янисті глинисто-піщані. Кислотність рН 4,5-5,0. Едафічні умови від мезофітних до мезогігрофітних, мезогуміфільні, гемінітрофільні, олігогемеробні та мезогемеробні.

Фітоценоз. Рослинні угруповання наближені до класу *Vaccinio-Piceetea* при домінуванні *Picea abies* (80-100%). Можна припустити, що рослинність з часом трансформується в асоціації *Eu-Piceetum* або *Sphagno-Piceetum* в залежності від едафічних умов (Воробйов С.О. 2003).

Поширення. Поширені на захід від сіл Листвин та Черевки.

Охорона. Созологіна категорія 4. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує крім обмеження на суцільну вирубку.

14.18. Вторинні післялісові ліси та чагарники представлені екотопами зайнятими рослинними угрупованнями що належать до класів *Epilobietea angustifoliae* та *Urtico-Sambucetea*.

14.18.1. Вторинні післялісові ліси та чагарники на середньо-багатих та багатих ґрунтах включають в себе фітоценози порядку *Sambucetalia Oberd. 1957* і на шостому рівні 14.18.11. Пізні стадії розвитку вторинних похідних лісів на середньо багатих ґрунтах – фітоценози союзу *Sambuco-Salicion caprea R. Tx. et Neum 1950*.

14.18.11.1. Вторинні ліси з Вербою козячою

Екотоп. Екологічні умови наближені до екосистеми Малинові чагарники але відрізняються меншою кількістю ґрунту і більшою кількістю карбонатів.

Екосистема займає плакорні ділянки та схили балок. Ґрунти дерново-підзолисті глевкати на піщаних і супіщаних відкладах середньокам'янисті глинисто-піщані, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані та інколи ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті легкосуглинкові

Вологість 12-15балів. Середовище слабокисле (рН 4,1-4,5), карбонатів (CaCO₃, MgCO₃) 1-3,5% та гумусу 0,3-1,1 млн. Мдж/га. Мезо- оліго гемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, викошуванню, вирубці, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. *Epilobio-Salicetum caprea Oberd. 1957*. Деревостан сформований *Pinus sylvestris* (5-75%), *Betula pendula* (5-75%), *Populus tremula* (5-75%). В підліску зімкненістю 15-50 % переважають *Salix caprea*, *Lonicera xilosteum*, *Corylus avelana*, *Euonymus europaea*, *Acer negundo*,

Sorbus aucuparia зрідка *Rubus idaeus* L. Травостан зімкненістю 5-40 % сформований переважно *Dryopteris felix-max* (до 30%) та *Rubus caesius* (до 25%). При цьому *Dryopteris felix-max* займає схили балок а *Rubus caesius* заглибини в схилах де сконцентровується листовий опад. На освітлених добре зволжених ділянках зустрічаються *Fragaria vesca* і *Chamaerion angustifolium* Halub. Часто зустрічаються види класів *Quercus-Fagetea*, *Molinio-Arrhenatheretea*, *Robinitea*.

Поширення. Екосистема зустрічається по всій території кряжу

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.18.11.2. Жовтозілляво-знітові чагарники

Екосистема займає дно і схили балок. Ґрунти дерново-підзолисті глевкаті або намиті лесові осадові породи. Вологість 13-16 балів. Середовище слабокисле (рН 4,1-4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 1-3,5% та гумусу 0,3-1.1 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, викошуванню, вирубці, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. *Senecioni sylvatici-Epilobetum angustifoli* R.Tx. 1950. Деревостан сформований *Pinus sylvestris* (5-75%), *Betula pendula* (5-75%), *Populus tremula* (5-75%). В підліску зімкненістю 15-50 % переважають *Salix caprea*, *Lonicera xilosteam*, *Corylus avelana*, *Euonymus europaea*, *Acer negundo*, *Sorbus aucuparia* зрідка *Rubus idaeus* L. Травостан зімкненістю 5-40 % сформований переважно *Chamaerion angustifolium* (до 30%) та *Senecio sylvaticus* (до 25%). На освітлених добре зволжених ділянках зустрічаються *Fragaria vesca*. В місцях акумуляції листового опадку *Rubus caesius*. Часто зустрічаються види класів *Quercus-Fagetea*, *Molinio-Arrhenatheretea*, *Robinitea*.

Поширення. Екосистема зустрічається по всій лесовій території кряжу

Охорона. Созологіна категорія 5. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.18.12. Вторинні післялісові чагарники являють більш ранні сукцесійні етапи розвитку екосистем цього геоцену.

14.18.12.1. Малинові чагарники

Екотоп. Екосистема представлена різноманітними формами рельєфу але переважають плакорі ділянки та схили пагорбів. Ґрунти дерново-підзолисті глевкаті на піщаних і супіщаних відкладах середньокам'яністі глинисто-піщані, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані та інколи ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті легкосуглинкові. Вологість 12-14балів. Середовище слабокисле (рН 4,1-4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 0,5-1,5% та гумусу 1,1-1,2 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. *Rubetum idaei* Pfeiff. 1936 em. Oberd. 1973. Чагарниковий ярус зімкненістю 75-90% переважає *Rubus idaeus*. Травостан зімкненістю 25-30% сформований *Chamaerion angustifolium* (5-10%), *Erigeron canadensis* L. (5-10%). Зрідка зустрічаються *Pinus sylvestris*, *Betula pendula*, *Sorbus aucuparia*, *Corylus avelana*, *Poa pratensis*, *Dryopteris felix-max*, *Viola canina* L.

Поширення. Екосистема зустрічається по всій території кряжу

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території кряжу не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.18.12.2 Червонобузинові чагарники

Екотоп. Екосистема представлена різноманітними формами рельєфу але переважають плакорі ділянки та схили пагорбів. Ґрунти дерново-підзолисті глевкаті на піщаних і супіщаних відкладах середньокам'яністі глинисто-піщані, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані та інколи ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті легкосуглинкові

Вологість 12-14балів. Середовище слабокисле (рН 4,1-4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 0,5-1,5% та гумусу 1,1-1,2 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. *Sambucetum racemosae* Oberd. 1973. Чагарниковий ярус зімкненістю 50-75%, переважає *Sambucus racemosa* L. Зрідка зустрічаються *Rubus idaeus*, *Sambucus nigra*.

Травостан зімкненістю 75-90% сформований видами класів Epilobietea angustifolii, Molinio-Arrhenatheretea та Robinitea (*Fragaria vesca*, *Myosotis sylvatica* Ehrh. et. Hoffm. , *Poa pratensis*, *Urtica dioica*, *Cheledonium majus*).

Поширення. Екосистема зустрічається по всій території краю

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території краю не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.18.12.3 Чорнобузинові чагарники

Екотоп. Екосистема представлена бортами лесових балок. Ґрунти ясно-сірі та сірі лісові різної ступені змитості,

Вологість 13-14 балів. Середовище слабокисле (рН 4,5-5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 3-5% та гумусу 1,2-1,4 млн. Мдж\га. Мезогемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, вирубуванню, викошуванню, випалюванню і випасанню

Фітоценоз. *Sambucetum nigrae* Oberd 1973. Чагарниковий ярус зімкненістю 50-75%, переважає *Sambucus nigra*. Зрідка зустрічаються *Rubus idaeus*, *Euonymus europaea*, *Acer negundo*. Травостан зімкненістю 75-90% сформований видами класів Epilobietea angustifolii, Molinio-Arrhenatheretea та Robinitea (*Fragaria vesca*, *Poa pratensis*, *Urtica dioica*, *Cheledonium majus*, *Robinia pseudoacacia*).

Поширення. Екосистема зустрічається на лесовій частині території краю

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території краю не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

14.18.2. Вторинні післялісові ліси та чагарники на багатих нітрогеном ґрунтах включають в себе екотопи заселені рослинністю порядку *Urtico-Crataegetalia* Pass 1968. На шостому рівні це 14.18.21. Вторинні післялісові ліси та чагарники лесових балок на багатих нітрогеном ґрунтах з союзом *Asperugo verticillati-Crataegion tauricae* Korzh. et Kljukin 1990

14.18.21.1. Свидиново-бузинові чагарники

Екотоп. Екологічні умови наближені до екосистеми Малинові чагарники але відрізняються меншою кількістю гумусу і більшою кількістю карбонатів.

Екосистема займає плакорні ділянки та схили балок. Ґрунти дерново-підзолисті глевкати на піщаних і супіщаних відкладах середньокам'янисті глинисто-піщані, дерново-підзолисті підстелені елювієм кристалічних порід з глибиною 0,5-1 м супіщані та інколи ясно-сірі і сірі опідзолені сильнозмиті легкосуглинкові

Вологість 12-15балів. Середовище слабокисле (рН 4,1-4,5), карбонатів (CaCO_3 , MgCO_3) 1-3,5% та гумусу 0,3-1.1 млн. Мдж\га. Мезо- оліго гемеробна екосистема, що піддається витоπτуванню, викошуванню, вирубці, випалюванню і випасанню.

Фітоценоз. *Swido-Sambucetum* Korzh. et Kljukin 1990. Чагарниковий ярус зімкненістю 50-75%, переважають *Sambucus nigra* і *Swida sanguinea*. Зрідка зустрічаються *Lonicera xilosteam*, *Rubus idaeus*, *Euonymus europaea*, *Acer negundo*.

Травостан зімкненістю 75-90% сформований видами класів Epilobietea angustifolii, Molinio-Arrhenatheretea та Robinitea (*Fragaria vesca*, *Poa pratensis*, *Urtica dioica*, *Cheledonium majus*, *Robinia pseudoacacia*).

Поширення. Екосистема зустрічається по всій території краю

Охорона. Созологіна категорія 6. Екосистема на території краю не охороняється. Спеціальних заходів з охорони не потребує.

РОЗРАХУНКОВО-МОДЕЛЮЮЧІ ЗАДАЧІ

Тема 1. Система і її характеристики

Умова: До міського озера об'ємом $V = 100000 \text{ м}^3$ одночасно потрапляють стічні води, що містять речовину А (іони важкого металу) та речовину Б (поверхнево-активну речовину). Окремо речовина А викликає загибель 10% популяції індикаторного фітопланктону при концентрації $C_A = 2 \text{ мг/л}$. Речовина Б самостійно викликає таку ж летальність при $C_B = 5 \text{ мг/л}$.

Проте, через ефект **емерджентності** (синергізму), сумарний токсичний ефект при їхній сумісній присутності розраховується за коефіцієнтом екологічної синергії (рис. 52)

$$\kappa = \left(\frac{C_{fact,A}}{C_A} \right)^2 + \left(\frac{C_{fact,B}}{C_B} \right)^2 + 1.5 \cdot \left(\frac{C_{fact,A} \cdot C_{fact,B}}{C_A \cdot C_B} \right)$$

Рис. 52. Коефіцієнтом екологічної синергії

Якщо $\kappa \geq 1.0$, критичний поріг стійкості системи перевищено. До озера скинули 150 кг речовини А та 300 кг речовини Б.

Завдання: 1. Розрахуйте фактичні концентрації речовин в озері (C_{fact}), припустивши їх повне рівномірне перемішування. 2. Визначте коефіцієнт синергії κ . Оцініть, чи збереже озерна екосистема свою стійкість як цілісна система.

Тема 2. Холічний підхід до вивчення складних систем

Умова: Замість аналізу окремих ГДК (гранично допустимих концентрацій), холічний підхід вимагає оцінки інтегрального стану річки. Для цього використовують індекс екологічного дефіциту (I_{eco}), що враховує гідрологічні, хімічні та біологічні показники через вагові коефіцієнти (рис. 53)

$$I_{eco} = \sqrt{w_1 \cdot \left(\frac{Q_{fact}}{Q_{norm}} \right)^2 + w_2 \cdot \left(\frac{BOD_{fact}}{BOD_{norm}} \right)^2 + w_3 \cdot \left(\frac{Bio_{fact}}{Bio_{norm}} \right)^2}$$

де $w_1 = 0.3$ (гідрологія), $w_2 = 0.4$ (БСК – біохімічне споживання кисню), $w_3 = 0.3$ (індекс різноманіття Шеннона). Нормативні значення: $Q_{norm} = 25 \text{ м}^3/\text{с}$, $BOD_{norm} = 3.0 \text{ мг/л}$, $Bio_{norm} = 3.5$.

Поточні виміри в усті річки: $Q_{fact} = 15 \text{ м}^3/\text{с}$, $BOD_{fact} = 6.5 \text{ мг/л}$, $Bio_{fact} = 1.8$.

Рис. 53. Індекс екологічного дефіциту

Поточні виміри в усті річки: $Q_{fact} = 15 \text{ м}^3/\text{с}$, $BOD_{fact} = 6.5 \text{ мг/л}$, $Bio_{fact} = 1.8$.

Завдання: 1. Розрахуйте інтегральний індекс I_{eco} .
2. Зробіть системний висновок: якщо $I_{eco} > 1.2$, система перебуває в стані антропогенного регресу і втрачає властивість самоочищення.

Тема 3. Довкілля як система

Умова: Регіональна екосистема здатна асимілювати (переробити природним шляхом без шкоди для себе) до $M_{\text{assim}} = 1200$ тонн діоксиду сірки (SO_2) на рік. У регіоні діє ТЕЦ, яка спалює 250000 тонн вугілля на рік із вмістом сірки $S = 1.2\%$. На ТЕЦ встановлені фільтри з ефективністю вловлювання сірки $\eta = 75$.

Завдання: 1. Розрахуйте фактичний річний викид SO_2 в атмосферу від ТЕЦ (врахуйте, що при згорянні 1 кг сірки утворюється 2 кг SO_2). 2. Побудуйте балансову модель «Джерело – Довкілля» та визначте, чи перевищено асиміляційний потенціал системи і на скільки відсотків.

Тема 4. Моделювання природних систем

Умова: Популяція промислової риби в замкненому лимані моделюється диференціальним рівнянням Мальтуса, модифікованим під антропогенний вплив (рис. 54)

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N - E \cdot N$$

де N – чисельність популяції (екз.), $r = 0.35 \text{ рік}^{-1}$ – коефіцієнт природного приросту, E – коефіцієнт промислового вилову (інтенсивність експлуатації системи). Початкова чисельність риби $N_0 = 500\,000$ екз.

Рис. 54. Диференціальне рівняння Мальтуса

Завдання: 1. Знайдіть аналітичний розв'язок цього рівняння. 2. Змодельуйте стан популяції через $t = 5$ років для двох сценаріїв розвитку подій: Сценарій А: помірний рибний промисел ($E = 0.20 \text{ рік}^{-1}$). Сценарій Б: перевилов ($E = 0.45 \text{ рік}^{-1}$).

Тема 5. Методологія і практика побудови прогностичних алгоритмів.

Для прогнозування обсягу викидів парникових газів (CO_2 -еквівалент) підприємства використовується алгоритм експоненційного згладжування Хольта-Вінтерса (спрощений варіант для тренду). Формула прогнозу на 1 крок уперед (рис. 55)

$$\hat{Y}_{t+1} = \alpha \cdot Y_t + (1 - \alpha) \cdot \hat{Y}_t$$

де Y_t – фактичне значення у момент t , \hat{Y}_t – згладжене (прогнозне) значення для моменту t , α – коефіцієнт адаптації алгоритму до змін ($\alpha = 0.3$).

Рис. 55. Алгоритм експоненційного згладжування Хольта-Вінтерса

Фактичні викиди за останні 3 роки становили: $Y_1 = 450$ тис. т, $Y_2 = 480$ тис. т, $Y_3 = 510$ тис. т. Початкове згладжене значення приймається рівним фактичному: $\hat{Y}_1 = 450$.

Завдання: 1. Послідовно розрахуйте згладжені значення \hat{Y}_2 та \hat{Y}_3 .
2. Побудуйте прогноз обсягу викидів на 4-й рік (\hat{Y}_4).

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПІДГОТОВКИ

1. Визначте поняття «критична точка» (або поріг стійкості) системи та наслідки її перетину для природного середовища.
2. Дайте визначення поняттю «межі системи» стосовно об'єктів навколишнього середовища та поясніть складнощі їх визначення.
3. Дайте оцінку поняттю «стійкість системи» та назвіть основні види стійкості біосферних систем до антропогенного навантаження.
4. Опишіть кругообіг речовин та потік енергії в довкіллі як фундаментальні системні процеси, що визначають його якісний стан.
5. Опишіть методологію побудови прогностичних алгоритмів на основі авторегресійних моделей (наприклад, ARIMA) для моніторингу водних екосистем.
6. Опишіть особливості моделювання дифузії та адвекції забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.
7. Опишіть особливості побудови прогностичних алгоритмів для оцінки динаміки поширення інвазійних видів рослин під впливом кліматичних факторів.
8. Опишіть поняття структури системи та поясніть, як зміна структури впливає на функціонування природно-антропогенних комплексів.
9. Опишіть роль взаємозв'язків та синергетичних ефектів між елементами системи з погляду холистичної методології.
10. Опишіть сутність інформаційних взаємодій всередині екосистем та їхнє значення для збереження якісних характеристик біосфери.
11. Охарактеризуйте балансові моделі (моделі матеріального балансу) та їхнє значення для аналізу міграції токсикантів у трофічних ланцюгах.
12. Охарактеризуйте використання прогностичних алгоритмів на базі генетичних алгоритмів для оптимізації параметрів екологічних моделей.
13. Охарактеризуйте властивість адаптивності природних систем в умовах глобальних кліматичних змін та техногенного пресингу.
14. Охарактеризуйте властивість цілісності (емерджентності) екосистеми та наведіть приклад її прояву при оцінці якості довкілля.
15. Охарактеризуйте довкілля як динамічну систему, що перебуває в стані «рухомої рівноваги» (квазістаціонарного стану).
16. Охарактеризуйте зв'язок між холистичним мисленням та міждисциплінарним характером системного аналізу якості навколишнього середовища.
17. Охарактеризуйте концептуальне моделювання навколишнього середовища та його роль на початкових етапах дослідження.
18. Охарактеризуйте поняття «екологічний слід» як індикатор системного тиску людства на навколишнє середовище.
19. Охарактеризуйте поняття «навколишнє природне середовище» з позицій теорії систем та визначте його головні інтегративні властивості.
20. Охарактеризуйте різницю між експертними (інтуїтивними) та формалізованими методами побудови екологічних прогнозів.
21. Поясніть концепцію «організмичного» бачення складних систем і як вона трансформувалася в сучасну екологічну науку.
22. Поясніть поняття «емерджентність» як ключову характеристику холізму на прикладі функціонування природної екосистеми.
23. Поясніть поняття «пропускна спроможність системи» (ємкості середовища) як граничної характеристики екосистеми.
24. Поясніть принципи використання апарату нечіткої логіки (fuzzy logic) при моделюванні антропогенного пресингу на екосистеми.

25. Поясніть принципи формування навчальної, валідаційної та тестової вибірок екологічних даних при розробці прогностичних алгоритмів машинного навчання.
26. Поясніть різницю між поняттями «функція системи» та «поведінка системи» на прикладі моніторингу якості атмосферного повітря.
27. Поясніть роль зворотних зв'язків у підтримці цілісності та динамічної рівноваги екологічних систем у рамках холічного підходу.
28. Поясніть роль природного капіталу та екосистемних послуг як вихідних параметрів при системному моделюванні екологічної безпеки.
29. Поясніть роль та специфіку алгоритмів сценарного прогнозування (інструменти «що, якщо...») в управлінні якістю навколишнього середовища.
30. Поясніть сутність властивості гомеостазу екологічної системи та механізм її підтримання.
31. Поясніть сутність методу екстраполяції трендів при прогнозуванні динаміки забруднення атмосферного повітря та назвіть його обмеження.
32. Поясніть сутність оптимізаційного моделювання при вирішенні задач раціонального природокористування та мінімізації викидів.
33. Поясніть сутність поняття «ємність навколишнього середовища» як системного обмеження для техногенного навантаження.
34. Поясніть суть та сфери застосування імітаційного моделювання для прогнозування стану складних природно-техногенних систем.
35. Поясніть, як закон внутрішньої динамічної рівноваги системи проявляється в процесах самоочищення компонентів довкілля.
36. У чому полягає значення екоцентричного (холістичного) світогляду для розробки стратегій екологічної безпеки?
37. У чому полягає системна специфіка взаємодії між біотою та абіотичним компонентом навколишнього середовища?
38. У чому полягає системна сутність явища екологічної декомпозиції (руйнування зв'язків) у порушених антропогенною діяльністю екосистемах?
39. У чому полягає складність практичної реалізації холічного підходу в екологічному моніторингу та менеджменті?
40. У чому полягає специфіка застосування методів Монте-Карло для оцінки екологічних ризиків та невизначеностей?
41. У чому полягає сутність метрик оцінки якості прогностичних алгоритмів (наприклад, MSE, RMSE, MAE, MAPE) стосовно екологічних задач?
42. У чому полягає сутність холічного підходу в системному аналізі та яка його головна філософська теза?
43. Чим принципово відрізняються детерміновані моделі екосистем від стохастичних (імовірнісних)?
44. Чим холістичний підхід принципово відрізняється від редукціоністського при дослідженні складних екологічних об'єктів?
45. Чому вивчення окремих ізольованих компонентів довкілля є недостатнім для прогнозування загальної якості навколишнього середовища?
46. Чому холічний підхід є обов'язковим при оцінці кумулятивного впливу багатьох джерел забруднення на навколишнє середовище?
47. Що розуміють під «холістичним парадоксом» (необхідністю знати ціле для розуміння частин і навпаки) і як він вирішується в системних дослідженнях?
48. Що розуміють під станом екологічної системи і за якими основними параметрами його оцінюють у системному аналізі?
49. Що розуміють під стійкістю довкілля до зовнішніх збурень і які внутрішні системні механізми її забезпечують?
50. Що розуміють під чутливістю екологічної моделі та як проводиться аналіз чутливості до зміни вихідних параметрів?

51. Що таке «ефект метелика» або хаотична динаміка в нелінійних екологічних моделях і як вона впливає на точність довгострокових прогнозів?
52. Що таке багатофакторний регресійний аналіз і як будується алгоритм прогнозування стану довкілля за наявності кількох джерел техногенного впливу?
53. Що таке верифікація та валідація (адекватність) екологічної моделі і якими методами вони перевіряються?
54. Що таке еволюційність системи і як природний розвиток довкілля співвідноситься з антропогенною трансформацією?
55. Що таке екологічна система в контексті системного аналізу і які її головні відмінності від технічних систем?
56. Що таке екологічне моделювання та яка його головна мета в рамках системного аналізу якості довкілля?
57. Що таке екологічне прогнозування з позицій системного аналізу та які основні етапи розробки прогностичних алгоритмів?
58. Що таке ієрархічність (багаторівневість) екологічних систем і як цей принцип враховується при моделюванні навколишнього середовища?
59. Що таке перенаванчання (overfitting) прогностичного алгоритму і якими методами еколог-аналітик може його уникнути?
60. Що таке просторово-розподілене моделювання довкілля і як воно інтегрується з геоінформаційними системами (ГІС)?
61. Що таке просторово-часова гетерогенність довкілля і як вона враховується при розробці систем екологічного моніторингу?
62. Що таке синергетичний ефект у системному аналізі якості навколишнього середовища і як він проявляється при комбінованому забрудненні?
63. Що таке соціоекологічна система та які специфічні керуючі зв'язки виникають у ній при антропогенній трансформації ландшафтів?
64. Як алгоритми адаптивного прогнозування (зокрема метод експоненціального згладжування) реагують на швидкі зміни в техногенному навантаженні?
65. Як алгоритми класифікації та регресії на основі дерев рішень (Decision Trees) та випадкового лісу (Random Forest) застосовуються для прогнозування екологічних ризиків?
66. Як властивість нелінійності розвитку екологічних систем ускладнює прогнозування якості навколишнього середовища?
67. Як інтегруються прогностичні алгоритми з геоінформаційними системами (ГІС) для створення карт-прогнозів просторового розподілу токсикантів?
68. Як категорія «організація системи» розглядається в холистичній методології системного аналізу?
69. Як класична модель Стрітера-Фелпса використовується для моделювання процесів самоочищення та динаміки кисню у водних об'єктах?
70. Як концепція біотичної регуляції навколишнього середовища пояснює стабільність кліматичних параметрів планети на системному рівні?
71. Як критерії автокореляції та стаціонарності часових рядів впливають на вибір алгоритму прогнозування екологічних показників?
72. Як межі та бар'єри в геосистемах впливають на міграцію, акумуляцію та розсіювання забруднюючих речовин?
73. Як моделі «хижак – жертва» (наприклад, Лотки-Вольтерри) адаптуються для аналізу динаміки популяцій під впливом хімічного забруднення?
74. Як при розробці прогностичних алгоритмів розв'язується проблема «прокляття розмірності» (великої кількості контрольованих параметрів довкілля)?
75. Як принципи ієрархічності та емерджентності трансформуються при переході від локального до регіонального та глобального рівнів аналізу якості довкілля?
76. Як принципи холізму відображені в концепції сталого розвитку та управлінні природокористуванням?

77. Як у моделях природних систем враховується чинник часу (дискретні та безперервні моделі за часом)?
78. Як у прогностичних алгоритмах враховується чинник невизначеності вихідних екологічних даних та природної стохастичності?
79. Як у системному аналізі екологічних об'єктів трактується характеристика «складність системи»?
80. Як холістичний принцип «ціле передує своїм частинам» застосовується при моделюванні антропогенного навантаження на урбоекосистеми?
81. Як холістичний підхід враховує нелінійність та непередбачуваність поведінки складних соціоекологічних систем?
82. Як холістичний підхід допомагає виявити приховані або запізнілі критичні зміни (точки перегину) в стані якості довкілля?
83. Як холістичний підхід трактує поняття «цілісність» стосовно біосфери та її регіональних підсистем?
84. Як штучні нейронні мережі (ШНМ) використовуються для прогнозування якості навколишнього середовища в умовах браку точних аналітичних даних?
85. Яким чином алгоритми на основі нечітких часових рядів (Fuzzy Time Series) дозволяють прогнозувати якість середовища за умов якісних або неточних описів?
86. Яким чином інформаційні потоки та сигнали зворотного зв'язку в природних популяціях забезпечують стабільність біогеоценотичного покриву?
87. Яким чином концепція «Гайї» (Землі як живого організму) Джеймса Лавлока ілюструє крайній прояв холістичного підходу в екології?
88. Яким чином результати комп'ютерного моделювання природних систем трансформуються в конкретні управлінські рішення в екологічній політиці?
89. Яким чином термодинамічні закони (зокрема закон зростання ентропії) застосовуються для аналізу деградації природних систем?
90. Яким чином цільова спрямованість (цілепокладання) використовується при управлінні якістю навколишнього природного середовища як складною системою?
91. Які етичні та методологічні ризики пов'язані з автоматичним прийняттям управлінських екологічних рішень на основі результатів роботи прогностичних алгоритмів?
92. Які існують класифікації методів прогнозування якості довкілля за термінами випередження (коротко-, середньо- та довгострокові)?
93. Які математичні та імітаційні методи системного аналізу найкраще адаптовані для збереження холістичного принципу при дослідженні якості довкілля?
94. Які методологічні підходи системного аналізу використовуються для оптимізації взаємодії в системі «суспільство – техніка – довкілля»?
95. Які обмеження та труднощі виникають при спробах моделювання глобальних біосферних процесів і кліматичних змін?
96. Які основні етапи побудови математичної моделі природної системи виділяють у системному аналізі?
97. Які основні природні та антропогенні підсистеми виділяють у структурі довкілля як глобальної мегасистеми?
98. Які системи називаються відкритими і чому всі природні екологічні системи належать саме до цього класу?
99. Які типи системних реакцій (відгуків) довкілля виникають у відповідь на хронічний та гострий техногенний пресинг?
100. Яку роль відіграють зворотні зв'язки (позитивні та негативні) у стабілізації чи деградації стану довкілля?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА ТА ІНТЕРНЕТ-РЕСУРСИ

Основна:

1. Коробкова Г. В., Коляда О. В., Головань Л. В., Системний аналіз якості навколишнього середовища: навчальний посібник. Харків: ДБТУ, 2025. 162 с.
2. Збірник задач з моделювання та прогнозування стану довкілля / уклад. І.В. Хом'як. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. – 42 с.
3. Моделювання та прогнозування стану довкілля: конспект лекцій. / уклад. І.В. Хом'як – Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. – 72 с.
4. Хом'як І.В. Екосистемологія: Навчальний посібник. Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. – 235 с.
5. Дяченко-Богун М.М., Гомля Л.М. Системний аналіз якості навколишнього середовища: методичні рекомендації для виконання практичних і самостійних робіт з навчальної дисципліни. Полтава: Полтавський національний педагогічний університет імені В. Г. Короленка, 2023. 18 с.

Додаткова:

1. Адаменко Я. О. Оцінка впливів на навколишнє середовище: Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: Супрун В. П., 2014. – 284 с.
2. Артеменко І.О. Хом'як І.В. Формування природних вербових лісів в процесі рекультивациі прибережної зони Збірник тез доповідей науково-практичного семінару студентів та аспірантів «Етичні та екологічні проблеми колонізації космічного простору» (16 березня 2024 р). Житомир : Житомирський державний університет імені Івана Франка, 2024. с. 22-23
3. Бараннік В. О. Конспект лекцій з дисциплін “Системний аналіз довкілля”, “Системний аналіз” (для студентів 2 курсу денної і 3 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.040106 “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування”) / Бараннік В.О., Дмитренко Т.В.; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 44 с.
4. Біляєв М. Моделювання і прогнозування стану довкілля : підручник для студентів вищих навчальних закладів І М. М. Біляєв, В. В. Біляєва, П. С. Кіріченко; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна МОН України. Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2016. 207 с.
5. Божинський В. Б., Хом'як І. В. Особливості використання клена ясенелистого в процесі рекультивациі та тераформінгу. Етичні та екологічні проблеми колонізації космічного простору : зб. тез доп. наук.-практ. семінару студентів та аспірантів (Житомир, 16 берез. 2024 р.). Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. С. 24.
6. Бондар С. С., Хом'як І. В. Тератрансформаційні стратегії освоєння незаселених субстратів. Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції : тези Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир : ЖДТУ, 2021. С. 16.
7. Брень А. Л., Хом'як І. В. Екологічні стратегії рослин в процесі відновлення природної рослинності. Сучасні проблеми екології : тези XVIII Всеукр. наук. on-line конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнар. участю (Житомир, 06 жовт. 2022 р.). Житомир : Житомирська політехніка, 2022. С. 23. Бурлака В.А., Грабар І.Г., Хом'як І.В., Сукненко Т.М. Екологія і відходи; під ред. Бурлака В.А. Житомир ПП «Рута», 2009. Кн. 2, том $\frac{3}{4}$ - 431 с.
8. Василенко О. М., Хом'як І. В., Тіт В. І. Моделювання динаміки асоціациі *Dicranopinetum* на території Житомирського Полісся. Український журнал природничих наук. 2025. № 12. С. 309-319.
9. Вернадський В. І. Біосфера. Львів : Наукова думка, 2013. 192 с.
10. Відьмаченко А.П., Мороженко О.В. Порівняльна планетологія. Навчальний посібник. Київ: ТОВ ДІА. 2013. 552 с.
11. Відьмаченко А.П., Стеклов О.Ф. Фізичні характеристики природних супутників планет. Монографія. Київ: НУБіП України, 2023. 198 с.

12. Впровадження методології екологічного сліду продукту в Україні. URL: https://www.eu4environment.org/app/uploads/2024/10/PE_F-Executive-Report-Ukraine-UKR.pdf. Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення; затверджені Наказом Міністерства охорони здоров'я України № 721 від 02 травня 2022 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text>.
13. Гарбар О. В., Весельська Е. В., Хом'як І. В., Гарбар Д. А. Просторово-часові зміни структури земельного покриву Словечансько-Овруцького кряжу. Український журнал природничих наук. № 7 2024. с. 197-209.
14. Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті, затверджені Наказом Міністерства охорони здоров'я України № 1595 від 14 липня 2020 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>.
15. Гітельзон І. І., Левінських М. О. Замкнуті екологічні системи: Людина – Рослини. Красноярськ : ІБФ СО РАН, 2008. 310 с.
16. Гокінг С. Коротка історія часу / пер. з англ. Г. Лелів. Харків : Клуб Сімейного Дозвілля, 2016. 240 с.
17. Горбань О. М. Основи теорії систем і системного аналізу / О. М. Горбань, В. Є. Бахрушин. – Запоріжжя : ГУ «ЗІДМУ», 2011. – 204 с.
18. ДБН А.2.2-1:2021 Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС). 2022. 26 с.
19. Державні санітарні норми і правила ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». URL: <https://ecosoft.ua/ua/blog/trebovaniya-k-kachestvupitevoy-vody/>.
20. Дзюбенко М.І. Вступ до фізики навколомного середовища. Навчальний посібник. Київ: ІСДО, 1994. 294 с.
21. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного керування. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ, 2016. 37 с.
22. ДСТУ ISO 14004:2016. Системи екологічного управління. Загальні настанови щодо запровадження. Київ, 2017. 60 с.
23. Євсюков М.М., Александров Ю.В. Хімія і геологія планет. Навчальний посібник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2000. 190 с.
24. Закон України «Про державні цільові програми». 1621-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1621-15#Text>.
25. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>.
26. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text>.
27. Захожай В.А. Вступ до астрофізики та космогонії. Навчальний посібник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. 208 с.
28. Захожай В.А., Захожай О.В. Основи елементарної астрономії: навчальний посібник. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2021. 232 с.
29. Золенко І., Хом'як І. В. Перспективи використання *Tusilago farfara* L. з метою тератрансформації та рекультивациі. Сталый розвиток країни в рамках Європейської інтеграції : тези Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир : ЖДТУ, 2021. С. 32.
30. Коніщук В.В., Хом'як І.В., Шумигай І.В. Антропогенна трансформація фітоценозів мезотрофних боліт Українського Полісся. Агроєкологічний журнал. 2025. № 1. С. 16-23.
31. Коніщук В.В., Хом'як І.В., Шумигай І.В., Мартиненко В.В. Інвазійний потенціал *Nicandra physalodes* (L.) Gaertn. на території України. Агроєкологічний журнал. 2025 № 4. С. 29-35.
32. Коніщук В.В., Хом'як І.В., Шумигай І.В., Онищук І.П. Динаміка рослинності полезахисних лісосмуг, уражених бойовими діями, різної інтенсивності. Агроєкологічний журнал. 2025 № 2. С. 6-13.

33. Лещенко Д., Хом'як І. В. Рекультиваційний та тератрансформаційний потенціал *Carex hirta* L. *Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції* : тези Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир : ЖДТУ, 2021. С. 54.
34. Медведєва О., Кропивний В., Мірзак Т., Немировський Я. Системний аналіз якості навколишнього середовища: навчальний посібник для студентів спеціальності 101 Екологія. Кропивницький, 2021. 80 с. 18.
35. Методичні рекомендації із здійснення стратегічної екологічної оцінки документів державного планування. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/FN045244> .
36. Методичні рекомендації щодо змісту розроблення регіональних програм з охорони довкілля. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/486nd1.pdf>
37. Методичні рекомендації щодо змісту та порядку розроблення планів поліпшення якості атмосферного повітря та короткострокових планів і дій. URL: <https://mepr.gov.ua/wpcontent/uploads/2023/04/203ndMetodychi-rekomendatsiyi.pdf>.
38. Моделювання та прогнозування стану довкілля. Лабораторний практикум. Електронний навчальний посібник / Під ред. В.Б. Мокіна. Вінниця: ВНТУ, 2017. 84 с.
39. Мусієнко М. М. Екологія рослин : підручник. Київ : Либідь, 2005. 432 с.
40. Наказ Міністерства агрополітики та продовольства України «Про затвердження нормативів екологічної безпеки водних об'єктів, що використовуються для потреб рибного господарства, щодо гранично допустимих концентрацій органічних та мінеральних 159 речовин у морських та прісних водах». №1369/21681 від 14.08.2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1369-12#Text> .
41. Одум Ю. Екологія : у 2-х т. / пер. з англ. Москва : Мир, 1986. Т. 1. 328 с. ; Т. 2. 376 с.
42. Онищук І. П., Хом'як І. В., Кичкирук О. Ю., Зайко Є. О. Вплив йонів свинцю (II) на посівні якості насіння озимої пшениці сорту «Ювілейна». Український журнал природничих наук. 2023. № 6. 69-79
43. Охорона природи: Навчальний посібник для студентів природничих спеціальностей / уклад. І.В. Хом'як, Т.В. Андрійчук. – Житомир: В - тво ЖДУ, 2022. – 245 с.
44. Парновський С., Парновський О. Як влаштовано Всесвіт. Вступ до сучасної космології. Львів: Видавництво Старого Лева, 2018. 248 с.
45. Положення про Державне агентство водних ресурсів України (затверджене Постановою КМУ № 393 від 20 серпня 2014 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/393-2014-%D0%BF#Text>.
46. Положення про державну систему моніторингу довкілля» (затверджене постановою КМУ № 391 від 30 березня 1998 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text>.
47. Порядок проведення моніторингу якості освіти (затверджене постановою КМУ № 758 від 19 вересня 2018 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#Text>.
48. Прищепка А. М., Лико С. М., Портухай О. І. Системний аналіз якості навколишнього середовища: підручник. / А. М. Прищепка, С. М. Лико, О. І. Портухай – Київ: Кондор-Видавництво, 2016.– 496 с.
49. Проблеми екологічної безпеки позаземних поселень : матер. ІХ Житомирського астроекологічного семінару (13 березня 2026 р., м. Житомир) / за ред. І. В. Хом'яка. Житомир : Житомирський державний університет імені Івана Франка, 2026. 39 с.
50. Проект Наказу «Про затвердження Порядку інформування населення про якість повітря за основними показниками з використанням індексу якості повітря в Україні». URL: (https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2025/01/Projekt-nakazu_Indeksyakosti.pdf).
51. Робочий зошит для проведення лабораторних робіт з моделювання та прогнозування стану довкілля / уклад. І.В. Хом'як – Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. – 22 с
52. Системний аналіз якості навколишнього середовища : навч. посіб. / В. В. Добровольський, Є. М. Безсонов. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. 164 с.

53. Системний аналіз якості навколишнього середовища: підручник /Т. А. Сафранов, Я. О. Адаменко, В. Ю. Приходько, Т. П. Шаніна, А. В. Чугай, А. В. Колісник. За ред. проф. Т. А. Сафранова і проф. Я. О. Адаменко. – Одеса: ТЕС, 2014. – 244 с.
54. Сікорська К. В., Хом'як І. В. Фітоценотичне різноманіття порушених оселищ з участю амброзії полинолистої на території Житомирського Полісся. Етичні та екологічні проблеми колонізації космічного простору : зб. тез доп. наук.-практ. семінару студентів та аспірантів (Житомир, 16 берез. 2024 р.). Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. С. 27.
55. Сорока К. О. Основи теорії систем і системного аналізу : навч. посіб. / К. О. Сорока. – Х. : ХНАМГ, 2004. – 291 с.
56. Стасюк Д., Костюк В. С., Хом'як І. В. Етичні та екологічні проблеми космічної експансії. Етичні та екологічні проблеми колонізації космічного простору : зб. тез доп. наук.-практ. семінару студентів та аспірантів (Житомир, 16 берез. 2024 р.). Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. С. 41–43.
57. Теорія систем в екології : підручник / Ю. Г. Масікевич, О. В. Шестопапов, А. А. Негадайло та ін. Суми : Сумський державний університет, 2015. 330 с.
58. Український класифікатор нормативних документів НК 004:2020. URL: <https://drive.google.com/file/d/1zOdsiQQsGoTz34Fli5R KqpbCfqB5U1Ob/view>
59. Фесюк Ю. А., Костюк В. С., Хом'як І. В. Етичні та екологічні аспекти колонізації космосу. Проблеми та перспективи. Етичні та екологічні проблеми колонізації космічного простору : зб. тез доп. наук.-практ. семінару студентів та аспірантів (Житомир, 16 берез. 2024 р.). Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. С. 51–52.
60. Хом'як І.В., Онищук І.П. Коцюба І.Ю., Брень А.Л., Шкилюк Ю.В. Рецензія на монографічне видання «Продромус рослинності України». 2020. Екологічні науки № 2(29). Т. 1 . С. 170-173.
61. Хом'як І. В. Видова різноманітність та фітоценотична приуроченість представників Orthoptera в кар'єрах Житомирського Полісся. Український журнал природничих наук. № 7 2024. с. 197-209.
62. Хом'як І. В. Відновлювана екологія та астроекологія: сталий розвиток. Соціоекологічні проблеми колонізації космосу та тераформації : матер. VIII Житомирського астроекологічного семінару (м. Житомир, 14 берез. 2025 р.). Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2025. С. 48–52..
63. Хом'як І. В. Історія екології : навчальний посібник. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2023. 310 с.
64. Хом'як І. В. Короткий курс соціоекології. Методичні рекомендації до вивчення дисципліни «Соціоекологія та екологічна етика» / І. В. Хом'як, Н. С. Демчук, Т. П. Мостіпака. – Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2019. – 95 с.
65. Хом'як І. В. Підвищення ефективності відновлення екосистем із використанням класичних методів екосистемології. Збірник тез доповідей наукової конференції викладачів та молодих науковців Житомирського державного університету імені Івана Франка з нагоди Днів науки. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2023. С. 284–288..
66. Хом'як І. В., Коніщук В. В. Прибережно-водна та болотна рослинність гірничих об'єктів Центрального Полісся. Український журнал природничих наук. 2024. № 10. С. 276-283.
67. Хом'як І. В., Онищук І. П. Інструктивно-методичні матеріали до практичних занять з освітньої компоненти «Методологія та організація наукових досліджень з екології.». Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2025. 36 с.
68. Хом'як І. В., Шамоніна М. І. Тератрансформаційний потенціал представників роду осокові (Carex). Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції : тези Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир : ЖДТУ, 2021. С. 12.
69. Хом'як І.В., Хом'як О.І. Потенціал спонтанного тераформінгу ландшафтів суходолу з позицій сучасної теорії динаміки екосистем. Український журнал природничих наук, 2024, № 8, 289-299.

70. Хом'як І.В., Онищук І.П., Медвідь О.В. Зміна вектора динаміки автогенної сукцесії екосистем під впливом скиду зворотних вод. Екологічні науки, 2023. – № 1(46). – 49-52 С.
71. Хом'як І.В. Аналіз теорій поліклімаксу та моноклімаксу із позиції сучасної теорії динаміки екосистем. Екологічні науки. 2024. № 1(52), Том 2. 179-183.
72. Хом'як І.В. Антропогенна трансформація похідних лісів класу *Robinietaea* на території Українського Полісся Український журнал природничих наук. 2025. № 11. С. 314-324.
73. Хом'як І.В. Вплив інвазій видів-трансформерів на динаміку рослинності перелогів Українського Полісся. Біоресурси і природокористування. ТОМ 10, № 1-2 (2018). С. 29-35.
74. Хом'як І.В. Вплив умов середовища на напрям первинних сукцесій в районі виходів лесових порід Правобережного Полісся. Питання біоіндикації та екології. – 2015. – Вип. 20, № 1. - С. 35-46.
75. Хом'як І.В. Динаміка надземної фітомаси під час автогенних сукцесій на перелогах для території Правобережного Полісся. Екологічні науки. 2016. № 12-13. С. 33-39.
76. Хом'як І.В. Динаміка флори перелогів Українського Полісся. // *ScienceRise: Biological Science* – 2018, №1 (10). С 8-13.
77. Хом'як І.В. Збірник задач з моделювання та прогнозування стану довкілля / уклад. І.В. Хом'як. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. – 42 с.
78. Хом'як І.В. Ідеальний ландшафт та міські джунглі: вибір між щастям та успіхом. Жила, 2013. С. 14-19.
79. Хом'як І.В. Інвазії *Acer negundo* L. у порушені екосистеми гірничих об'єктів на території Українського Полісся. Український журнал природничих наук. 2025. № 13. С. 421-429.
80. Хом'як І.В. Методологія та організація наукових досліджень з екології. Житомир: Видавництво ЖДУ імені Івана Франка, 2024. 167 с.
81. Хом'як І.В. Моделювання та прогнозування стану довкілля: конспект лекцій. / уклад. І.В. Хом'як – Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. – 72 с.
82. Хом'як І.В. Нове місцезнаходження *Botrychium lunaria* (*Ophioglossaceae*) на території Центрального Полісся К. УБЖ №2. 2014. С. 206-208.
83. Хом'як І.В. Особливості антропогенного впливу на природну динаміку екосистем Українського Полісся. Екологічні науки. 2018. №1 (20) том 2. С. 69-73.
84. Хом'як І.В. Проблема екотону в класифікації екосистем. // Наукові записки НаУКМА. – 2011. Т119. С. 70-72.
85. Хом'як І.В. Фітоіндикаційна характеристика трансформації рослинних угруповань відновлюваної рослинності Центрального Полісся. // Екосистеми їх оптимізація та охорона. 2011. Вип. 5 (24). С. 58-65.
86. Хом'як І.В. Фітоіндикаційний аналіз передклімаксичних стадій розвитку екосистем // Питання біоіндикації та екології – 2013. Вип. 18, №1. С. 20-29
87. Хом'як І.В. Фітоіндикаційний аналіз ступеня трансформації екосистем Центрального Полісся. // Питання біоіндикації та екології – 2012. Вип. 17, №1. С. 3-11
88. Хом'як І.В. Фітоіндикаційний аналіз трансформаційних процесів водно-болотних угідь. // Заповідна справа в Україні. – 2013. вип. 1. Т.19., С. 38-42.
89. Хом'як І.В. Характеристика асоціацій *Agrostio-Populetum tremulae* та *Epilobio-Salicetum carpeae* класу *Epilobietea angustifoliae* для Правобережного Полісся. УБЖ №4. 2016. С. 239-254.
90. Хом'як І.В. Шлях людини у космос // Аномальні явища: методологія і практика досліджень: зб. наук. праць / під заг. ред. А.С. Білика. – К.: Знання, 2020
91. Хом'як І.В., Василенко О.М. Фітоценотичне різноманіття в районі полігону твердих побутових відходів м. Коростень. Екологічні науки, 2025. 4(61) 117-121
92. Хом'як І.В., Гарбар Д.А., Андрійчук Т.В., Костюк В.С., Власенко Р.П. Динаміка відновлюваної рослинності піщаних кар'єрів Житомирського Полісся Екологічні науки. 2021, № 6 (39). С 204-207.

93. Хом'як І.В., Глобальні екологічні проблеми з точки зору астроекології. Екологічні науки. 2021, № 6 (39). С 154-157.
94. Хом'як І.В., Гринковська А.В., Весельська Е.В. Проблеми і перспективи синфітоіндикаційного аналізу меж та активності планетарних аномалій. Аномальні явища: методологія і практика досліджень: зб. наук. праць / під заг. ред. А.С. Білика. К.: Знання, 2020
95. Хом'як І.В., Демчук Н.С., Василенко О.М. Фітоіндикація антропогенної трансформації екосистем на прикладі Українського Полісся. Екологічні науки. 2018. №3 (22). С. 113-118.
96. Хом'як І.В., Демчук Н.С., Гарбар Д.А. Методичні рекомендації до проведення навчальної практики з екосистемології / уклад. І.В. Хом'як, Н.С. Демчук, Д.А. Гарбар – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. – 37 с.
97. Хом'як І.В., Демчук Н.С., Коцюба І.Ю., Ястребова Я.В. Еколого-ценотична характеристика популяції *Heracleum sosnowskyi* Manden на території Центрального Полісся 2019. Екологічні науки № 1(24). Т. 2 . С. 126-129.
98. Хом'як І.В., Зарічна М.С., Демчук Н.С., Костюк В.С., Василенко О.М., Власенко Р.П., Гарбар Д.А. Вплив зарегулювання течії на динаміку екосистем річки Лісна (Житомирська область) Екологічні науки. 2021 № 2(35). С 45-48.
99. Хом'як І.В., Козин М.С., Коцюба І.Ю., Василенко О.М., Власенко Р.П. Обґрунтування необхідності охорони витоків малих річок на прикладі Словечансько-Овруцького кряжу. Екологічні науки. 2022. № 1 (40). С 28-32.
100. Хом'як І.В., Коростецький В.О. Соціоекологія з основами екологічної етики. (посібник для студентів класичних університетів) Житомир. 2011. ПП «Рута» с.268.
101. Хом'як І.В., Коцюба І.Ю., Козин М.С., Василенко О.М., Гарбар Д.А. Перспективи дистанційного дослідження запасів підземних вод Словечансько-Овруцького кряжу. Екологічні науки, 2023. – № 2(47). С 217-221.
102. Хом'як І.В., Мшанецька В.В., Костюк В.С., Шпаковська Л.В., Демчук Н.С., Андрійчук Т.В., Онищук І.П. Оцінка екосозологічного потенціалу території за допомогою аналізу синфітоіндикаційних моделей динаміки. Екологічні науки. 2020, № 6 (33). Т. 1 . С. 178-184.
103. Хом'як І.В., Овдіюк О.М. Контрольоване самовідновлення рослинності як альтернатива лісової рекультивациі. Екологічні науки. № 4(55). 2024. С. 229-233.
104. Хом'як І.В., Онищук І. П. Поширення *Polystichum aculeatum* (L.) Roth. (Dryopteridaceae) на території Словечансько-Овруцького кряжу. Наукові записки НаУКМА. Біологія та екологія. – 2018. – Том 1. – С. 48-51.
105. Хом'як І.В., Онищук І.П., Василенко О.М., Виговський І.В. Особливості складання звіту оцінки впливу на довкілля в умовах радіаційного забруднення. Екологічні науки. 2025. № 6(57). С. 216-220.
106. Хом'як І.В., Онищук І.П., Василенко О.М., Гарбар Д.А., Коцюба І.Ю. Природна та антропогенна динаміка угруповань асоціації *Geranio-Trifolietum alpestris* на території Українського Полісся. Екологічні науки, 2022. – № 5(44). – 238-242 С.
107. Хом'як О., Хом'як І. Подвійна користь астроекології. Етичні та екологічні проблеми колонізації космічного простору : зб. тез доп. наук.-практ. семінару студентів та аспірантів (Житомир, 16 берез. 2024 р.). Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. С. 11–21.
108. Хом'як, І. В., Демчук, Н. С., Гарбар, Д. А. (2021) Екосистемологія. Методичні рекомендації до проведення лабораторних робіт. ЖДУ ім. І. Франка, Житомир. 62 с.
109. Хом'як, І. В., Костюк, В. С., Гарбар, О. В., Демчук, Н. С., Андрійчук, Т. В., Власенко, Р. П., Гарбар, Д. А., Онищук, І. П., Шпаковська, Л. В., Омельчук, М. О. (2021) Особливості розміщення оселищ із різним ступенем антропогенної трансформації. Екологічні науки. 2021, (7). pp. 67-71.
110. Хом'як, І. В., Коцюба, І. Ю. (2023) Видова різноманітність флори західно-глинянської ділянки Дубрівського родовища первинних каолінів. Український журнал природничих наук (1). с. 60-70.

111. Хом'як, І. В., Онищук, І. П., Медвідь, О. В., Пацева, І. Г., Хом'як, О. І. Вплив скиду зворотних вод Шамраївського родовища гранітів на фіторізноманіття долини річки Роставиця. Український журнал природничих наук. 2024. №9. С. 331-343.
112. Хомяк І.В. Гарбар О.В. Никончук Є. Демчук Н.С. Гарбар Д.А. Еколого-ценотична характеристика популяції *Hedera helix* L. (Araliaceae) на території Словечансько-Овруцького кряжу. *Lesia Ukrainka Eastern European National University Scientific Bulletin Series: Biological Sciences*, 2019, 3 (387). – С. 32-37.
113. Хом'як І.В. Синтаксономія відновлюваної рослинності кар'єрів Центрального Полісся. Український ботанічний журнал, 2022. 79(3): 142–153.
114. 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.
115. Церклевич А.Л., Фис М.М., Шило Є.О., Заяць О.С. Планетарна геодинаміка. Фігура, гравітаційне поле, внутрішня будова Землі і планет земної групи. Монографія. Львів: видавництво "Львівська політехніка, 2022. 336 с.
116. Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Хом'як І. В., Кірейцева, Г. В. Моделювання динаміки водних і прибережно-водних рослинних угруповань у пост-мілітарних умовах. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2023. Вип. 2. С. 47-55.
117. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Гандзюра В.П., Алпатова О.М., Демчук Л.І., Хом'як І.В., Вовк В.М. Гідрохімічний статус пост-мілітарних водних екосистем с. Мощун, Київської області. *Екологічні науки*, 2023. – № 1(46). – 53-58 С.
118. Чебра О.В. Відбір екологічних показників для інтегральної оцінки антропогенного впливу на довкілля. *Екологічні науки*. № 3(36). URL: <http://eoj.dea.kiev.ua/archives/2021/3/7.pdf>
119. Черняєва О.П., Золенко І.С., Лещенко Д.Є., Хом'як І.В., Відновлення природної рослинності на порушених екотопах – основа для тератрансформаційних моделей // *Матеріали II всеукраїнської науково-практичної конференції «Українське Полісся: проблеми та тренди сучасного розвитку»*. Ніжин: НДУ ім. Гоголя, 2022. С. 56-59.
120. Черняєва О.П., Хом'як І.В. Тератрансформаційний потенціал *Elymus repens* (L.) GOULD. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених "Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції" Житомир: ЖДТУ, 2021. С. 18.
121. Шамоніна М.І. Хом'як І. В. Тератрансформаційний потенціал представників роду осокові (*Carex*) в процесі рекультивації. Тези XVIII Всеукраїнської наукової on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнародною участю «Сучасні проблеми екології» 06 жовтня 2022 року. Житомир : Житомирська політехніка, 2022. С. 101.
122. Шиманська Ю.П. Хом'як І.В. Використання відновлювального потенціалу похідних лісів в процесі рекультивації та тераформінгу. Збірник тез доповідей науково-практичного семінару студентів та аспірантів «Етичні та екологічні проблеми колонізації космічного простору» (16 березня 2024 р). Житомир : Житомирський державний університет імені Івана Франка, 2024. с. 25-26.
123. Adams F., Laughlin G. *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity*. New York : Touchstone Books, 1999. 251 p.
124. Allen J. *Biosphere 2: The Human Experiment*. New York : Penguin Books, 1991. 156 p.
125. Alpatova O., Maksymenko I., Patseva I., Khomiak I., Gandziura V. Hydrochemical State of the Post-Military Operations Water Ecosystems of the Moschun, Kyiv Region. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, (Nov 2022). European Association of Geoscientists & Engineers. 2022, p.1 – 5
126. Baur P. S., Clark R. S., Walkinshaw C. H., Scholes V. E. Uptake and translocation of elements from Apollo 11 lunar material by lettuce seedlings. *Phyton*. 1974. Vol. 32. P. 133–142.
127. Carroll B. W., Ostlie D. A. *An Introduction to Modern Astrophysics*. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2017. 1359 p.

128. Castro V. A., Thrasher A. N., Healy M., Ott C. M., Pierson D. L. Microbial characterization during the early habitation of the International Space Station. *Microbial ecology*. 2004. Vol. 47, no. 2. P. 119–126.
129. Cockell C. S. *Astrobiology: Understanding Life in the Universe*. 2nd ed. Wiley-Blackwell, 2015. 472 p.
130. Crick F. H., Orgel L. E. Directed Panspermia. *Icarus*. 1973. Vol. 19, No. 3. P. 341–348. doi: 10.1016/0019-1035(73)90110-3.
131. Damage escape and repair in dried *Chroococcidiopsis* spp. from hot and cold deserts exposed to simulated space and martian conditions / D. Billi et al. *Astrobiology*. 2011. Vol. 11, No. 1. P. 65–73. doi: 10.1089/ast.2010.0530.
132. Damage escape and repair in dried *Chroococcidiopsis* spp. from hot and cold deserts exposed to simulated space and martian conditions / D. Billi et al. *Astrobiology*. 2011. Vol. 11, No. 1. P. 65–73. doi: 10.1089/ast.2010.0530.
133. David, L. Mining Moon Ice: Prospecting Plans Starting to Take Shape. *Space.com*. 2018. 13 July. URL: <https://www.space.com/mining-moon-ice-prospecting-plans-starting-to-take-shape.html> (дата звернення: 05.10.2025)
134. Duri L. G., Caporale A. G., Roupael Y., Vingiani S., Palladino M., De Pascale S., Adamo, P. The potential for lunar and martian regolith simulants to sustain plant growth: a multidisciplinary overview. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022. Vol. 8. P. 747821.
135. Dyson F. *Infinite in All Directions: Gifford Lectures Given at Aberdeen, Scotland April–November 1985*. New York : Harper & Row, 1988. 319 p.
136. Dyson F. *Infinite in All Directions: Gifford Lectures Given at Aberdeen, Scotland April–November 1985*. New York : Harper & Row, 1988. 319 p.
137. Dyson F. J. Time without end: Physics and biology in an open universe. *Reviews of Modern Physics*. 1979. Vol. 51, No. 3. P. 447–460. doi: 10.1103/RevModPhys.51.447.
138. Dyson F. J. Time without end: Physics and biology in an open universe. *Reviews of Modern Physics*. 1979. Vol. 51, No. 3. P. 447–460. doi: 10.1103/RevModPhys.51.447.
139. Eckart P. *Spaceflight Life Support and Biospherics*. Torrance : Microcosm Press ; Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996. 444 p.
140. Ellery A. Supplementing closed ecological life support systems with in-situ resources on the moon. *Life*. 2021. Vol. 11, no. 8. P. 770.
141. Fackrell L. E. Humphrey S., Loureiro R., Palmer A. G., Long-Fox, J. Overview and recommendations for research on plants and microbes in regolith-based agriculture. *npj Sustainable Agriculture*. 2024. Vol. 2, no. 1. P. 15.
142. Ferl R. J., Paul A. L. Lunar Plant Biology– A Review of the Apollo Era. *Astrobiology*. 2010. Vol. 10. P. 261–274.
143. Fogg M. J. *Terraforming: Engineering Planetary Environments*. Warrendale : SAE International, 1995. 544 p.
144. Fuchs L. H., Olsen E., Jensen K. J. Mineralogy, Mineral Chemistry and Composition of the Murchison (CM2) Meteorite. *Smithsonian Contributions to the Earth Sciences*. 1973. Vol. 10. P. 1–84. doi: 10.5479/si.00810274.10.1.
145. Gibson E. K. Volatile elements, carbon, nitrogen, sulfur, sodium, potassium and rubidium in the lunar regolith. *Phys Chem Earth*. 1977. Vol. X. P. 57–62.
146. Hart M. H. *Interstellar Migration, the Biological Revolution, and the Future of the Galaxy. Interstellar Migration and Human Experience* / ed. B. R. Finney, E. M. Jones. Berkeley : University of California Press, 1985. P. 278–291.
147. Hart M. H. *Interstellar Migration, the Biological Revolution, and the Future of the Galaxy. Interstellar Migration and Human Experience* / ed. B. R. Finney, E. M. Jones. Berkeley : University of California Press, 1985. P. 278–291.

148. Hartmann K. W. The Resource Base in Our Solar System. *Interstellar Migration and Human Experience* / ed. B. R. Finney, E. M. Jones. Berkeley : University of California Press, 1985. P. 26–41.
149. Horneck, G., & Rettberg, P. *Complete course in astrobiology*. John Wiley & Sons. 2007. 413 p.
150. Jarosewich E. Chemical Analysis of the Murchison Meteorite. *Meteoritics*. 1971. Vol. 1, No. 1. P. 49–52. doi: 10.1111/j.1945-5100.1971.tb00406.x.
151. Jessie C. Buettel, Barry W. Brook, Andrew Cole, John Dickey, Emily J. Flies. Astroecology? Shifting the interdisciplinary collaboration paradigm. *Ecology and Evolucion*. 2018 №8: P. 9586-9589.
152. Kapets N. V. Barsukov O. O., Vynokurov D. S., Khomyak I. V. Pioneer lichen communities of the Teteriv River Basin (Ukraine). *Acta Botanica Hungarica* 2018. 60(3–4), pp. 331–355.
153. Keeter B. Scientists grow plants in lunar soil. Ed. Bill Keeter. NASA (National Aeronautics and Space Administration) 2025 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.nasa.gov/feature/biological-physical/scientists-grow-plants-in-soil-from-the-moon> (дата звернення: 15.07.2025).
154. Khomiak I. V., Onyshchuk I. P., Vakerych M. M., Hasynets Y. S., Khomiak O. I., Sabadosh V. I. Change in the general aboveground phytomass as a basis for modeling dynamics of recovery of vegetative cover. *Biosystems Diversity*, 2024, 32 (2), P. 225-232.
155. Khomiak I., Onishchuk I., Demchuk N. Phytoindicators of ecosystem dynamics in Ring-banc Ukrainian Polissia *ScienceRise:Biological Science*. – 2018 №4 (13) P. 25-30.
156. Khomiak I., Onyschuk I., Khomiak O. Analysis of the relevance of astroecological research. *Екологічні науки*. 2024. № 2. с. 35-38.
157. Khomiak I.V., Onyshchuk I.P., Kychkyruk O.Y., Vakerych M. M., Hasynets Y. S., Schwartau V. V. The impact of strike UAV explosions on soil acidity and vegetation dynamics. *Biosystems Diversity*, 2025, 33 (2), P. 2530.
158. Khomiak I.V., Onyshchuk I.P., Vakerych M.M., Hasynech Y.S. Adaptation strategies of *Heracleum sosnowskyi* in Ukrainian Polissia. *Biosystems Diversity*. 2024. 32 (1), P. 99-106
159. Khomiak I.V., Onyshchuk I.P., Vasylenko O.M. Theoretical basis of classification of terraforming methods. *Ecological sciences*. 2024. 4(55) P. 234-237.
160. Khomiak I.V. Prospects and risks of using lunar regolith to form isolated ecosystems *Ukrainian Journal of Natural Sciences*. 2025. № 14. С. 270-278.
161. Khomiak Ivan, Khomiak Oksana The influence of substrate particle size on the potential for spontaneous spread of biota across the landmass of rocky planets. // *Global science: prospects and innovations. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference*. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom. 2024. P 314-319.
162. Khomiak Ivan, Khomiak Oksana. Using artificial intelligence for express-analysis of the biotic potential of alien habitat. *Modern research in science and education. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference*. BoScience Publisher. Chicago, USA. 2024. P. 203-208.
163. Khomiak Ivan, Khomiak Oksana. Using artificial intelligence for express-analysis of the biotic potential of alien habitat. // *Modern research in science and education. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference*. BoScience Publisher. Chicago, USA. 2024. P. 203-208.
164. Khomiak Ivan, Vasylenko Olha Using the rules of natural recovery of ecosystems for the process of revegetation and terraforming. *Ekologia i racjonalne zarządzanie przyrodą: edukacja, nauka i praktyka [Zasób elektroniczny]: materiały z międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej, (Łomża – Żytomierz, 15.11.2023 r. / Pod redakcją naukową Zoia Sharlovych, Janusz Lisowski, Ruslana Romaniuk. Część 1. Wydawnictwo: MANS w Łomży, 2023. S. 199-203.*
165. Khomiak Ivan, Oleksandr Harbar, Nataliia Demchuk, Iryna Kotsiuba, and Iryna Onyshchuk Above-ground phytomas dynamics in autogenic succession of an ecosystem. *Forestry ideas*, 2019, vol. 25, No 1 (57): 136–146.

166. Khomiak, I. V., Onyshchuk, I. P., Vakerych, M. M., Hasynets, Y. S., & Schwartau, V. V. (2025). Restoration of floodplains' natural vegetation of Polissia to reduce the effects of climate change. *Biosystems Diversity*, 33(4), e2551.
167. Khomiak, I., Harbar, O., Kostiuk, V., Demchuk, N., & Vasylenko, O. Synphytoindication models of the anthropogenic transformation of ecosystems. *Natura Croatica: Periodicum Musei Historiae Naturalis Croatici*, 2024. 33(1), P. 65-77.
168. Khomyak I. V., Onischuk I. P., Kotsyuba I. Yu.. Ecological spectra of the most abundant Lumbricid (Okigohaeta, Lumbricidae) species of the Central Ukrainisn (Polissa) *Vestnik zoologii*, 2016. №50(6). P. 553–556,
169. Kolb, V. M. (Ed.). *Handbook of astrobiology*. CRC Press. 2018868 p.
170. Kotsyuba I. Y., Khomiak I. V., Bren A., Shamonina M. Ecological strategies of plants in the process of restoration of disrupted natural ecosystems of Ukrainian Polissia. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*. 2023. Vol. 3. P. 186-198.
171. Kozyrovska N. O., Lutvynenko T. L., Korniiichuk O. S., Kovalchuk M. V., Voznyuk T. M., et al. Growing pioneer plants for a lunar base. *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 37. P. 93–99.
172. Kral T. A., Bekkum C. R., McKay, C. P. Growth of methanogens on a mars soil simulant. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. 2004. Vol. 34. P. 615–626.
173. Lewis J. S. *Mining the Sky*. Reading, Massachusetts : Helix Books, 1996. 274 p.
174. York : Addison-Wesley, 1996. 274 p.
175. Lewis J. S. *Physics and Chemistry of the Solar System*. New York : Academic Press, 1997. 591 p.
176. Lissauer J. J., de Pater I. *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability*. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. 583 p.
177. Mauldin J. H. *Prospects for Interstellar Travel*. San Diego : Published for the American Astronautical Society by Univelt, 1992. 370 p. (Science and Technology Series ; vol. 80).
178. Mautner M. N. Directed Panspermia. 2. Technological Advances Toward Seeding Other Solar Systems, and the Foundations of Panbiotic Ethics. *Journal of the British Interplanetary Society*. 1997. Vol. 50. P. 93–102.
179. Mautner M. N. Life in the Cosmological Future: Resources, Biomass and Populations. *Journal of the British Interplanetary Society*. 2005. Vol. 58. P. 167–180.
180. Mautner M. N. Life-Centered Ethics, and the Human Future in Space. *Bioethics*. 2009. Vol. 23, No. 8. P. 433–440. doi: 10.1111/j.1467-8519.2008.00688.x.
181. Mautner M. N. Planetary Bioresources and Astroecology. 1. Planetary Microcosm Bioassays of Martian and Meteorite Materials: Soluble Electrolytes, Nutrients, and Algal and Plant Responses. *Icarus*. 2002. Vol. 158, No. 1. P. 72–86. doi: 10.1006/icar.2002.6841.
182. Mautner M. N. Planetary Resources and Astroecology. Electrolyte Solutions and Microbial Growth. Implications for Space Populations and Panspermia. *Astrobiology*. 2002. Vol. 2, No. 1. P. 59–76. doi: 10.1089/153110702753621349.
183. Mautner M. N. *Seeding the Universe with Life: Securing Our Cosmological Future*. Washington D. C. : Legacy Books, 2000. 376 p.
184. Mautner M. N., Matloff G. L. A Technical and Ethical Evaluation of Seeding Nearby Solar Systems. *Bulletin of the American Astronomical Society*. 1979. Vol. 32. P. 419–423.
185. Michael Noah Mautner. Astroecology, cosmo-ecology, and the future of life. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 2014. №4 (83): P. 449-464.
186. Novosyadlyj B., Pelykh V., Shtanov Yu., Zhuk A. Dark Energy: Observational Evidence and Theoretical Models. Vol. 1. of the three-volume monography “Dark Energy and Dark Matter in the Universe”, Ed. V.M. Shulga. Kiev: Akadempriodyka, 2013, 380 p.
187. O'Leary B. T. Mining the Apollo and Amor Asteroids. *Science*. 1977. Vol. 197, No. 4301. P. 363–366. doi: 10.1126/science.197.4301.363-a.

188. Oleksandr Harbar, Ivan Khomiak, Iryna Kotsiuba, Nataliia Demchuk and Iryna Onyshchuk. Anthropogenic and natural dynamics of landscape ecosystems of the Slovechansko-Ovruchsky ridge (Ukraine). *Soc. ekol. Zagreb*, 2021.. No. 3. P. 347-367.
189. Oleksandr Harbar, Oleksandr Lavryk, Ivan Khomiak, Ruslana Vlasenko, Tamara Andriychuk, Vitaliy Kostyuk. Spatiotemporal analysis of the changes of the main habitats of the Kozachelaherska arena (Nyzhniodniprovsky sands, Kherson region, Ukraine) in the period of 1990–2020. *Auc Geographica*, 2023. № 53. P. 64–73
190. Olsson-Francis K., Cockell C. S. Use of cyanobacteria in in-situ resource use in space applications. *Planetary and Space Science*. 2010. Vol. 58, No. 10. P. 1279–1285. doi: 10.1016/j.pss.2010.05.005.
191. O'Neill G. K. The Colonization of Space. *Physics Today*. 1974. Vol. 27, No. 9. P. 32–38. doi: 10.1063/1.3128863.
192. O'Neill G. K. *The High Frontier*. New York : William Morrow, 1977. 275 p.
193. Paul A. L., Smith D. P., Gigis P. J., Ferl J. B. and Ferl R. L. Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration. *Communications Biology*. 2022. P. 322.
194. Plaxco K. W., Gross M. *Astrobiology: A Brief Introduction*. 2nd ed. Baltimore : Johns Hopkins University Press, 2011. 330 p.
195. Rickman D., McLemore C. A., Fikes J. Characterization summary of JSC-1A bulk lunar mare regolith simulant. 2007 [Електронний ресурс]. URL: http://www.orbitec.com/store/JSC-1A_Bulk_Data_Characterization.pdf ; http://www.orbitec.com/store/JSC-1AF_Characterization.pdf (дата звернення: 28.07.2014).
196. Rybicki K. R., Denis C. On the Final Destiny of the Earth and the Solar System. *Icarus*. 2001. Vol. 151, No. 1. P. 130–137. doi: 10.1006/icar.2001.6591.
197. Seager S. *Exoplanet Atmospheres: Physical Processes*. Princeton : Princeton University Press, 2010. 264 p.
198. Taylor L., Pieters C., Britt D. Evaluations of lunar regolith simulants. *Planetary and Space Science*. 2016. Vol. 126. P. 1–7.
199. Thomson (Lord Kelvin) W. Inaugural Address to the British Association Edinburgh. *Nature*. 1871. Vol. 4, No. 92. P. 261–278. doi: 10.1038/004261a0.
200. Vlasenko Ruslana, Khomiak Ivan, Harbar Oleksandr, Demchuk Nataliia (2020) Lumbricides as a bio-indicators of the influence of electrical transmission line in the conditions of Ukrainian Polissia. *Travaux du Muséum National d'Histoire Naturelle "Grigore Antipa"* (63 (1)). pp. 4-18.
201. Wamelink G. W., Frissel J. Y., Krijnen W. H. J., Verwoert M. R. Can Plants Grow on Mars and the Moon: A Growth Experiment on Mars and Moon Soil Simulants. *PLOS One*. 2014. Vol. 9, no. 8. e103138.
202. Weber P., Greenberg J. Can spores survive in interstellar space? *Nature*. 1985. Vol. 316, No. 6027. P. 403–407. doi: 10.1038/316403a0.
203. Weinberg S. *Cosmology*. Oxford University Press Inc., New York, 2008. –593 C.
204. Zaets I., Burlak O., Rogutskyy I., Vasilenkoa A., Mytrokhyn O., et al. Bioaugmentation in growing plants for lunar bases. *Advances in Space Research*. 2011. Vol. 47. P. 1071–1078. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.011>.

Интернет ресурси:

<http://eprints.zu.edu.ua/>

<http://euroveg.org/>

<http://geobot.org.ua/>

<https://www.cambridge.org/core/journals/international-journal-of-astrobiology>

<https://www.sciencedirect.com/journal/life-sciences-in-space-research/issues>

https://x.com/khomiak_ivan

<https://www.youtube.com/@Astroeco-UA-y51>